GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA Y LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO NATURAL DE AGUA



Trabajando para todos los peruanos

ANA
Autoridad Nacional del Agua

PERÚ Ministerio de Agricultura y Riego

GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA Y LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO NATURAL DE AGUA.
364 pág.
ISBN: 978-612-4273-14-8

©Autoridad Nacional del Agua
Calle Diecisiete N° 355, Urb. El Palomar - San Isidro, Lima
Teléfono: (511)-224 3298 - Anexo: 2400
www.ana.gob.pe

Tiraje: 500 ejemplares

Primera edición: Agosto 2017

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2017-09874

Diseño y Diagramación:
Anghelo Manuel Rodríguez Paredes
www.behance.net/anghewolf

Impresión:
Servicios Gráficos de: Anghelo M. Rodríguez Paredes
RUC: 10452947973
Jr. Nicolás de Piérola No.161- Lima-7
Telf.: 511 - 525-6380 / 980 965 729
editaimprimetulibro@gmail.com.pe

Se permite la reproducción total o parcial de esta obra, sólo citando la fuente.

GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA Y LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO NATURAL DE AGUA



Trabajando para todos los peruanos

ANA
Autoridad Nacional del Agua

PERÚ Ministerio de Agricultura y Riego

Autoridad Nacional del Agua
Ministerio de Agricultura y Riego

Jefe de la Autoridad Nacional del Agua
Ingeniero Abelardo de La Torre Villanueva

Secretaría General
Abogado Yury A. Pinto Ortiz

Director de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos
Biólogo Juan Carlos Castro Vargas

Coordinadora
Bióloga María Esther Palacios Burbano

Asesor Técnico – Experto Integrado CIM/GIZ
Ingeniero Klaus Holzner

Revisor – Experto Internacional
Ingeniero Henry Salas

Colaboradores:
Ingeniero Edwin Ventura Chuquipul
Bióloga Lizeth Anani Cárdenas Villena

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 17

OBJETIVO 19

ALCANCE 21

I. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

1. Introducción 24
2. Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 24
3. Determinación de las concentraciones máximas 27
4. Determinación del caudal máximo 28
5. Mezcla de aguas residuales de diferentes fuentes 28
6. Prohibición de la disposición de residuos sólidos 29

II. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN UN CUERPO NATURAL DE AGUA LÓTICO (RÍOS Y QUEBRADAS)

1. Comportamiento de las concentraciones de contaminantes en un cuerpo de agua lótico 32
2. Determinación de la zona de mezcla 37
   - 2.1 Modelo matemático para la determinación de la zona de mezcla 38
   - 2.2 Modelos numéricos para la determinación de la zona de mezcla 39
   - 2.3 Restricciones de la zona de mezcla 40
3. Determinación del caudal disponible para la dilución 44
   - 3.1 Reducción del caudal crítico en el caso de una zona de mezcla restringida 47
4. Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 47
5. Balance de masas 48
   - 5.1 Balance de masas de nitratos 52

6. Evaluación de la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla 53
7. Criterios para el control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua lotico 58
8. Evaluación de vertimientos en curso y en fase de adecuación a los ECA-Agua 61

III. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN CUERPOS DE AGUA LÉNTICOS NATURALES Y ARTIFICIALES (LAGOS, LAGUNAS Y EMBALSES O PRESAS)

1. Generalidades sobre el vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo de agua léntico 66
2. La zona de mezcla en cuerpos de agua lénticos 66
3. Información requerida para la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo de agua léntico 67
   3.1 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 67
   3.2 Densidad del agua natural 68
   3.3 Determinación del índice de intercambio de agua de la laguna o lago 71
4. Evaluación del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental a largo plazo 72
5. Evaluación del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental en el límite de la zona de mezcla 74
   5.1 Modelos numéricos para la determinación de la dilución inicial y de la extensión máxima de la zona de mezcla 76
   5.2 Emisores subacuáticos con difusores de orificios múltiples 77
6. Criterios para el control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 78
7. Evaluación de vertimientos en curso y en fase de adecuación a los ECA-Agua 81

IV. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN UN CUERPO NATURAL DE AGUA MARINO COSTERO

1. La zona de mezcla en cuerpos de agua marino costeros 86
   1.1. Vertimiento de aguas residuales tratadas de menor densidad que las aguas naturales marinas 86
      Vertimiento en la superficie del cuerpo de agua marino 87
      Vertimiento a través de un emisor submarino 87

1.2. Vertimiento de aguas residuales tratadas de igual densidad que las aguas naturales marinas 89
1.3. Vertimiento de aguas residuales tratadas de mayor densidad que las aguas naturales marinas 92
Vertimiento en la superficie del cuerpo de agua marino costero 92
Vertimiento a través de emisor submarino 93
1.4. Emisores con difusores de orificios múltiples 94
1.5. Extensión máxima de la zona de mezcla 95
2. Información requerida para la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo de agua marino costero 97
2.1. Corrientes marinas 97
2.2. Densidad del agua natural marina 98
2.3. Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 101
3. Evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua 102
3.1 Determinación de la dilución inicial requerida (S_{max}) 103
Determinación de la dilución inicial requerida para el vertimiento de salmueras 104
3.2. Determinación de la dilución inicial mínima (S_a) 105
Modelos numéricos para la determinación de la extensión de la zona de mezcla y de la dilución inicial 105
Metodologías simplificadas para la determinación de la dilución inicial 107
4. Emisores con difusores de orificios múltiples 108
5. Determinación de la extensión de la zona de mezcla 109
6. Evaluación del impacto de vertimientos con carga de patógenos 110
6.1. Determinación del tiempo de transporte 110
6.2. Determinación del tiempo de residencia mínimamente requerido 113
6.3. Determinación de la tasa de desaparición de coliformes termotolerantes 113
6.4. Determinación de la densidad de coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible 116
7. Criterios para el control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 116
8. Evaluación de vertimientos en curso y en fase de adecuación a los ECA-Agua 120

V. ANEXOS

1. Glosario de términos 124
2. Bibliografía 131

VI. EJEMPLOS DE APLICACIÓN PRÁCTICA

1. Vertimiento de aguas residuales domésticas tratadas a una quebrada 141

1 Descripción del proyecto 141
2 Características del agua residual tratada 141
2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 141
2.2 Determinación de las concentraciones máximas 142
2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas 142
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 143
3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor 143
4 Determinación de la zona de mezcla 145
4.1 Restricciones de la zona de mezcla 145
5 Determinación del caudal disponible para la dilución 145
6 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 146
7 Balance de masa 147
8 Evaluación de la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla 149
9 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural 152
10 Conclusiones 153

2. Vertimiento de aguas residuales municipales urbanas tratadas a un río 155

1 Descripción del proyecto 155
2 Características del agua residual tratada 155

2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 155
2.2 Determinación de las concentraciones máximas 155
2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas 158
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 160
3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor 161
4 Determinación de la zona de mezcla 161
4.1 Restricciones de la zona de mezcla 161
5 Determinación del caudal disponible para la dilución 162
5.1 Reducción del caudal debido a la restricción de la zona de mezcla 162
6 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 163
7 Balance de masa 165
8 Evaluación de la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla 170
9 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas 173
10 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural 174
11 Conclusiones 176

3. Vertimiento de aguas residuales municipales tratadas a una laguna 178

1 Descripción del proyecto 178
2 Características del agua residual tratada 179
2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 179
2.2 Determinación de las concentraciones máximas 180
2.3 Determinación del caudal medio y máximo de aguas residuales tratadas vertidas 182
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 184
3 Características del cuerpo receptor 184
3.1 Morfometría y batimetría 185
3.2 Corrientes 187

3.3 Estratificación térmica y perfil vertical de la densidad del agua 187
3.4 Índice de intercambio del agua 189
3.5 Calidad del agua en el cuerpo natural 189
3.6 Usos del agua en el cuerpo receptor 191
4 Evaluación del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental a largo plazo 191
4.1 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas 193
5 Evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla 193
5.1 Evaluación de la dilución requerida 195
5.2 La evaluación de la dilución inicial mínima – S_a 196
6 Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla 197
7 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 200
8 Conclusiones 201

4. Vertimiento de aguas residuales municipales al mar 204

1 Descripción del proyecto 204
2 Características del agua residual tratada 204
2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 204
2.2 Determinación de las concentraciones máximas 206
2.3 Determinación del caudal máximo de las aguas residuales tratadas vertidas 207
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 209
3 Características del cuerpo receptor 209
3.1 Batimetría 209
3.2 Densidad del agua natural marina 209
3.3 Corrientes marinas 209
3.4 Calidad del cuerpo natural de agua 213
3.5 Zonas sensibles a la contaminación microbiológica 215

4 Evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla 216
4.1 Determinación de la dilución inicial requerida (S_{max}) 216
4.2 Determinación de la dilución inicial mínima (S_a) 217
4.3 Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla 219
5 Evaluación del impacto de la carga microbiológica 221
5.1 Tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de zona sensible 221
5.2 Tiempo de residencia mínimamente requerida 224
5.3 Evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua de los coliformes termotolerantes en el límite de las zonas sensibles 228
5.4 Puntos de control de la calidad microbiológica del cuerpo receptor 228
6 Criterios para el control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 229
7 Conclusiones 231

5. Vertimiento de aguas residuales de origen minero metalúrgico a una quebrada 233
1 Descripción del proyecto 233
2 Características del cuerpo receptor 235
2.1 Meteorología 235
2.2 Hidrología 236
2.3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor 239
2.4 Calidad del agua superficial 240
3 Características del agua residual tratada 242
3.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 242
3.2 Determinación de las concentraciones máximas 243
3.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas 245
3.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 247
4 Determinación de la zona de mezcla 247
4.1 Restricciones de la zona de mezcla 248

5 Determinación del caudal disponible para la dilución 248
6 Balance de masa 249
7 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas 255
8 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural 259
9 Conclusiones 261

6. Vertimiento de aguas residuales de origen minero-metalúrgico a una laguna 264

1 Descripción del proyecto 264
2 Características del cuerpo receptor 266
2.1 Meteorología 266
2.2 Morfometría y batimetría 267
2.3 Corrientes 269
2.4 Estratificación térmica y perfil vertical de la densidad del agua 269
2.5 Índice de intercambio de agua de la laguna 271
2.6 Calidad del agua en el cuerpo natural 272
2.7 Usos del agua en el cuerpo receptor 274
3 Características del agua residual tratada 274
3.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 274
3.2 Determinación de las concentraciones máximas 274
3.3 Determinación del caudal máximo y medio de aguas residuales tratadas vertidas 276
3.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 280
4 Evaluación del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental a largo plazo 280
4.1 Balance de masa 280
4.2 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas 281
5 Evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla 286
5.1 Evaluación de la dilución requerida 286

5.2 Evaluación de la dilución inicial mínima – S_a 287
6 Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla 289
7 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 291
8 Conclusiones 293

7. Vertimiento de aguas residuales de una curtiembre a una quebrada 296

1 Descripción del proyecto 296
2 Características del agua residual tratada 298
2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 298
2.2 Determinación de las concentraciones máximas 298
2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas 299
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 300
3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor 300
4 Determinación de la zona de mezcla 301
4.1 Restricciones de la zona de mezcla 302
5 Determinación del caudal disponible para la dilución 302
6 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 302
7 Balance de masa 303
8 Evaluación de la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla 305
9 Propuesta del programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural 308
10 Conclusiones 309

8. Vertimiento de aguas residuales de una industria láctea a una quebrada 311

1 Descripción del proyecto 311
2 Características del agua residual tratada 312
2.1 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas 312

2.2 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse 313
2.3 Determinación de las concentraciones máximas 313
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 316
3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor 316
4 Determinación de la zona de mezcla 317
4.1 Restricciones de la zona de mezcla 317
5 Determinación del caudal disponible para la dilución 317
6 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua 318
7 Balance de masa 319
7.1 Balance de masa de nitrato 321
8 Evaluación de la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla 323
9 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas 325
10 Conclusiones 329

9. Vertimiento de aguas residuales de una industria pesquera al mar 331

1 Descripción del proyecto 331
2 Características del agua residual tratada 335
2.1 Caudal máximo de las aguas residuales tratadas vertidas 335
2.2 Lista de parámetros por evaluarse 335
2.3 Concentraciones máximas en las aguas residuales tratadas 335
2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente 337
2.5 Densidad del agua residual tratada 337
3. Características del cuerpo receptor 337
3.1 Batimetría 337
3.2 Corrientes marinas 338
3.3 Densidad del agua natural marina 341

3.4 Calidad del cuerpo natural de agua 341
4 Determinación de la dilución inicial requerida (S_{max}) 344
5 Evaluación de los emisores submarinos actuales 345
5.1 Evaluación de la descarga de las aguas de refrigeración 345
5.2 Evaluación del vertimiento de aguas residuales industriales 348
6 Análisis de alternativas 352
6.1 Reducción de la carga contaminante del efluente 352
6.2 Modificación del emisor submarino 355
7 Criterios para el control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua 360
8 Conclusiones 362





INTRODUCCIÓN

En la zona de mezcla ocurre la dilución del efluente por procesos hidrodinámicos. La zona de mezcla es un volumen en el cuerpo natural del agua de exclusión del cumplimiento de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua).

La Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua describe la metodología de cálculo para determinar la extensión de la zona de mezcla, y las concentraciones de los diferentes parámetros que un vertimiento aporta a un cuerpo natural de agua después de la mezcla, diferenciando los principales tipos de cuerpos receptores: cuerpos de agua lóticos (parte II), lénticos (parte III) y marino costeros (parte IV).

En la parte I se propone la metodología para determinar las características del agua residual tratada; la parte V contiene la definición de los términos técnicos usados en este documento e indica las referencias bibliográficas, y la parte VI presenta una serie de ejemplos de aplicación práctica de los criterios y las metodologías propuestas en el documento.

La finalidad de la evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo natural de agua es comprobar que la carga del vertimiento no supere la carga máxima admisible del cuerpo receptor. La carga contaminante admisible es determinada tomando como referencia los ECA-Agua, que deben ser cumplidos fuera de la zona de mezcla.



OBJETIVO

La *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*, es un documento orientador para ser considerado en la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo receptor, tomando como referencia los ECA-Agua, e incluye la propuesta metodológica para la determinación de la zona de mezcla.

Este documento contribuirá con el proceso de adecuación a lo establecido en el artículo 7 del Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, en relación con la verificación de los Estándares de Calidad Ambiental fuera de la zona de mezcla, particularmente con el numeral 7,2: "La metodología y aspectos técnicos para la determinación de las zonas de mezcla serán establecidos por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente y la autoridad competente".



ALCANCE

Esta Guía es una herramienta importante para los administrados, consultores y la administración pública, dado que propone criterios y metodologías claras para la determinación de la zona de mezcla en un cuerpo receptor natural de agua, así como para la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua aguas abajo de un vertimiento.

En ese contexto, será de gran utilidad para los profesionales de la Autoridad Nacional del Agua, en vista de que incluye criterios que han de ser considerados en la evaluación de los instrumentos de gestión ambiental y de las solicitudes de autorización del vertimiento de aguas residuales tratadas.

Adicionalmente, se constituye en una herramienta de soporte para los administrados, dado que propone metodologías que permiten evaluar el impacto de vertimientos de aguas residuales tratadas en la calidad del cuerpo receptor. Sin embargo, no excluye el uso de otras metodologías debidamente sustentadas para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo receptor. Por consiguiente, su aplicación permitirá agilizar la evaluación por parte de la Autoridad Nacional del Agua, por lo que se recomienda la aplicación de las metodologías propuestas.

Este documento, como guía técnico-metodológica, no tiene un periodo de aplicación específico, por lo que puede ser usado como insumo para los Instrumentos de Gestión Ambiental de actividades nuevas, o también en la adecuación de los Planes de Manejo Ambiental de actividades en curso, los cuales en la actualidad experimentan problemas de cumplimiento de los ECA-Agua, dado que permiten determinar la carga máxima del vertimiento para el cumplimiento de los ECA-Agua, criterio fundamental para el diseño de las medidas correctivas en los sistemas de gestión y tratamiento de aguas residuales.

En tal sentido, actividades que cuentan con un Instrumento de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad competente no requieren adecuarse a lo recomendado en la presente Guía.

I.

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

1. INTRODUCCIÓN

Para la evaluación del efecto del vertimiento de aguas residuales tratadas en un cuerpo natural de agua continental o marino, es necesario contar con una proyección de las características del efluente, considerando el tipo de efluentes (aguas residuales tratadas domésticas, municipales o industriales), que van a ser efectivamente descargados al cuerpo receptor.

En los siguientes acápites se describe cómo se determina la lista de parámetros a evaluarse, la concentración máxima de los parámetros en las aguas residuales tratadas vertidas, el caudal del vertimiento y la carga máxima del vertimiento.

2. DETERMINACIÓN DE LA LISTA DE PARÁMETROS POR EVALUARSE

La caracterización del efluente comprende, por lo menos, los parámetros recomendados para las diferentes actividades generadoras de aguas residuales y las categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural contenidos en la tabla 2, esto es, los parámetros para los cuales el sector correspondiente haya definido un límite máximo permisible (tabla 1) y, adicionalmente, sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, que están indicados en los ECA-Agua, según la categoría correspondiente.[1]

En el caso de aguas residuales tratadas municipales, se deberá considerar también las características de las aguas residuales industriales vertidas al sistema de alcantarillado.

1 Se considera que las autoridades ambientales sectoriales o la Autoridad Nacional del Agua podrán solicitar la evaluación y el control de parámetros adicionales, siempre y cuando estos correspondan a sustancias utilizadas o generadas en los procesos productivos o industriales, reglamentadas en los ECA-Agua de la categoría correspondiente al cuerpo receptor.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales tratadas a cuerpos naturales de agua

NORMA	ACTIVIDAD	PARÁMETROS REGULADOS
D.S. Nº 003-2002-PRODUCE	Cemento	pH, TºC, SST
	Cerveza	pH, TºC, SST, AyG, DBO_5, DQO
	Papel	pH, TºC, SST, AyG, DBO_5, DQO
	Curtiembre	pH, TºC, SST, AyG, DBO_5, DQO, sulfuro, Cr^{+6}, Cr, C. term., $N\text{-}NH_4$
D.S. Nº 037-2008-PCM	Hidrocarburos	HTP, Cloruros, CR^{+6}, Cr, Hg, Cd, As, fenoles, sulfuros, DBO_5, DQO, cloro residual, $N\text{-}NH_4$, C. term., C. total, fosforo, Ba, pH, AyG, Pb, TºC
D.S. Nº 010-2010-MINAM	Minero metalúrgica	pH, SST, AyG, CN total, As, Cd, Cr^{+6}, Cu, Fe(disuelto), Pb, Hg, Zn
D.S. Nº 010-2008-PRODUCE	Pesquería[2]	pH, SST, AyG, DBO_5 [3]
D.S. Nº 003-2010-MINAM	Doméstica o municipal	pH, TºC, AyG, C.term, DBO_5, DQO, SST

Leyenda: (As) arsénico, (AyG) aceites y grasas, (Ba) bario, (Cd) cadmio, (CN total) cianuro total, (Cr) cromo, (Cr^{+6}) cromo hexavalente, (C. term.) coliformes termotolerantes, (C. total.) coliformes totales, (Cu) cobre, (DBO_5) demanda bioquímica de oxígeno, (DQO) demanda química de oxígeno, (Fe) hierro, (Hg) mercurio, (HTP) hidrocarburos totales. de petróleo, ($N\text{-}NH_4$) nitrógeno en nitrógeno amoniacal, (Pb) plomo, (pH) logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno, (SST) sólidos suspendidos totales, (TºC) temperatura, (Zn) zinc.

Tabla 2. Parámetros considerados en los ECA-Agua asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o actividad

ACTIVIDAD GENERADORA	CATEGORÍA 1	CATEGORÍA 2	CATEGORÍA 3	CATEGORÍA 4 (RÍOS, LAGUNAS Y LAGOS)	CATEGORÍA 4 (ECOSISTEMAS MARINO COSTEROS)
Doméstica[4] y municipal	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, DQO, P(L) Adicionalmente para aguas residuales cloradas, se medirá Trihalometanos; salvo se sustente su exclusión en el instrumento de gestión ambiental.	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, SST	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, DQO	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, SST, P(L), N_{total} (L)	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, SST
	En caso de presentarse otros parámetros que no se indiquen en el D.S. N.° 003-2010-MINAM y no se mencionen arriba, se podría optar por incorporar dichos parámetros como control de la calidad del agua de un cuerpo receptor, con el fin de lograr la preservación y conservación ambiental.				

2 Cabe precisar que el D.S. N° 010-2008-PRODUCE, Límites Máximos Permisibles (LMP) para la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Normas Complementarias, regula los efluentes de la industria de harina y aceite de pescado que son vertidos al mar solamente, no siendo aplicable a efluentes de otras actividades pesqueras, como por ejemplo la actividad acuícola, o efluentes vertidos a cuerpos de agua continentales.

3 El LMP para la DBO_5 de las actividades pesqueras de consumo humano indirecto fue establecido para vertimientos dentro de la Zona de Protección Ambiental Litoral (ZPAL) únicamente.

4 Incluye las aguas residuales domésticas generadas en actividades comerciales y productivas (ver definición de "aguas residuales domésticas" del glosario).

ACTIVIDAD GENERADORA	CATEGORÍA 1	CATEGORÍA 2	CATEGORÍA 3	CATEGORÍA 4 (RÍOS, LAGUNAS Y LAGOS)	CATEGORÍA 4 (ECOSISTEMAS MARINO COSTEROS)
Minera y metalúrgica	pH, A y G, CN_{total}, As, Cd, Cu, Pb, Hg, Zn	pH, A y G, SST, CN_{WAD}, As, Cd, Cr^{+6}, Cu, Pb, Hg, Zn	pH, A y G, CN_{WAD}, As, Cd, Cr, Cu	pH, A y G, SST, C $N_{total,}$ As, Cd, Cr^{+6}, Cu, Pb, Hg	pH, A y G, SST, $CN_{total,}$ As, Cd, Cr^{+6}, Cu, Pb, Hg
Extracción y procesamiento de hidrocarburos	pH, T, A y G, HTP, cloruros, NH, P, As, Cd, Ba, Cr, Hg, Pb, fenoles(R), Benzo(a) pireno(R)	pH, T, A y G, HTP-FA, As, Cd, Cr^{+6}, Hg, P, Cr^{+6}, S(R)	pH, T, A y G, cloruros, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, fenoles(R)	pH, T, A y G, HTP, $N\text{-}NH_4$, P, As, Ba, Cd, Cr^{+6}, Hg, Pb, fenoles (R), S(R), Benzo(a)pireno(R)	pH, T, A y G, HTP, $N\text{-}NH_4$, P, As, Ba, Cd, Cr^{+6}, Hg, Pb, fenoles (R), S(R), Benzo(a) pireno(R)
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	pH, T, A y G	pH, T, A y G, SST	pH, T, A y G	pH, T, AyG, SST	pH, T, AyG, SST
Procesamiento industrial pesquero	pH, A y G, DBO_5, P(L)	pH, A y G, SST, DBO_5	pH, A y G, DBO_5	H, A y G, SST, DBO5, P(L), N_{total}(L)	pH, A y G, SST
	Adicionalmente: En las estaciones cercanas a los finales de los emisores submarinos: coliformes totales y fecales. En los sedimentos: macrobentos, materia orgánica y granulometría.				
Procesamiento de productos agrícolas y pecuarios	pH, A y G, DBO_5, P(L)	pH, A y G, SST, DBOV	pH, A y G, DBO_5	pH, A y G, SST, DBO_5, P(L), N_{total}(L)	pH, AyG, SST
Producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ DQO, P (L)	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST	pH, T, AyG, $DBO_{5,}$ DQO	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST P(L), N_{total} (L)	pH, T, AyG, $DBO_{5,}$ SST
Ganadería intensiva e instalaciones de sacrificio	pH, T, A y G, C. term., $DBO_{5,}$ DQO, P(L)	pH, T, A y G, C. term., $DBO_{5,}$ SST	pH, T, A y G, C. term., $DBO_{5,}$ DQO	pH, T, A y G, C. term., $DBO_{5,}$ SST, P (L), N_{total}(L),	pH, T, A y G, C. term., DBO_5, SST
Producción de celulosa y papel	pH, A y G, $DBO_{5,}$ DQO, P(L)	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST	pH, T, AyG, $DBO_{5,}$ DQO	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST, P(L), N_{total} (L)	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST
Curtiembre	pH, A y G, $DBO_{5,}$ DQO, P (L), N-NH, Cr	pH, T, SST, A y G, $DBO_{5,}$ S, Cr^{+6}	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ DQO, Cr^{+6}	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST, P(L), N-NH, S, Cr^{+6}	pH, T, A y G, $DBO_{5,}$ SST, N-NH, S, Cr^{+6}
Cementera	pH, T	pH, T, SST	pH, T	pH, T, SST	pH, T, SST
Otras actividades no indicadas en lo anterior	Los parámetros considerados en los ECA-Agua en la categoría perteneciente e indicados para la actividad industrial correspondiente en las "Guías sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad" (www.ifc.org/ehsguidelines) publicadas por la Corporación Financiera Internacional (IFC) del Grupo del Banco Mundial; u otros documentos referenciales publicados por instituciones de derecho internacional público.				

Leyenda: (As) arsénico, (AyG) aceites y grasas, (Ba) bario, (DBO_5) demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, (DQO) demanda química de oxígeno, (Ca) calcio, (Cd) cadmio, (CN_{Libre}) cianuro libre, (CN_{WAD}) cianuro WAD, (Cond) conductividad eléctrica, (Cr) cromo total, (Cr^{+6}) cromo hexavalente, (C.term.) coliformes termotolerantes, (Cu) cobre, (Hg) mercurio, (H_2S) sulfuro de hidrógeno que según la APHA se calcula con $H_2S = S/(10^{\wedge(pH-7,3)}+1)$, (HTP) hidrocarburos totales de petróleo, (HTP-FA) hidrocarburos totales de petróleo – fracción aromática, (L) parámetro requerido solamente en caso de que el cuerpo receptor sea un cuerpo de agua léntico o tributa a un cuerpo de agua léntico, ($N\text{-}NH_4$) nitrógeno en nitrógeno amoniacal, ($N\text{-}NO_3$) nitrógeno en nitratos, (N_{total}) nitrógeno total, (P) fósforo total, (Pb) plomo, ($P\text{-}PO_4$) fosfatos como fósforo, (R) parámetro requerido solamente en caso de refinerías FCC, (S) sulfuros, (SDT) sólidos disueltos totales, (SST) sólidos suspendidos totales, (T) temperatura en grados Celsius, (Zn) zinc.

* Los parámetros que caracterizan al efluente han sido actualizados y establecidos en función del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, aprobado mediante R.J. N° 010-2016-ANA.

3. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS

Para determinar la carga máxima del vertimiento, es necesario estimar las concentraciones de los parámetros a evaluarse en las condiciones más críticas.

En el caso de la evaluación de vertimientos proyectados de actividades futuras, la pregunta que es de mayor interés para los administrados es si los LMP son suficientes para el cumplimiento de los ECA-Agua, dado que constituyen el criterio de diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, en este caso se aplican las concentraciones indicadas en los LMP para determinar la carga del vertimiento. Sin embargo, para parámetros no considerados en los LMP pero de relevancia para el cumplimiento de los ECA-Agua, se determinan las concentraciones mediante la toma de muestra y el análisis de aguas residuales tratadas generadas en actividades similares, considerando la eficiencia de reducción de los sistemas de tratamiento proyectados o, en su defecto, se usan valores referenciales indicados en la literatura especializada. Cuando no es posible estimar la concentración máxima de un vertimiento proyectado, como por ejemplo para los metales contenidos en las aguas residuales mineros y parámetros no considerados en los LMP, se podrá aplicar el balance de masas descrito en los acápites siguientes para determinar la concentración máxima en el efluente que permitirá cumplir con los ECA-Agua.

Cuando se trata de un vertimiento en curso (como es el caso de los Planes de Adecuación y Manejo Ambiental y otros instrumentos de adecuación a la normatividad ambiental), se toman una o más muestras de aguas residuales tratadas en el horario de mayor carga contaminante de acuerdo al protocolo establecido por el sector competente, y el análisis en laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). La probable concentración máxima se determina considerando la eficiencia de reducción de los sistemas de tratamiento proyectados.

4. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor se considera la condición más crítica, por lo que se estima el caudal máximo horario de descarga a partir de los procesos productivos o actividades que intervienen en la generación de las aguas residuales, así como el régimen de descarga cuando estas sean previamente almacenadas, o el caudal máximo simultáneo de bombeo cuando la descarga considere la impulsión de las mismas.

En caso de que el caudal del vertimiento proyectado tenga una variabilidad mensual significativa (cuando el vertimiento está influenciado por aguas de precipitación como en las actividades de explotación minera o en sistemas de alcantarillado mixto o cuando se trate de una actividad productiva estacional), se estima el caudal máximo del vertimiento en cada mes, determinando la variabilidad del caudal con modelos de escorrentía superficial o con un balance de agua de los diferentes ciclos de producción, según corresponda.

Para la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo de agua léntico, también se deberá determinar o estimar el caudal medio anual del vertimiento.

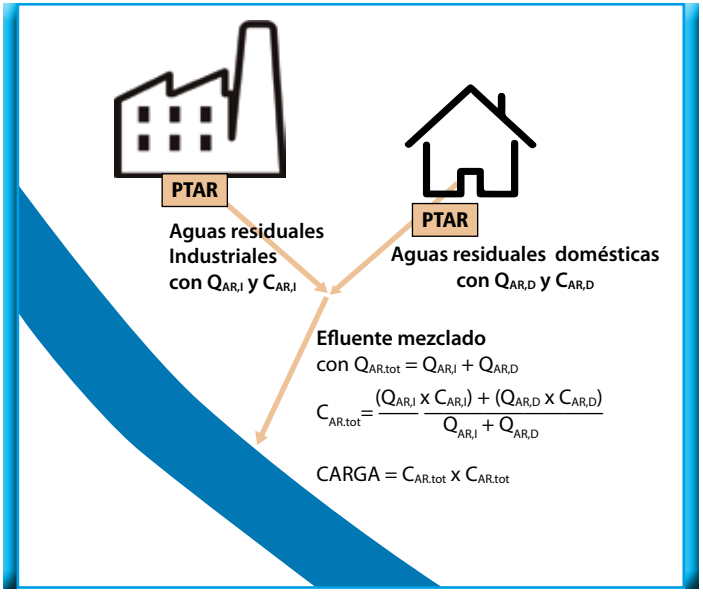
5. MEZCLA DE AGUAS RESIDUALES DE DIFERENTES FUENTES

Cuando se vierta más de un tipo de efluente a través del dispositivo de descarga, se caracterizará la carga total del efluente mezclado para la posterior evaluación del impacto total del vertimiento en el cuerpo natural de agua. Para tal propósito, se aplica el balance de masas tal como se representa en el siguiente gráfico.

Asimismo, en el caso de que los diferentes procesos productivos de la actividad generen un efluente de alta variabilidad de la carga contaminante, se debería determinar el caudal y las concentraciones de las aguas residuales generadas en cada uno de los procesos productivos, luego calcular la carga contaminante después de la mezcla aplicando la ecuación representada en el gráfico 1, y finalmente identificar la carga contaminante máxima.

La concentración y el caudal a aplicarse en la evaluación del impacto del vertimiento corresponden a la carga contaminante máxima identificada.

Gráfico 1. Determinación de la carga de un efluente generado de la mezcla de dos tipos de aguas residuales tratadas.



6. PROHIBICIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Se deberá prever los sistemas de tratamiento que permitan la eliminación de los residuos sólidos contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua[5]. El efluente deberá estar libre de materia flotante persistente que pueda impactar los ecosistemas acuáticos, depositarse en las orillas del cuerpo receptor o causar daños a la calidad estética del agua, afectando las actividades recreativas. Igualmente, el efluente no podrá sobrepasar los LMP definidos por el sector en relación al material sedimentable que podría depositarse sobre el fondo del cuerpo de agua y afectar los ecosistemas bentónicos o, en su defecto, reducirlo antes de la descarga de las aguas residuales tratadas.

5 Véase Ley Nº 29338, Ley de Recursos Hídricos, artículo 120, Infracción en materia de agua: "Constituyen infracciones las siguientes: 10. arrojar residuos sólidos en cauces o cuerpos de agua naturales o artificiales".



II.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN UN CUERPO NATURAL DE AGUA LÓTICO (RÍOS Y QUEBRADAS)

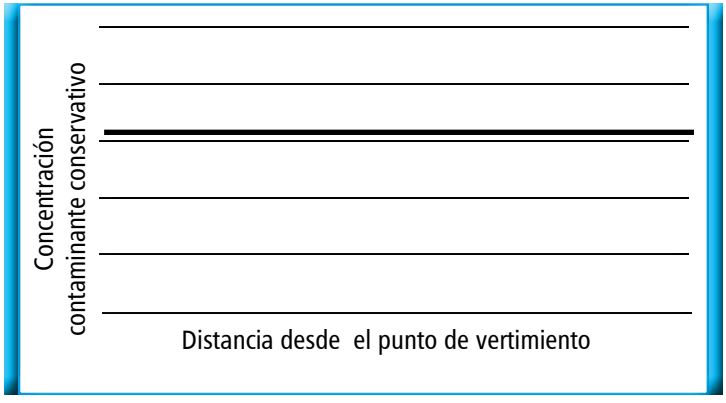
1. COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN UN CUERPO DE AGUA LÓTICO

El comportamiento de la concentración de un residuo en solución líquida que llega a un cuerpo natural de agua lotico, es decir, un cuerpo de agua fluvial como un río o una quebrada, está caracterizado por dos procesos fundamentalmente diferentes:

1. Inmediatamente luego del vertimiento se inicia la mezcla con el agua natural. El proceso de mezcla es un proceso físico de dispersión, y su velocidad depende de las condiciones hidrodinámicas del cuerpo receptor.
2. El segundo proceso que caracteriza el comportamiento de las concentraciones en un cuerpo natural de agua es el conjunto de procesos químicos, físicos y microbiológicos que modifican la carga contaminante transportada por el río. Estos procesos, comúnmente denominados con el término autodepuración, abarcan la sedimentación, la hidrólisis, la oxidación, la reducción química, la muerte de patógenos, la nitrificación, la desnitrificación, la adsorción, la asimilación en materia biológica y otros.

En el siguiente gráfico se representa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes tipos de parámetros debido a los procesos de autodepuración luego de la mezcla con el agua natural.

Gráfico 2. Comportamiento de la concentración de un contaminante conservativo en un cuerpo de agua lótico



- *Contaminantes conservativos*

La concentración de un contaminante conservativo permanece constante si no hay afluentes naturales que disminuyan la concentración debido a la dilución adicional, o no hay otros aportes de carga contaminante que aumenten la concentración. Forman parte de este grupo la mayoría de las sales, los metales en concentraciones bajas y en condiciones de pH neutro y los contaminantes orgánicos persistentes (COP), entre otros.

- *Contaminantes no conservativos*

Los parámetros no conservativos son aquellos que no tienen un comportamiento conservativo. Forman parte de este grupo la mayoría de los compuestos orgánicos, los patógenos y los metales cuando después del vertimiento varía la disponibilidad de oxígeno disuelto o el pH.

- *Parámetros influenciados*

Los parámetros influenciados son aquellos que están afectados por los procesos biológicos en los ríos (ciclos de C, O_2, N y P), y forman parte de este grupo:

- ✓ Sólidos suspendidos volátiles.
- ✓ Carbono orgánico disuelto.
- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno – DBO.
- ✓ Oxígeno disuelto – OD.
- ✓ Nitrógeno en sus diferentes compuestos.
- ✓ Fósforo en sus diferentes compuestos.
- ✓ pH.
- ✓ Alcalinidad.
- ✓ Fitoplancton.

Gráfico 3. Comportamiento de la concentración de un contaminante no conservativo en un cuerpo de agua lótico

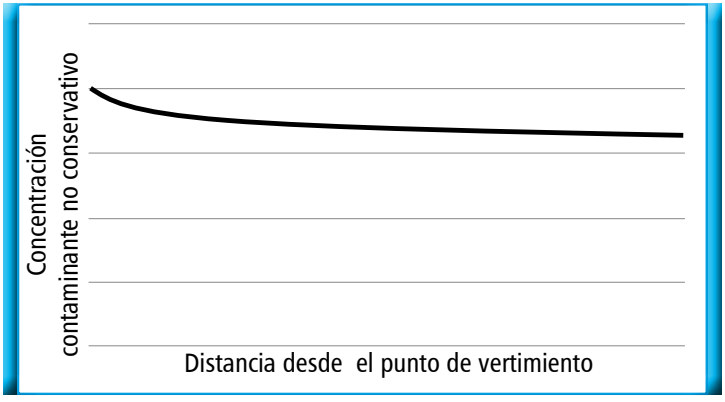
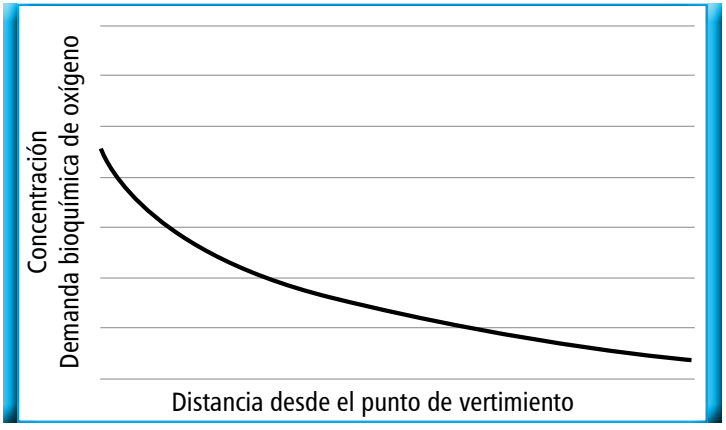
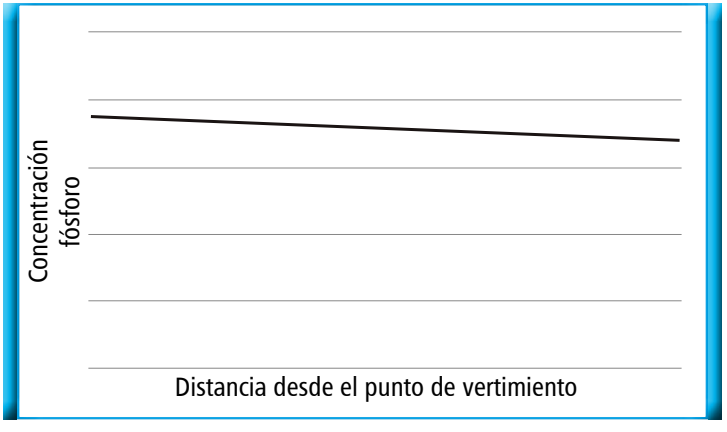


Gráfico 4. Comportamiento de la concentración de la DBO en un cuerpo de agua lótico



El *fósforo* se reduce en forma aproximadamente lineal debido a la sedimentación y a la asimilación en las algas.

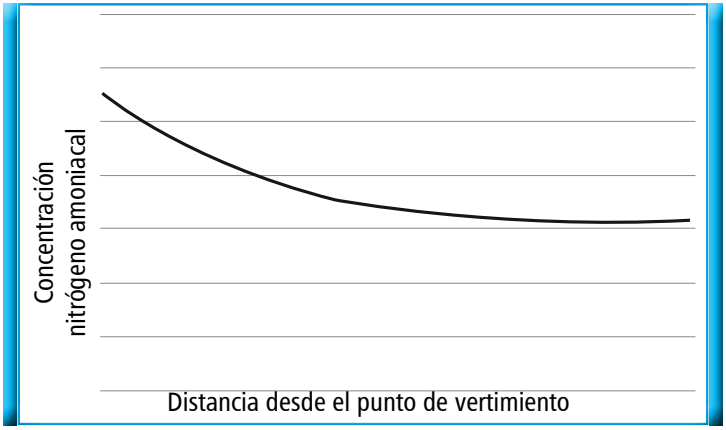
Gráfico 5. Comportamiento de la concentración de fósforo en un cuerpo de agua lótico



El *nitrógeno amoniacal* se reduce por la nitrificación, que lo transforma en nitratos.

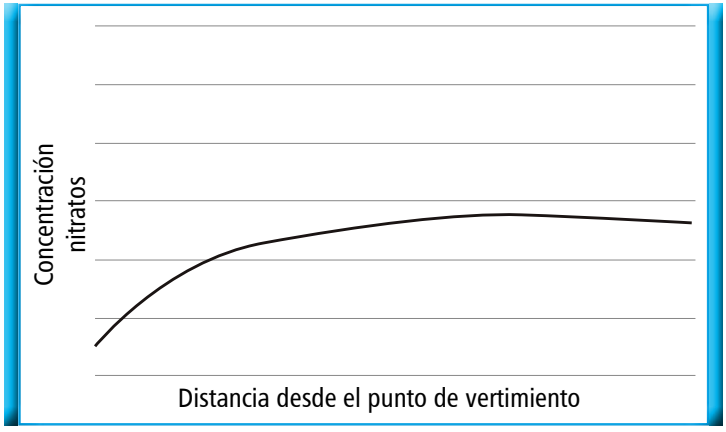
La DBO se reduce en forma exponencial debido a los procesos de oxidación microbiológica.

Gráfico 6. Comportamiento de la concentración de nitrógeno amoniacal en un cuerpo de agua lótico



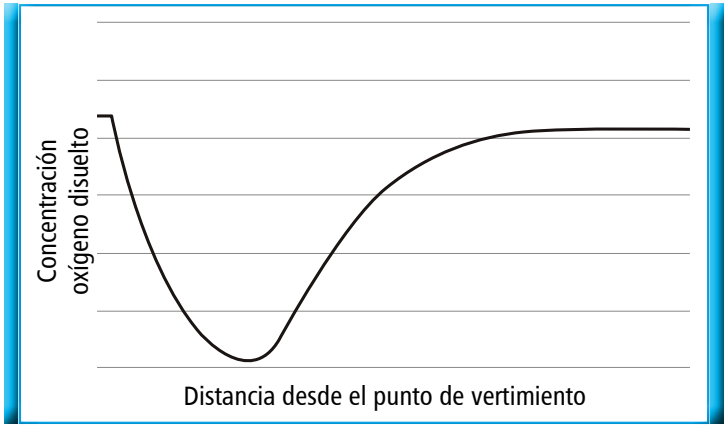
Los *nitratos* se incrementan debido a la nitrificación del nitrógeno amoniacal para luego reducirse lentamente por la desnitrificación en zonas anaeróbicas del cuerpo de agua y la asimilación en las algas.

Gráfico 7. Comportamiento de la concentración de nitratos en un cuerpo de agua lótico



El *oxígeno* disuelto se reduce debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de la materia orgánica y en la nitrificación del nitrógeno amoniacal para luego recuperarse debido a la reaeración en la superficie del cuerpo de agua y la producción de oxígeno de las algas.

Gráfico 8. Comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua lótico



En este acápite se ha demostrado que la mayoría de los parámetros tienen la máxima concentración inmediatamente aguas abajo de la zona de mezcla, y luego se reducen o permanecen constantes. El cumplimiento de los ECA-Agua de estos parámetros se evalúa con el balance de masas[6] solamente, ya que este permite calcular las concentraciones después de la mezcla con el agua natural.

Sin embargo, hay algunos parámetros que tienen la mayor (menor para O_2) concentración aguas abajo y distante de la zona de mezcla, que son los nitratos y el oxígeno disuelto. La evaluación del cumplimiento del ECA-Agua de estos parámetros debe ser realizada con metodologías más complejas, ya que su concentración depende de los procesos de autodepuración del río.

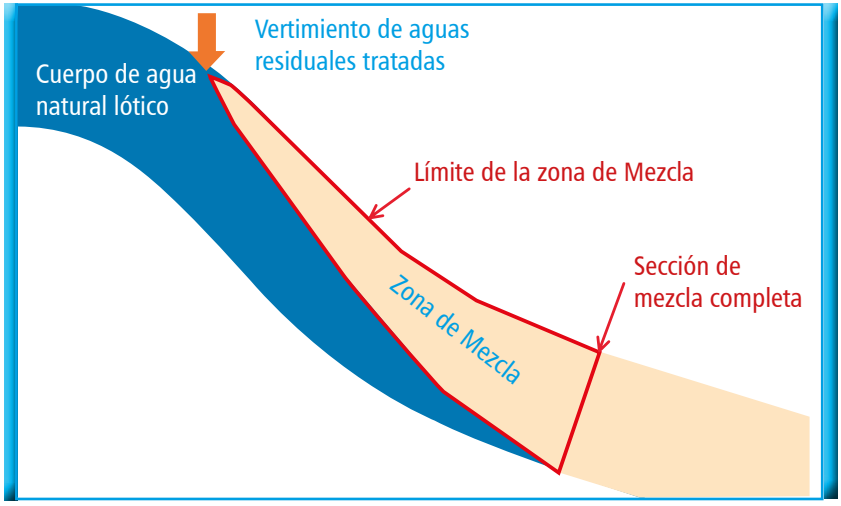
En el acápite II.5.1 se describe el balance de masas modificado, que permite determinar la concentración máxima de los nitratos fuera de la zona de mezcla. En el acápite II.6 se presenta la metodología para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto.

6 La metodología del balance de masa se describe en el acápite II.5.

2. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

La zona de mezcla es aquel volumen de agua en el cuerpo receptor en el que se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y de dispersión, sin considerar otros factores además del decaimiento bacteriano, la sedimentación, la asimilación en materia orgánica y la precipitación química. El propósito de la zona de mezcla es asignar una región limitada para la mezcla completa del efluente con el agua del cuerpo receptor, y utilizar la capacidad de dilución del cuerpo receptor. Como tal, la zona de mezcla es un volumen de agua limitado en el que se permite que las concentraciones excedan los ECA-Agua, lo que implica que no se debería usar el agua en la zona de mezcla.

Gráfico 9. Zona de mezcla en cuerpos naturales de agua lóticos



La extensión de la zona de mezcla dependerá de la ubicación del punto de vertimiento (orilla o centro, superficie o fondo), las características hidráulicas del cuerpo receptor, la turbulencia del cuerpo de agua, la velocidad de flujo, la profundidad y la morfología del cauce.

2.1. Modelo matemático para la determinación de la zona de mezcla

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento se propone el Método Simplificado desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA), que puede ser adoptado para descargas superficiales en la orilla o en el centro del cuerpo de agua lótico.

Para un vertimiento en la orilla del río/quebrada, la longitud de la zona de mezcla se calcula con:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \ u}{2 \pi D_y}$$

Para un vertimiento en el centro del río/quebrada, la longitud de la zona de mezcla se calcula con:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \ u}{8 \pi D_y}$$

Donde:

L_{ZdM} : longitud de la zona de mezcla, en metros.

W_{min} : ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento, en metros.

U : velocidad de flujo media del río en la ubicación del vertimiento, en metros por segundo.

D_y : coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, que se calcula con:

$$Dy = c \times d \times u^*$$

c : factor de irregularidad del cauce:

- c = 0,1 para ríos rectos con cauce rectangular
- c = 0,3 para ríos canalizados
- c = 0,6 para cauces naturales con serpentear moderado
- c = 1,0 para cauces naturales con serpentear significante
- c > 1,0 para ríos con cambios de dirección bruscos de 90° o mayores

d : profundidad media del río aguas abajo del vertimiento, en metros.

u* : velocidad de corte en metros por segundo, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \times d \times s)}$$

g : aceleración por gravedad = 9,80665 m/s^2

s : pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento (m/m) determinada con base en el mapa topográfico, la medición con GPS o el nivel topográfico de la altitud del fondo del cauce en dos puntos, el primero en la ubicación del vertimiento y el segundo aguas abajo y en una distancia de aproximadamente 500 m.

Las características hidráulicas y morfológicas por aplicarse deben corresponder al periodo de evaluación:

- En el caso de un vertimiento proyectado con un caudal constante a lo largo del año, será suficiente determinar las características del cuerpo receptor en el periodo más crítico, es decir, en el periodo de estiaje.

- En el caso de que el caudal del vertimiento proyectado tenga una variabilidad mensual significativa (cuando el vertimiento está influenciado por aguas de precipitaciones, como en actividades de explotación minera, o en sistemas de alcantarillado mixto, o cuando se trate de una actividad productiva estacional), se deberá determinar las características del cuerpo receptor en la época de estiaje y de avenida, para poder calcular la longitud de la zona de mezcla variable en el año. En este caso, la longitud de la zona de mezcla por aplicarse para establecer la ubicación de los puntos de control será el valor máximo de las dos evaluaciones realizadas.

2.2. Modelos numéricos para la determinación de la zona de mezcla

Alternativamente al modelo matemático presentado en el acápite precedente, se podrá determinar la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento mediante modelamiento hidrodinámico, con los modelos de simulación auspiciados por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), el cual los distribuye para determinar el movimiento y la concentración de parámetros en los cuerpos receptores. Entre estos modelos de simulación se cuenta con el software Environmental Fluid Dynamics Code – EFDC (U. S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration's Sea Grant Program y Tetra Tech Inc., 1996), que permite el modelamiento de los procesos de dilución en cuerpos de agua corriente en una, dos o tres dimensiones; el software de modelamiento CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System), el cual se basa en los principios, criterios y metodología establecida en el estudio *Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments,* de Norman H. Brooks y el estudio Dilution Models for Effluent Discharges, de D. J. Baumgartner, W. E. Frick y P. J. W. Roberts; y el modelo VISUAL PLUMES, USEPA (2003). En la aplicación de estos modelos numéricos se deberá simular el impacto del vertimiento en el cuerpo receptor en las condiciones más críticas (condiciones de flujo de la época de estiaje, caudal mínimo, concentraciones máximas de los contaminantes críticos en el cuerpo receptor y caudal y concentraciones máximas del vertimiento). En el caso de que el caudal del vertimiento proyectado tenga una variabilidad mensual significativa (cuando el vertimiento está influenciado por aguas de precipitaciones como en actividades de explotación minera o en sistemas de alcantarillado mixto, o cuando se trate de una actividad productiva estacional), se deberá simular el impacto del vertimiento en las diferentes estaciones hidrológicas del año, lo que permitirá calcular la longitud de la zona de

mezcla variable en el año. En este caso, la longitud de la zona de mezcla por aplicarse para establecer la ubicación de los puntos de control será el valor máximo de las evaluaciones realizadas.

Los resultados del modelo deberán comprobar que la dilución mínima de las aguas residuales tratadas con el agua natural garantiza el cumplimiento del ECA-Agua de todos los parámetros críticos del vertimiento, en el límite de la zona de mezcla. El límite de la zona de mezcla es aquel punto donde se obtiene la mezcla completa del efluente con las aguas naturales, o corresponde al límite regulatorio de la zona de mezcla establecido según lo indicado en el acápite II.2.3, debiéndose aplicar el criterio que resulta en la menor extensión de la zona de mezcla.

En el caso de que el vertimiento contenga materia orgánica biológicamente oxidable, adicionalmente al modelo hidrodinámico se deberá comprobar que dicho vertimiento no causa un incumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, aplicando la metodología indicada en el acápite II.7.

2.3. Restricciones de la zona de mezcla

Teóricamente, se podría definir la zona de mezcla en un río con aquel tramo que va desde el vertimiento hasta el punto aguas abajo, donde la concentración del contaminante en todos los puntos de la sección del río sea igual; es decir, se permite la mezcla completa. Sin embargo, considerando que la calidad del agua en la zona de mezcla no cumple con los ECA-Agua, y que el uso del recurso en esta zona para fines poblacionales, recreativos, agrícolas, ganaderos e industriales constituye un riesgo para la salud de las personas y la calidad de los productos agrícolas o industriales, es necesario restringir –es decir, limitar– la extensión máxima de la zona de mezcla, en los siguientes casos específicos:

- Si existen usos de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia menor a dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla, determinada con una de las metodologías indicadas en los acápites II.2.1 y II.2.2, la zona de mezcla se delimita a una distancia de seguridad aguas arriba del uso, que es igual a la longitud de la zona de mezcla:

$$L_{ZdM} \leq \frac{L_{uso}}{2}$$

Donde:

L_{uso}: distancia del vertimiento al punto de uso más cercano aguas abajo, como:

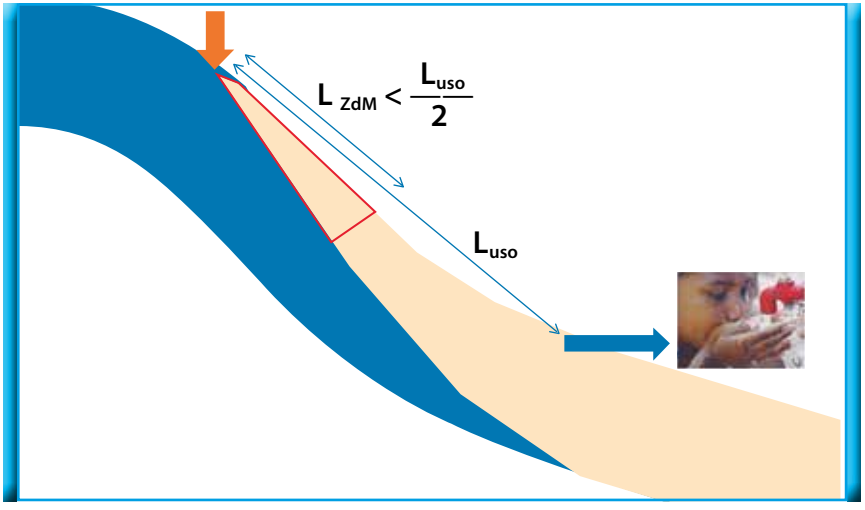
– Toma de agua para uso poblacional, agrícola, ganadero, industrial, acuícola y otros.

– Zona de uso primario (preparación de alimentos, consumo directo, aseo personal, uso en ceremonias culturales, religiosas y rituales).

– Zona de uso recreativo de contacto primario: actividades como natación, canotaje o similares.

– Zona de extracción de especies hidrobiológicas para el consumo humano directo, como extracción de camarones, pesca comercial o deportiva o similares.

Gráfico 10. Restricción de la longitud de la zona de mezcla en el caso de toma de agua o uso aguas abajo y en proximidad del vertimiento de aguas residuales tratadas



Esta restricción considera que la Autoridad Nacional del Agua, en cumplimiento de sus funciones, no podrá autorizar zonas de mezcla que puedan afectar los usos de los recursos hídricos existentes. Por lo tanto, cuando existan usos de agua aguas abajo de un vertimiento, se deberá reducir la longitud de la zona de mezcla y establecer el punto de control del cumplimiento de los ECA-Agua aguas arriba de la toma, y a una cierta distancia de seguridad (50% de la distancia entre el vertimiento y la toma de agua).

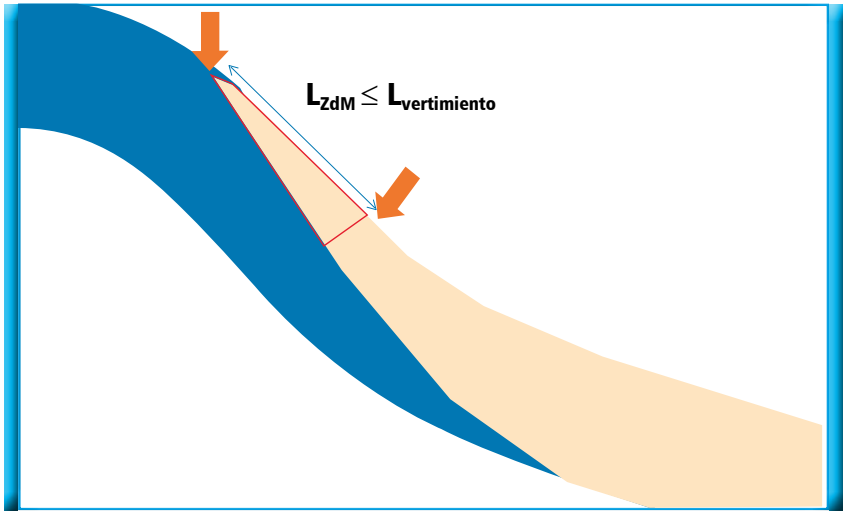
- Si existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento en una distancia menor a la longitud de la zona de mezcla determinada con una de las metodologías indicadas en los acápites II.2.1 y II.2.2, la zona de mezcla se delimita hasta antes del otro vertimiento.

$$L_{ZdM} < L_{vertimiento}$$

Donde:

$L_{vertimiento}$: distancia del vertimiento al otro vertimiento de aguas residuales aguas abajo.

Gráfico 11. Restricción de la longitud de la zona de mezcla en el caso de otro vertimiento de aguas residuales tratadas aguas abajo y en proximidad del vertimiento objeto de la evaluación



Esta restricción considera que la longitud de la zona de mezcla define también el punto de control de los ECA-Agua. En el caso de presentarse otro vertimiento de aguas residuales en la zona de mezcla, no será posible establecer la causalidad entre un posible incumplimiento de los ECA-Agua y el vertimiento de aguas residuales tratadas objeto del control, dado que el efecto del segundo vertimiento, en lo que concierne a la carga adicional o de dilución, no permitirá la cuantificación. Sin embargo, esta restricción se debería aplicar solamente si el segundo vertimiento contiene las mismas sustancias contaminantes que el vertimiento objeto de la evaluación.

- La longitud de la zona de mezcla no debería ser mayor de 500 m:

$$L_{ZdM} \leq 500 \text{ m}$$

Donde:

L_{ZdM}: longitud de la zona de mezcla, en metros.

Esta restricción considera que en ríos caudalosos y de flujo lento, la aplicación del principio de mezcla completa crea zonas de mezcla muy amplias y cuya longitud puede llegar a decenas y hasta centenares de kilómetros. Teniendo en cuenta que la zona de mezcla es una zona de exclusión del cumplimiento de los ECA-Agua, se crearían áreas acuáticas muy extensas, donde las concentraciones de los contaminantes podrían constituir un riesgo para el medio ambiente acuático. Asimismo, se debería considerar que, en el caso de zonas de mezcla muy extensas, también la distancia entre el vertimiento y el punto de control de cumplimiento del ECA-Agua es muy grande, lo que dificulta establecer la causalidad entre un posible incumplimiento de los ECA-Agua y el vertimiento de aguas residuales tratadas objeto del control, dado que los múltiples efectos de otras fuentes de contaminación, como la contaminación difusa, no permitirán la cuantificación del impacto del vertimiento.

En este sentido, esta restricción protege los intereses de los titulares de vertimientos, considerando que en un tramo de medio kilómetro es todavía posible identificar otras fuentes de contaminación. Para distancias mayores, esta evaluación en campo será muy difícil y eventuales incumplimientos de los ECA-Agua determinados en el punto de control aguas abajo serán imputados al vertimiento, sin tener conocimiento de otras fuentes de contaminación ajenas a la responsabilidad del administrado. Esta restricción no llevará necesariamente a una reducción de las cargas contaminantes que podrán ser dispuestas en el cuerpo de agua, sino a un diseño de los dispositivos de descarga que permitan una mezcla rápida y reduzcan el impacto ambiental. En el caso de vertimientos de caudales altos,[7] será necesario prever la construcción de emisores subacuáticos de salida única o de orificios múltiples, los que pueden ser diseñados con el apoyo de un *software* de simulación.

- Si existe un cuerpo de agua léntico natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento, a una distancia menor a la longitud de la zona de mezcla determinada con la metodología simplificada indicada en el acápite II.2.1, la zona de mezcla se delimita hasta antes de este cuerpo de agua léntico:

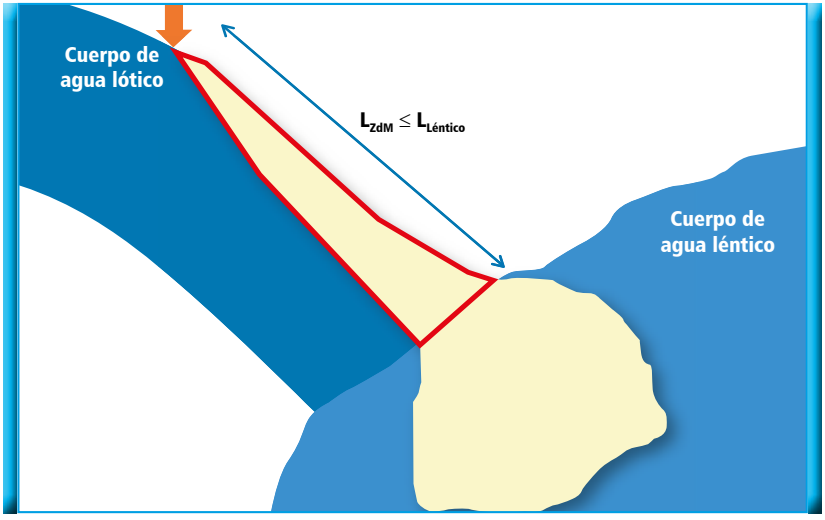
$$L_{ZdM} \leq L_{Léntico}$$

Donde:

$L_{Léntico}$:distancia del vertimiento hasta el cuerpo de agua léntico aguas abajo del vertimiento.

7 Se podrá considerar un vertimiento de caudal alto cuando la relación entre el caudal del vertimiento y el caudal disponible para dilución sea mayor que 1:20, dado que a partir de esta relación las exigencias para cumplir los ECA-Agua pueden ser más restrictivas que los LMP.

Gráfico 12. Restricción de la longitud de la zona de mezcla en el caso de cuerpo de agua léntico aguas abajo y en proximidad del vertimiento de aguas residuales tratadas



Esta restricción considera que el método simplificado de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA) no es aplicable para este caso específico. Por lo tanto, la longitud de la zona de mezcla debe ser restringida hasta antes del cuerpo de agua léntico. Sin embargo, utilizando los modelos hidrodinámicos de elementos finitos (por ejemplo, EFDC) es posible determinar la extensión de la zona de mezcla también en esta situación compleja y no se deberá aplicar la restricción indicada.

3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

Una de las variables de mayor importancia para la evaluación del impacto ambiental de un vertimiento de aguas residuales tratadas es el caudal del cuerpo receptor que está disponible para la dilución. Dado que cuerpos de agua lóticos están caracterizados por una alta variabilidad de su caudal, se podrá aplicar una metodología simplificada para determinar el caudal disponible para la dilución.

La mayor concentración aguas abajo de un vertimiento ocurrirá cuando el caudal del cuerpo receptor disponible para la dilución sea mínimo. Este menor caudal se denomina "caudal crítico".

En muchos estados de los EE. UU. se determina el caudal crítico mediante un análisis estadístico de una serie histórica de datos hidrológicos. Frecuentemente, para el análisis de impactos en la salud de parámetros no cancerígenos se ha definido el caudal crítico como el caudal mínimo medio de treinta días consecutivos para un periodo de retorno de cinco años (30Q5), que es un valor determinado con base en un análisis estadístico de una serie histórica de datos hidrológicos de diez o más años.

Dado que en muy pocos casos se dispondrá de un registro de caudales de diez o más años, será posible usar una de las siguientes metodologías simplificadas para determinar el caudal crítico:

- Cuando se dispone de una serie histórica del caudal del cuerpo receptor medido o generado mediante modelo hidrológico calibrado de por lo menos cinco años, que es representativa para el cuerpo de agua en la ubicación del vertimiento, el caudal crítico ($Q_{RH,crit}$) será el valor mínimo de los caudales mensuales medios en los últimos cinco años. Nótese que no se deberá considerar los caudales extremos debidos a la ocurrencia de fenómenos naturales, como el Fenómeno El Niño.[8]

- Cuando no se dispone de una serie histórica del caudal, se efectúa una medición del caudal del cuerpo receptor al final del mes, en el cual el promedio multianual de las precipitaciones mensuales tiene el valor mínimo (determinado con base en el récord histórico de la estación meteorológica más cercana). Este caudal medido –Q_x– se corrige según la siguiente fórmula:

$$Q_{RH,crit} = \frac{Q_x}{2}$$

Donde 2 es el factor de seguridad que considera la variabilidad multianual de los caudales en época de estiaje y la inseguridad de la información basada en una medición única.

Cuando el cuerpo receptor es parte de un sistema hidrológico regulado, QRH,crit debe ser determinado a partir de una serie histórica de caudal, dado que este no tiene necesariamente una correlación con las precipitaciones.

En el caso de que el proyecto prevea la regulación del caudal del cuerpo receptor y deba asegurar un caudal mínimo para la atención de otros usos aguas abajo, el

8 Véase el D.S. N° 004-2017-MINAM, artículo 6, Consideraciones de excepción para la aplicación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.

caudal crítico será igual al caudal mínimo establecido en el Instrumento de Gestión Ambiental.

Si el caudal del vertimiento proyectado tiene una variabilidad mensual significativa (cuando el vertimiento está influenciado por aguas de precipitaciones como en actividades de explotación minera o en sistemas de alcantarillado mixto, o cuando se trate de una actividad productiva estacional), es conveniente determinar el caudal crítico para cada mes, lo que permitirá aprovechar la mayor capacidad de dilución del cuerpo receptor en los meses de lluvia. Cuando se dispone de una serie histórica de por lo menos cinco años del caudal del cuerpo receptor medido o generado mediante modelo hidrológico calibrado, los caudales mensuales críticos corresponden a los caudales mensuales mínimos observados de toda la serie de datos. Cuando no se dispone de una serie histórica de caudales, se deberá realizar una medición del caudal en el cuerpo de agua en proximidad al futuro vertimiento en cada mes del año, y calcular los caudales mensuales críticos dividiendo los caudales medidos con el factor de seguridad de 2.

3.1 Reducción del caudal crítico en el caso de una zona de mezcla restringida

En el caso de que sea necesario restringir la extensión de la zona de mezcla según los criterios definidos en el acápite 2.3, también el caudal crítico debe ser reducido según la siguiente ecuación, dado que no se podrá aprovechar la sección de flujo total para la dilución.

Para un vertimiento en la orilla del río, el caudal crítico reducido se calcula con:

$$Q_{RH,crit,red} = Q_{RH,crit} \times \frac{\sqrt{(2 \pi D_y L_{ZdM} / u)}}{W_{min}}$$

Para un vertimiento en el centro del río, el caudal crítico de dilución reducido se calcula con:

$$Q_{RH,crit,red} = Q_{RH,crit} \times \frac{\sqrt{(8 \pi D_y L_{ZdM} / u)}}{W_{min}}$$

Donde:

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico disponible para la dilución determinado según lo indicado en el acápite II.3.

L_{ZdM} : longitud reducida de la zona de mezcla determinada según lo indicado en el acápite II.2.3, en metros.

W_{min} : ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento en temporada de estiaje, en metros.

u : velocidad de flujo media del río en la ubicación del vertimiento en temporada de estiaje, en metros por segundo.

D_y : coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento en temporada de estiaje; se calcula con la ecuación indicada en acápite 2.1.

Si se requiere determinar la capacidad de dilución del cuerpo variable en los diferentes meses del año para aprovechar la mayor capacidad de dilución del cuerpo receptor en los meses de lluvia, se deberá calcular el caudal crítico de dilución reducido para cada mes, aplicando las variables hidrodinámicas del río (velocidad de flujo, ancho y profundidad) características de cada mes.

4. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, es necesario contar con información respecto a las concentraciones que ya se encuentran en el cuerpo receptor; por lo tanto, se deberán determinar las características químico-físicas del cuerpo receptor a través de la toma de muestra de agua, y el análisis en un laboratorio cuyos parámetros estén acreditados ante INACAL.

La toma de muestra deberá ser realizada en el punto de vertimiento proyectado. En el caso de un vertimiento en curso y en fase de adecuación a la normatividad ambiental, el punto de toma de muestra deberá ser ubicado fuera de la zona de influencia del vertimiento actual. La distancia debería ser suficiente para poder excluir la influencia del vertimiento sobre la calidad del agua en el punto de control. Asimismo, la distancia no debería ser muy grande, para poder excluir que entre el punto de control y el vertimiento existan otras fuentes de contaminación, lo que perjudicaría al administrado, dado que potenciales alteraciones de la calidad del agua que originan estas fuentes podrían ser atribuidas al vertimiento. Se recomienda una distancia de entre 20 m y 50 m, quedando a potestad del administrado la propuesta de otras distancias.

En el caso de un vertimiento proyectado con un caudal constante a lo largo del año, será suficiente determinar las concentraciones presentes en el cuerpo receptor en el periodo más crítico, es decir, el de estiaje.

En el caso de que el caudal del vertimiento proyectado tenga una variabilidad mensual significativa (cuando el vertimiento esté influenciado por aguas de precipitaciones como en actividades de explotación minera o en sistemas de alcantarillado mixto, o cuando se trate de una actividad productiva estacional), se deberá determinar las concentraciones presentes en el cuerpo receptor en las varias estaciones hidrológicas del año (estiaje, transición y avenida), para poder calcular la capacidad de asimilación del cuerpo receptor variable en el año.

Se recomienda analizar los parámetros que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, que son aquellos definidos para las diferentes actividades y categorías de ECA-Agua en la tabla 2 (acápite I.2) y, adicionalmente, sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, indicados en los ECA-Agua de la categoría correspondiente.

5. BALANCE DE MASAS

Para todos los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas vertidas, se deberá determinar sus concentraciones aguas abajo de la zona de mezcla mediante el balance de masas:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Dado que C_0 para la mayoría de los parámetros, a excepción de NO_3 y O_2, es la mayor concentración luego de la zona de mezcla, la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua se reduce a:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0 : concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{ECA} : ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

C_{RH} : concentración en el cuerpo receptor, determinada según el acápite II.4.

C_{vert} : concentración máxima en las aguas residuales tratadas, determinada según el acápite I.3.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado según el acápite II.3, o el II.3.1, en el caso de una zona de mezcla restringida.

Q_{vert} : caudal máximo del vertimiento, determinado según el acápite I.4.

Para la evaluación de todos los parámetros contenidos potencialmente en el efluente, se deberá elaborar un cuadro que contenga la lista completa de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, la concentración calculada para cada contaminante en el cuerpo receptor aguas abajo de la zona de mezcla (C_0) y el ECA-Agua correspondiente.

En el caso de que el balance de masas demuestre que la concentración calculada en el cuerpo receptor será mayor que el ECA-Agua correspondiente, se habrá de realizar las debidas modificaciones al plan de manejo de aguas considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias que reduzcan el volumen y/o la carga contaminante de las aguas residuales generadas o el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad. Alternativamente, se podrá también modificar el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia en la remoción de las sustancias críticas. Cuando se trate de zonas de mezclas restringidas, se podrá evaluar el vertimiento en el centro del río, lo que permite una mezcla completa más rápida y, en consecuencia, un mayor caudal crítico disponible para la dilución.

Para determinar la carga contaminante admisible del vertimiento se puede usar la siguiente ecuación, que integra la condición para el cumplimiento de los ECA con el balance de masas:

$$(C_{vert} \times Q_{vert}) \leq Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH}) + Q_{vert} \times C_{ECA}$$

Si la carga máxima en el vertimiento supera la carga admisible del cuerpo receptor, esta deberá ser reducida hasta el nivel de la carga admisible disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos, o ambos.

Para determinar el caudal máximo admisible, manteniendo las concentraciones invariadas, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})}$$

En el caso de que no sea posible reducir el caudal del vertimiento, será necesario reducir las concentraciones de los contaminantes críticos en el agua residual. La concentración máxima del contaminante en el efluente que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

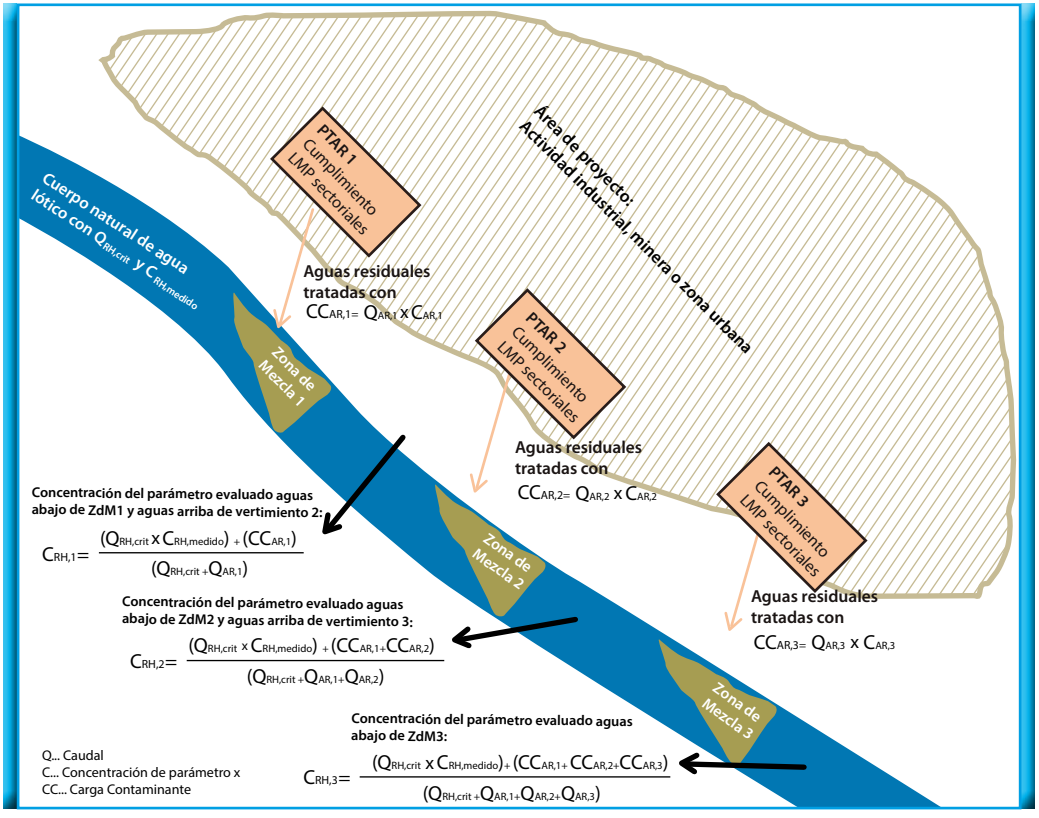
Esta ecuación es aplicable también para determinar la concentración máxima en el efluente, que permite cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor de los parámetros no reglamentados por el sector con un LMP. Esta concentración máxima podrá ser usada como un criterio de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Si el caudal del vertimiento proyectado tuviera una variabilidad mensual significativa, y se requiriera aprovechar la capacidad de asimilación variable del cuerpo receptor, se elabora un cuadro que contenga la lista de todos los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas vertidas, la concentración calculada en el cuerpo receptor aguas abajo de la zona de mezcla en cada mes ($C_{0,enero}$, $C_{0,febrero}$, $C_{0,marzo}$, $C_{0,abril}$, $C_{0,mayo}$, $C_{0,junio}$, $C_{0,julio}$, $C_{0,agosto}$, $C_{0,setiembre}$, $C_{0,octubre}$, $C_{0,noviembre}$, $C_{0,diciembre}$) y el ECA-Agua correspondiente. Cuando la variabilidad mensual se debe principalmente a la influencia de aguas de lluvia (actividades de explotación minera o en sistemas de alcantarillado mixto), los caudales mensuales del vertimiento serán determinados mediante modelo de escorrentía superficial, con las precipitaciones del mes en el cual se observaron los caudales mensuales mínimos del cuerpo receptor de toda la serie de datos.

Cuando el proyecto prevé varios *vertimientos al mismo cuerpo receptor o* a diferentes quebradas/ríos que confluyen en un mismo cuerpo receptor, se realiza la evaluación del impacto de los dos o más vertimientos de aguas residuales tratadas que se pueden generar de manera simultánea en dicho cuerpo receptor. Tal situación se reviste de importancia al considerar que, aun cuando de manera individual se determine que un vertimiento no supera la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, de manera simultánea dichos vertimientos pueden sobrepasarla, debido a la confluencia de los vertimientos, generando el incumplimiento de la normativa ambiental. En tal sentido, se evalúa el impacto de los dos o más vertimientos en un cuerpo natural de agua de forma

integral, aplicando así el principio de indivisibilidad.[9] Por lo tanto, en la determinación de las concentraciones en el cuerpo receptor se consideran las cargas aportadas por todos los vertimientos proyectados, según el siguiente balance de masas.

Gráfico 13. Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua lótico cuando el proyecto prevé más de un vertimiento de aguas residuales tratadas al mismo cuerpo receptor



9 D.S. N° 019-2009-MINAM, Reglamento de la Ley N° 27446, artículo 3, Principios del SEIA, literal a.

Donde:

$C_{RH,i}$: concentración en el cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento i.

$C_{RH,medido}$: concentración medida en el cuerpo receptor aguas arriba de los vertimientos proyectados.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico disponible para la dilución determinado según lo indicado en el acápite II.3.

$C_{CAR,i}$: carga máxima del contaminante del vertimiento i.

$C_{AR,i}$: concentración máxima del vertimiento i, determinada según lo indicado en el acápite I.3.

$Q_{AR,i}$: caudal máximo del vertimiento i, determinado según lo indicado en el acápite I.4.

Si un proyecto prevé un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo de agua que ya recibe efluentes aguas arriba, el impacto de estos se refleja en las concentraciones determinadas en la toma de muestra en el punto de vertimiento proyectado, y no es necesario considerar las cargas de estos vertimientos de forma específica.

Existen dos casos especiales en los que el balance de masa no es aplicable para la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua, aguas abajo de un vertimiento:

- Vertimiento a un cuerpo de agua lótico intermitente y transitoriamente seco.
- Vertimiento a un cuerpo natural de agua lótico en el cual el parámetro evaluado se encuentre en concentraciones que superan al ECA-Agua correspondiente.

Estos dos casos se discuten a continuación.

En el caso de *vertimientos a cuerpos de agua lóticos intermitentes* que en la época de estiaje no tienen caudal de agua natural –es decir, ríos o quebradas transitoriamente secos– no se podrá considerar caudal crítico de dilución alguno, en tanto los flujos naturales de agua que conduzca sean nulos; y la ecuación del balance de masas se reduce a lo siguiente:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})} = \frac{(C_{RH} \times 0) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(0 + Q_{vert})} = \frac{C_{vert} \times Q_{vert}}{Q_{vert}} = C_{vert} \qquad C_0 = C_{vert}$$

Y la condición para el cumplimiento de los ECA-Agua es:

$$C_{vert} \leq C_{ECA}$$

Esto significa que la calidad de las aguas residuales tratadas por verter, por lo menos en la época de estiaje, debería ser la correspondiente al ECA-Agua para la categoría que corresponda.[10]

10 Véase la R.J. Nº 224-2013-ANA, Aprobación del nuevo Reglamento para el Otorgamiento de Autorizaciones de Vertimientos y Reusos de Aguas Residuales Tratadas, artículo 6, numeral 6.4: "No se podrá autorizar vertimiento de aguas residuales tratadas a lechos de quebrada seca o cauce inactivo, salvo que esté considerado como la última alternativa de disposición final en el instrumento de gestión ambiental aprobado. En este caso las aguas residuales tratadas deberán cumplir con los ECA-Agua de la categoría que corresponda".

Considerando las dificultades del tratamiento a niveles del ECA-Agua, se recomienda evaluar otras opciones de disposición final, como el reuso de las aguas en la época de estiaje o el vertimiento de las aguas residuales a otro cuerpo receptor de mayor caudal.

En el caso de un vertimiento a un cuerpo de agua lótico en el cual *el parámetro evaluado se encuentre en concentraciones superiores al ECA-Agua correspondiente* –es decir, $C_{RH} \geq C_{ECA}$–, el balance de masas arroja el siguiente resultado. Suponiendo que la concentración en las aguas residuales tratadas sea igual o menor que la concentración en el cuerpo receptor $C_{vert} \leq C_{RH}$,[11] se obtiene:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \cdot Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})} \leq \frac{(C_{RH} \times 0_{RH,crit}) + (C_{RH} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})} = \frac{C_{RH} \times (Q_{RH,crit} + Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})} = C_{vert} \qquad C_0 = C_{RH}$$

Con lo cual se demostró que si la concentración del parámetro en el efluente es igual o menor que su concentración en el cuerpo receptor, el vertimiento no causará un incremento de la concentración en el cuerpo natural de agua y no creará un impacto adicional en el cuerpo natural de agua afectado por otras fuentes de contaminación, dado que la concentración aguas abajo del vertimiento (C_0) es igual o menor que la concentración aguas arriba (C_{RH}).

Sin embargo, en caso se pueda demostrar que un cuerpo natural de agua presenta parámetros en concentraciones superiores a los ECA-Agua debido a condiciones naturales, este cuerpo de agua podrá ser exceptuado de la aplicación de determinados ECA-Agua (artículo 6 del D.S. N° 004-2017-MINAM). Administrativamente, la exceptuación es realizada mediante la aprobación, por la ANA, del estudio técnico que sustente la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad de las aguas naturales. Asimismo, la ANA deberá comunicar al MINAM los cuerpos de agua y los parámetros de excepción.

5.1 Balance de masas de nitratos

La concentración de los nitratos se incrementa debido a la nitrificación del nitrógeno amoniacal, y llega a su valor máximo aguas abajo y distante de la zona de mezcla, para luego reducirse lentamente por la desnitrificación en zonas anaeróbicas del cuerpo de agua y la asimilación en las algas. Por lo tanto, para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua de este parámetro se aplica una metodología diferente al simple balance de masas.

Para vertimientos de aguas residuales que contienen nitrógeno a cuerpos de agua lóticos de categoría 3 que tributan a cuerpos de agua lénticos o de categoría 1, se deberá evaluar el cumplimiento del ECA-Agua del parámetro nitratos ($N\text{-}NO_3$) mediante la siguiente ecuación:

11 Véase la Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, artículo 121, Del vertimiento de aguas residuales.

$$(C(N–NH_4)_{vert} \times Q_{vert} + C(N\text{-}NH_4)_{RH} \times Q_{RH,crit} + C(N\text{-}NO_3)_{vert} \times Q_{vert} + C(N\text{-}NO_3)_{RH} \times Q_{RH,crit}) < C(N\text{-}NO_3)_{ECA} \times (Q_{vert} + Q_{RH,crit})$$

Esta inecuación considera que el nitrógeno amoniacal se transforma completamente, en la nitrificación, en nitratos; por lo tanto, evalúa si la carga de nitrógeno (suma de nitrógeno amoniacal y nitratos) aguas abajo del vertimiento es menor que la carga admisible (Caudal total x ECA para $N\text{-}NO_3$).

Dado que la concentración máxima de nitratos ocurre aguas abajo y distante de la zona de mezcla, donde se puede suponer mezcla completa, en el balance de masas de nitrógeno se aplica el caudal de dilución crítico total, no debiendo emplearse el caudal de dilución crítico reducido calculado para zonas de mezcla restringidas.

Si la evaluación anterior indica un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua de los nitratos, se deberá reducir la carga de nitrógeno del vertimiento, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias, sistemas de tratamiento avanzados o terciarios o el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad.

Para calcular la concentración máxima admisible de nitrógeno total que permitirá cumplir el ECA-Agua de nitratos, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$C_{(Ntot)vert} \leq C(N–NO_3)_{ECA} + \frac{Q_{RH,crit} \times (C(N–NO_3)_{ECA} - C(N–NH_4)_{RH} - C(N–NO_3)_{RH})}{Q_{vert}}$$

Alternativamente, se podrá evaluar el cumplimiento del ECA-Agua de los nitratos aplicando los modelos de autodepuración[12] que simulan todos los procesos del ciclo del nitrógeno, tales como la nitrificación, la desnitrificación, la sedimentación, la asimilación en las algas y la dilución por tributarios, y pueden resultar en una concentración admisible en el efluente, menos restrictiva que aquella calculada con el balance de masas descrito antes descrito.

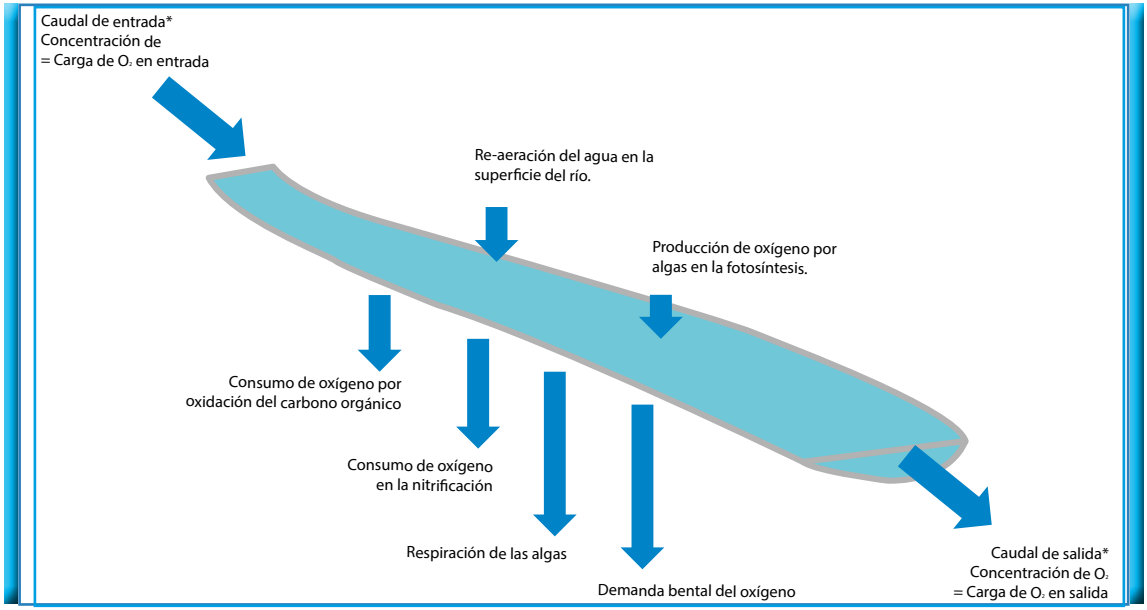
6. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE OXÍGENO DISUELTO AGUAS ABAJO DE LA ZONA DE MEZCLA

En caso de un vertimiento de aguas residuales tratadas que contengan carga orgánica, se deberá evaluar las concentraciones de oxígeno disuelto en el cuerpo natural de agua lótico. Las concentraciones del oxígeno disuelto aguas abajo de un vertimiento de aguas residuales

12 Modelo de Streeter-Phelps aplicado en el software Ríos-4, RIOS EP, QUAL2K y otros.

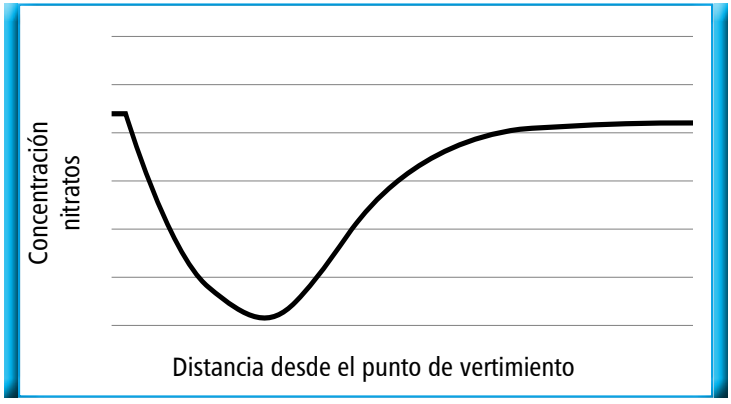
tratadas a un cuerpo de agua lótico son influenciadas por una serie de procesos biológicos y físicos. El balance completo de oxígeno en un río abarca los elementos representados en el gráfico 14.

Gráfico 14. Componentes del balance de oxígeno disuelto en un tramo de un cuerpo natural de agua lótico



Debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de la materia orgánica contenida en el efluente y la nitrificación del nitrógeno amoniacal, el oxígeno disuelto se reduce hasta una concentración mínima para luego recuperarse por la reaeración y la producción de oxígeno de las algas. Por lo general, el punto de la concentración mínima de OD está ubicado algunos kilómetros aguas abajo de la zona de mezcla.

Gráfico 15. Concentración de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua lótico aguas abajo de un vertimiento que contiene carga orgánica



Para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua que prescribe un valor mínimo admisible entre 2,5 y 6 mgO_2/L para las diferentes categorías, se aplica una metodología diferente al simple cálculo de dilución, pudiéndose usar la metodología simplificada, descrita a continuación o elaborar un modelo de autodepuración del río.[13] En ambos casos, la evaluación deberá realizarse para las condiciones más críticas, las cuales se encuentran en la época de estiaje, debido a bajos caudales disponibles para la dilución y temperaturas del agua relativamente altas.

El método simplificado corresponde a la siguiente inecuación:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

Donde:

$ECAO_2$: ECA-Agua de oxígeno disuelto en la categoría correspondiente al cuerpo receptor, en mg O_2/L.

CO_2,RH: concentración de oxígeno disuelto medida en el cuerpo receptor en el periodo evaluado (periodo de estiaje o mes evaluado).

Dc: déficit máximo de oxígeno disuelto, en mg/L, que se calcula con (HYDROSCIENCE, 1971):

13 Modelo de Streeter-Phelps aplicado en el software Ríos-4, RIOS EP, QUAL2K y otros.

L_0 : demanda de oxígeno disuelto debido al consumo de materia orgánica (mg O_2/L), que se calcula con:

$DBO_{U,vert}$: demanda bioquímica de oxígeno última del vertimiento determinada según el siguiente detalle:

Cuando la DBO_5 máxima del efluente esté reglamentada por el sector correspondiente con un Límite Máximo Permisible, la $DBO_{cu,vert}$ podrá ser estimada aplicando una relación empírica entre la DBO_5 y la DBO_{cu} indicada en la literatura, que depende de las características del efluente y del grado de tratamiento biológico:

- Para aguas residuales doméstico-municipales luego de un tratamiento primario solamente:

  $DBO_{cu,vert} = DBO_5 \times 1{,}43$

- Para aguas residuales doméstico-municipales luego de un tratamiento secundario:

  $DBO_{cu,vert} = DBO_5 \times 3{,}20$

Para los efluentes industriales[14] y/o provenientes de otro tipo de tratamiento (como el tratamiento avanzado), existen pocas referencias bibliográficas, por lo que la DBOcu,vert debería ser determinada en ensayos de laboratorio de una duración mínima de veinte días, con inhibición de la nitrificación. En el caso de vertimientos proyectados, en los que no es posible realizar ensayos de laboratorio del efluente, es posible suponer que la DBO carbonácea última corresponde al Límite Máximo Permisible o a la concentración máxima de la DQO. Esta suposición es conservadora, dado que la DQO abarca también otros compuestos oxidables que no son biodegradables.

$DBO_{U,RH}$: demanda Bioquímica de Oxígeno última del cuerpo de agua determinada en un ensayo de laboratorio de veinte días.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado en el acápite II.3.[15]

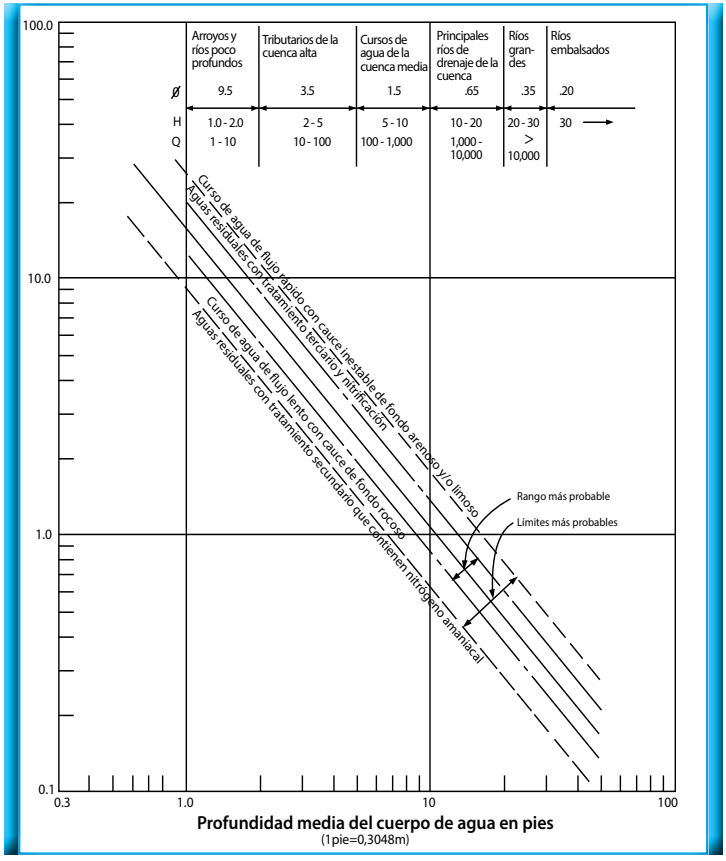
Q_{vert} : caudal máximo del vertimiento, determinado según el acápite I.4.

Φ : tasa de asimilación definida con K_a/K_d (tasa de reaeración entre tasa de desoxigenación carbonácea), que puede ser determinada en función de la profundidad media del cuerpo natural aplicando el gráfico 16.

14 Efluentes de la agroindustria, industria de papel, producción de cerveza, procesamiento de leche, etcétera.

15 Nota: en la evaluación del oxígeno disuelto se puede usar el caudal crítico total, no debiendo aplicar el caudal de dilución crítico reducido calculado para las zonas de mezcla restringidas, dado que la concentración mínima de oxígeno disuelto ocurre aguas abajo y distante de la zona de mezcla, donde se puede suponer mezcla completa.

Gráfico 16. Tasa de asimilación de oxígeno disuelto – Φ
(Salas & Martino, 1990)



Si esta evaluación indica que el vertimiento causará una concentración de oxígeno disuelto menor del ECA-Agua, se deberá reducir la carga de materia orgánica del vertimiento, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias, sistemas de tratamiento avanzados o terciarios, o el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad. También se podrá evaluar la nitrificación parcial o total del nitrógeno amoniacal contenido en las aguas residuales, lo que reduce significativamente el consumo de oxígeno en el cuerpo receptor.

7. CRITERIOS PARA EL CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA LÓTICO

En este acápite se describen los criterios generales para establecer el programa de control de los impactos del vertimiento en los cuerpos naturales de agua lótico, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial:

- La ubicación del punto de control de las cargas de las aguas residuales tratadas es seleccionada de modo que permita la caracterización del efluente vertido y la toma de muestra en condiciones seguras. De ser necesario, se preverá la instalación de un pozo entre la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales y el punto de vertido, que permita el fácil acceso y la toma de muestra de aguas residuales tratadas.

- Los puntos de control de cumplimiento de los ECA-Agua estarán ubicados en el límite de la zona de mezcla en el cuerpo receptor, considerando los siguientes criterios:

  – Un punto aguas arriba del vertimiento en una distancia que debería ser suficiente para poder excluir la influencia del vertimiento sobre la calidad del agua en el punto de control. Asimismo, la distancia no debería ser muy grande para evitar que entre el punto de control y el vertimiento existan otras fuentes de contaminación, lo que perjudicaría al administrado, dado que potenciales alteraciones de la calidad del agua que originan estas fuentes podrían ser atribuidas al vertimiento. Se recomienda una distancia de entre 20 m y 50 m, quedando a potestad del administrado y posterior aprobación por parte de la autoridad competente la propuesta de otras distancias.

  – Un punto aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla, determinado según lo indicado en el acápite II.2. La toma de muestras en este punto debería ser realizada en la proximidad de la orilla donde se realiza el vertimiento. Para el caso de un vertimiento en el centro del cauce, el punto de control también deberá estar ubicado en el centro del cauce, aproximadamente a la misma distancia de la orilla que el vertimiento.

  – Si existen tributarios al cuerpo receptor en la zona de mezcla, se deberá establecer un punto de control adicional en cada tributario antes de la confluencia con el cuerpo receptor, con el fin de poder cuantificar el efecto del tributario en materia de carga contaminante adicional o de dilución.

En el caso de vertimientos que contienen alta carga orgánica[16] y la evaluación indicó un riesgo de

16 Vertimientos que contienen alta carga orgánica tales como aguas residuales tratadas municipales, domesticas, de industria papelera, alimenticia, acuícola, agroindustrial, cervecera, entre otros.

incumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, se deberá establecer puntos de control adicionales aguas abajo del vertimiento, donde se monitorean las concentraciones del oxígeno disuelto. La ubicación del punto de control puede ser determinada con el modelo de autodepuración, calculando la distancia desde el vertimiento hasta el punto donde se producirá la concentración mínima de oxígeno disuelto; o, en su defecto, se establecen varios puntos de control hasta una distancia del vertimiento de aproximadamente 10 km. Este control deberá ser realizado en las mismas fechas que el muestreo de agua natural y residual.

- Los parámetros de control en el cuerpo receptor comprenden los parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura), los parámetros recomendados para las diferentes actividades y categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural en la tabla 2, acápite I.2 y, adicionalmente, sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, indicados en los ECA-Agua, en la categoría correspondiente.

- Los parámetros de control en el efluente deberían ser coherentes, tratando en lo posible de que sean los mismos que en el cuerpo receptor. Asimismo, deben considerarse los parámetros para los cuales el sector correspondiente haya definido un Límite Máximo Permisible.

- Para poder determinar la carga contaminante en el efluente vertida al cuerpo natural de agua se deberá determinar, en cada toma de muestra, el caudal de aguas residuales tratadas vertidas mediante el dispositivo de medición instalado[17] o, en su defecto, mediante una metodología manual (correntómetro, balde o flotador). La ubicación del caudalímetro o del dispositivo de medición podrá ser seleccionada por el administrado en función de consideraciones técnicas y de accesibilidad. El único requisito por parte de la autoridad es que la ubicación seleccionada permita la medición del caudal total de las aguas residuales tratadas vertidas al cuerpo receptor.

Se debe precisar que la toma de muestra de las aguas residuales que se ha de caracterizar debería realizarse en conformidad con los Protocolos de Monitoreo de Efluentes publicados por el sector correspondiente, y los puntos de control en el cuerpo receptor serán muestreados según R.J. N° 010-2016-ANA.

- La frecuencia de control de las cargas contaminantes en el efluente y de la calidad del cuerpo natural de agua será determinada en función del volumen anual de las aguas residuales tratadas vertidas, como se muestra en la tabla siguiente:

17 El artículo 136 del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos sobre la Medición y Control de Vertimientos establece que es responsabilidad del administrado instalar sistemas de medición de caudales de agua residual tratada y reportar los resultados de la medición.

VOLUMEN ANUAL (M^3)	N.º DE MONITOREOS POR AÑO	FRECUENCIA DE CONTROL*
< 300 000	1	Anual
300 000-3 000 000	2	Semestral
>3 000 000-9 000 000	4	Trimestral
> 9 000 000	12	Mensual

* En el caso de vertimientos realizados por actividades estacionales, el número total de los monitoreos indicados en la tabla anterior deberá ser realizado en el periodo de producción, con una frecuencia regular (ejemplo: actividad con cuatro meses de producción y 400 000 m^3 de volumen anual de aguas residuales => dos monitoreos con frecuencia bimensual en el periodo de producción).

Cuando los volúmenes medios mensuales de aguas residuales tratadas vertidas son constantes, el control en el cuerpo natural de agua puede, previo sustento técnico, ser realizado solamente en la época de estiaje, es decir, durante los tres meses de menor caudal en el cuerpo receptor. En el caso de que las normas ambientales sectoriales[18] establezcan una frecuencia de control más alta, el programa de control deberá aplicarse conforme con ellas.

- Se debe precisar que la toma de muestra del cuerpo natural de agua y del agua residual debería ser realizada en la misma fecha.

- De acuerdo con la magnitud del proyecto, la estabilidad del proceso de tratamiento (tecnologías de tratamiento químico-físico) y la sensibilidad ambiental y social del cuerpo receptor (áreas naturales protegidas o usos poblacionales del recurso hídrico aguas abajo del vertimiento), se recomienda prever estaciones de control automático de los parámetros pH, conductividad y turbiedad, reporte en tiempo real y mecanismos de alerta temprana cuando ocurran variaciones anómalas en los parámetros monitoreados. Las estaciones automáticas, que monitorean en continuo los parámetros básicos, son herramientas de gestión ambiental muy útiles para los administrados, dado que les permiten identificar, en tiempo real, potenciales fallas de sus sistemas de tratamiento de aguas residuales e intervenir en plazos muy cortos. Esta intervención rápida puede evitar o reducir significativamente los impactos ambientales ocasionados accidentalmente, y los

18 Véase:
- Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales (2000). R.M. Nº 026-2000-ITINCI, aprueba el Protocolo del Monitoreo de Efluentes Líquidos del sector Industria.
- Ministerio de la Producción (2016). R.M. N° 061-2016-PRODUCE, aprueba el Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). R.M. Nº 273-2013-VIVIENDA, aprueba el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR.
- Ministerio del Ambiente (2010). Decreto Supremo Nº 010-2010-MINAM, Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, que dispone que hasta la entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos se deberá aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en el artículo 7 de la R.M. Nº 011-96-EM/VMM, Ministerio de Energía y Minas (1996).

consecuentes daños en el ambiente y/o en la salud de las personas, lo que es de particular relevancia en ecosistemas sensibles y cuando existen usos poblacionales del recurso hídrico. Asimismo, el uso de estaciones automáticas en conjunto con los mecanismos de intervención rápida puede reducir significativamente el riesgo de la empresa frente a fallas del sistema de tratamiento de aguas residuales y los consecuentes costos por la remediación ambiental, denuncias o conflictos socio-ambientales. Por lo tanto, se recomienda que cada proyecto evalúe la implementación de estaciones automáticas en función de sus costos y sus beneficios en lo que concierne a la reducción del riesgo de ocasionar accidentalmente impactos ambientales y de salud.

8. EVALUACIÓN DE VERTIMIENTOS EN CURSO Y EN FASE DE ADECUACIÓN A LOS ECA-AGUA

Los titulares de actividades que cuentan con un Instrumento de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad competente y que requieren adecuar sus Planes de Manejo Ambiental a los ECA-Agua, podrán aplicar el presente lineamiento según el siguiente detalle:

1. Recopilación de todos los datos disponibles del control del vertimiento y evaluación de las concentraciones medidas en el cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento que cumplan con los ECA-Agua de la categoría correspondiente. En el caso de que esta evaluación demuestre que el vertimiento no causa ningún incumplimiento de los ECA-Agua asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o actividad (véase tabla 2, acápite I.2), no se deberá realizar evaluaciones adicionales.

2. En el caso de que se haya encontrado incumplimientos de los ECA-Agua, se deberá analizar si los parámetros críticos ya exceden los ECA-Agua aguas arriba del vertimiento. Si el análisis confirma que el cuerpo receptor ya se encuentra contaminado aguas arriba del vertimiento, se podrá proponer una de las siguientes medidas:

   2.1 Si se puede demostrar que el cuerpo de agua presenta parámetros en concentraciones superiores a los ECA-Agua debido a las condiciones naturales, como por ejemplo cuando aguas arriba del vertimiento no existan fuentes antropogénicas del parámetro crítico, se propondrá que este cuerpo de agua sea exceptuado de la aplicación del ECA-Agua específico, haciendo referencia al artículo 6 del D.S. N° 004-2017-MINAM. Considérese que la excepción debería ser sustentada mediante un estudio técnico que demuestre la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad de las aguas naturales, el cual deberá ser aprobado por la ANA.

   2.2 Cuando la contaminación no se origina de fuentes naturales, se deberá proyectar las medidas que permitan reducir la concentración

del parámetro crítico a niveles iguales o menores que la concentración en el cuerpo receptor:[19]

$$C_{vert} \leq C_{RH}$$

Estas medidas abarcan modificaciones al plan de manejo de aguas, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias, o el sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de las sustancias críticas.

3. En el caso de que los incumplimientos de los ECA-Agua fueran observados aguas abajo del vertimiento solamente, se deberá suponer una de las dos siguientes condiciones que deberían ser comprobadas con las metodologías propuestas en el presente lineamiento:

   3.1 El punto de control aguas abajo del vertimiento está ubicado al interior de la zona de mezcla y no es válido para controlar el cumplimiento de los ECA-Agua.[20]

   Se determina la extensión de la zona de mezcla según lo descrito en el acápite II.2, y se comprueba que el punto de control esté ubicado fuera de la zona de mezcla. En caso contrario, el administrado propone la reubicación del punto de control establecido aguas abajo del vertimiento.

   3.2 La carga contaminante del vertimiento de aguas residuales tratadas excede la capacidad de asimilación del cuerpo receptor.

   Se determina la carga contaminante de vertimiento admisible aplicando el balance de masa descrito en el acápite II.5:

$$(C_{vert} \times Q_{vert}) \leq Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH}) + Q_{vert} \times C_{ECA}$$

   La carga contaminante de vertimiento admisible se compara con la carga contaminante máxima del vertimiento. Nótese que este análisis deberá ser realizado solamente para aquellos parámetros en los cuales se ha encontrado incumplimientos de los ECA-Agua correspondientes.

   Si la actividad genera dos o más vertimientos a un mismo cuerpo receptor, en la determinación de la carga contaminante máxima se deberá considerar el aporte de todos los vertimientos de aguas residuales tratadas (véase el acápite II.5).

   Si la carga contaminante máxima de vertimiento supera la carga contaminante admisible, esta deberá ser reducida hasta el nivel de la carga admisible disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos o ambos, implementando las respectivas modificaciones al plan de manejo de aguas, considerando, por

19 Véase sustento técnico en el acápite II.5.

20 Véase el artículo 7 del D.S. Nº 004-2017-MINAM, Verificación de los de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua fuera de la zona de mezcla: "En cuerpos naturales donde se vierten aguas tratadas la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla [...]".

ejemplo, tecnologías limpias o el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad, o incrementando la eficiencia de remoción de las sustancias críticas del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para determinar el caudal máximo admisible manteniendo las concentraciones invariadas se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \text{ x } (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})}$$

En el caso de que no sea posible reducir el caudal del vertimiento, será necesario reducir las concentraciones de los contaminantes críticos en el agua residual. La concentración máxima del contaminante que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \text{ x } (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$



III.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN CUERPOS DE AGUA LÉNTICOS NATURALES Y ARTIFICIALES (LAGOS, LAGUNAS Y EMBALSES O PRESAS)

1. GENERALIDADES SOBRE EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO DE AGUA LÉNTICO

Los ambientes lénticos son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar por periodos largos de tiempo (meses, años), con corrientes horizontales de velocidad de flujo muy baja. Comprenden todas las aguas superficiales continentales no corrientes como lagunas, lagos, embalses, reservorios y otros de características similares.

Estos son considerados ecosistemas acuáticos sensibles, dado su elevado valor ecosistémico y sociocultural; además de los largos tiempos necesarios para su recuperación, en el caso de afectación por vertimiento de aguas residuales no tratadas. La Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, define en su artículo 99, numeral 99.2, que los ecosistemas frágiles comprenden, entre otros, las lagunas altoandinas.

Dado que se trata de cuerpos de agua sensibles a la contaminación, el vertimiento de aguas residuales tratadas a lagunas y lagos, particularmente las lagunas altoandinas, debería ser considerado como la última alternativa de disposición final. El tratamiento previo de las aguas residuales vertidas a un cuerpo de agua léntico por lo general será terciario o avanzado, para no causar un incumplimiento de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua.

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a lagunas y lagos comprende la determinación de la zona de mezcla y la verificación del cumplimiento de los ECA-Agua en el límite de referida zona; así como, la determinación del índice de intercambio de agua de la laguna o lago empleado como cuerpo receptor para la verificación del cumplimiento de los ECA-Agua a largo plazo.

2. LA ZONA DE MEZCLA EN CUERPOS DE AGUA LÉNTICOS

La zona de mezcla en lagos y lagunas es aquel volumen de agua dentro del cual la calidad del agua no cumple con las normas ambientales, debido al vertimiento de aguas residuales tratadas. La cual está delimitada por la superficie y el fondo del lago o laguna donde la calidad del agua cumple con las normas ambientales, debido a la dilución de las aguas residuales tratadas vertidas.

En dicha zona se mezcla se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y de dispersión, sin considerar otros factores como el decaimiento bacteriano, la sedimentación, la asimilación en materia orgánica y la precipitación química. El propósito de la zona de mezcla es utilizar la capacidad de dilución del cuerpo receptor permitiendo una región limitada donde las concentraciones exceden los ECA-Agua, lo que implica un uso limitado del agua en esta región.

Dado que la zona de mezcla comprende un área de incumplimiento de los ECA-Agua, en ningún caso debería

acercarse a menos de 50 m de las zonas de uso de agua, así como a la toma de agua para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario o áreas de acuicultura.[21] De igual forma, se deberá prever una distancia mínima de seguridad de 50 m desde el límite de la zona de mezcla hasta la orilla, para evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla.

3. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO DE AGUA LÉNTICO

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, es necesario contar con información sobre las condiciones ambientales del vertimiento, tal como la configuración del cuerpo natural de agua. La información sobre el cuerpo natural de agua debería ser recopilada en un estudio limnológico del cuerpo receptor que permite determinar la morfometría, la batimetría, la estratificación térmica y el perfil vertical de la densidad del agua natural en el punto de vertimiento en las diferentes estaciones del año, las corrientes y, particularmente, el índice de intercambio del agua.

También las características de las aguas residuales tratadas vertidas son determinantes para la dilución inicial; por lo tanto, se deberá estimar el caudal máximo de vertimiento, la densidad del efluente, las sustancias contenidas en las aguas residuales tratadas y sus concentraciones en las condiciones más críticas.

Otras informaciones imprescindibles para la evaluación del impacto de un vertimiento a través de un emisor subacuático son la profundidad de la descarga en el cuerpo de agua, el número de orificios, la distancia entre ellos, la longitud del emisor y del difusor, la orientación del difusor y las características de diseño de los orificios, como su diámetro, e, inclusive, el tipo y material del difusor.

3.1 Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, es necesario contar con información respecto de las concentraciones de los parámetros que ya se encuentran en el cuerpo receptor, y se determinan a través de la toma de muestra y análisis en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Los parámetros que se analizan son aquellos que estarán potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas. De forma referencial se recomienda analizar los parámetros definidos para las diferentes actividades y categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural contenidos en la tabla 2 del acápite I.2 y, adicionalmente,

21 Áreas habilitadas por la Dirección General de pesca para Consumo Humano Directo e Indirecto, Ministerio de Producción, para desarrollar actividades de acuicultura y áreas donde dicho ministerio ha otorgado un derecho de uso acuícola.

sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, indicados en los ECA-Agua, en la categoría correspondiente.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua léntico, se realizará por lo menos cuatro tomas de muestra con una frecuencia trimestral en la ubicación del vertimiento proyectado en diferentes profundidades, que deben ser seleccionadas en función de la estratificación térmica del cuerpo de agua. La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor debería ser efectuada en las mismas fechas en las cuales se determinen las corrientes y la estratificación térmica en el marco del estudio limnológico.

Para los casos de adecuación de un vertimiento en curso a la normatividad ambiental, el punto de toma de muestra deberá ser ubicado fuera de la zona de influencia del vertimiento actual, es decir, a una distancia de algunos cientos de metros del punto de vertimiento en curso, en dirección contraria a la dirección de las corrientes predominantes que generalmente están orientadas desde el tributario principal del lago/laguna/embalse a su salida.

3.2 Densidad del agua natural

Cuerpos de agua lénticos pueden mostrar una estratificación vertical de la densidad del agua causada por un gradiente térmico con mayores temperaturas en la superficie (= menor densidad) y menores temperaturas en el fondo (= mayor densidad).

En un clima templado, como el de la región costeña del Perú, y en un clima tropical, como el de la selva, en el verano habrá estratificación térmica máxima y en el invierno estratificación mínima.

En los lagos y lagunas altoandinas, localizados entre 2000 y 4000 msnm, entre los cuales está el lago Titicaca, la dinámica térmica se aparta considerablemente de la que presentan los sistemas en las zonas bajas del trópico, debido a la altitud y a las consecuentes condiciones climáticas imperantes. Investigaciones realizadas en algunos lagos de alta montaña han contribuido al conocimiento de su régimen térmico, siendo en general clasificados como oligotérmicos con circulaciones frecuentes (es decir, nunca se estratifican), por lo cual, han sido llamados polimícticos fríos (Hutchinson & Loefler, 1956; Rodan, 1992). Entre las características adicionales de estos lagos y lagunas, se cuenta el aislamiento geográfico, temperaturas medias por debajo de 20 ^{o}C, concentraciones de oxígeno disuelto bajas ($<$ 7mg/l), y, a diferencia de los lagos de zonas bajas, son por lo general más profundos.

La variabilidad de la densidad con la profundidad tiene un efecto significativo en la dilución inicial y puede evitar que la pluma de aguas residuales tratadas vertidas alcance totalmente a la superficie, lo que provoca que los desechos queden atrapados bajo la superficie (véase el gráfico 18), y la dilución inicial sea menor que cuando el campo de aguas residuales tratadas asciende hasta la superficie.

Gráfico 17. Curvas ejemplares de la estratificación térmica y de los perfiles de densidad en un cuerpo natural de agua léntico en las diferentes estaciones del año

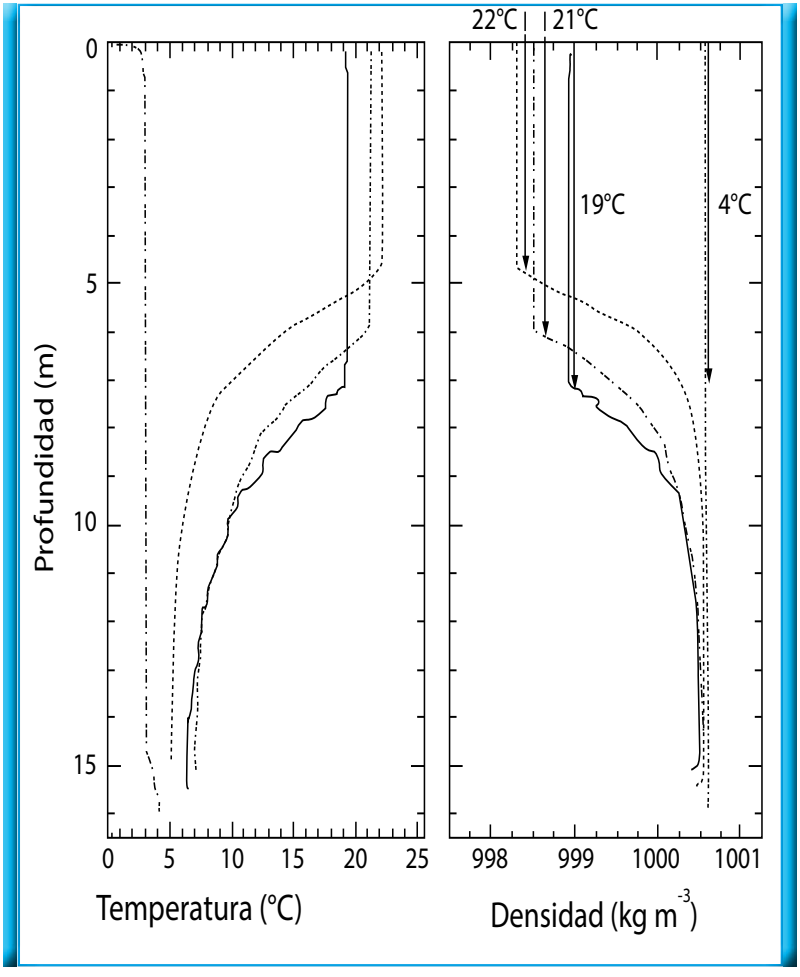
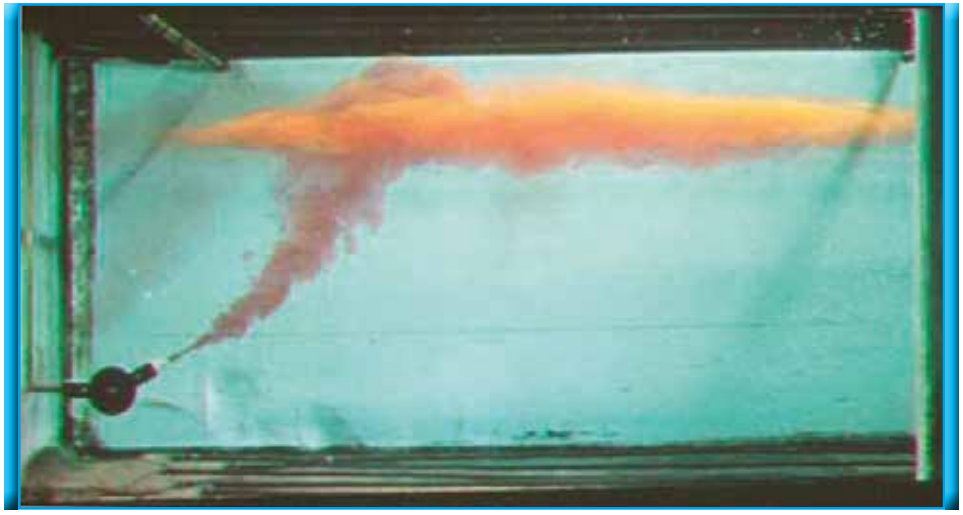


Gráfico 18. Formación de una pluma emergente de aguas residuales en un cuerpo de agua natural con estratificación térmica de la densidad (instalación experimental de K. Hofer, VAW, Zúrich)



Por lo tanto, en los lagos, lagunas y embalses ubicados en clima templado (costa centro y sur) o en clima trópico (selva y costa norte), se deberá determinar la estratificación de la densidad del cuerpo léntico. No se habrá de determinar los perfiles de densidad en los lagos y lagunas altoandinas. Sin embargo, también en los lagos y las lagunas de esa zona se deberá medir la temperatura a varias profundidades y en las diferentes estaciones del año.

Los perfiles de densidad y temperatura deben ser determinados en las diversas estaciones del año, considerando por lo menos cuatro tomas de muestra en el punto de vertimiento propuesto, en diferentes profundidades, con un muestreador de agua profunda y medición inmediata de la temperatura y densidad con el densímetro. En alternativa a la medición directa de la densidad, se podrá medir la temperatura in situ y luego calcular la densidad con la siguiente ecuación que es aplicable para temperaturas entre 0 °C y 40 °C a una presión de 1 atm (Comité International des Poids et Mesures, CIPM).

$$\rho\,(t) = 999{,}974950 \times \left(\frac{1 - (T - 3{,}983035)^2 \times (T + 301{,}797)}{522528{,}9 \times (T + 69{,}34881)} \right)$$

Donde:

ρ (t) : densidad del agua en función de la temperatura, en kg/m^3.

T : temperatura del agua en ^{o}C.

3.3 Determinación del índice de intercambio de agua de la laguna o lago

El índice de intercambio de agua corresponde al caudal anual medio en la salida de la laguna y lago. En el caso de un vertimiento a una bahía, este índice corresponde al caudal anual medio de los ríos y quebradas tributarios a la bahía evaluada.

El caudal anual medio en la salida de la laguna y lago o de los tributarios a una bahía puede ser determinado con base en un registro histórico de caudales o, en su defecto, mediante por lo menos cuatro mediciones del caudal realizadas en las diferentes estaciones del año hidrológico:

- Cuando se dispone de una serie histórica del caudal de la salida de la laguna o de los tributarios a una bahía de por lo menos cinco años, el índice de intercambio de agua será el valor mínimo del caudal anual medio registrado en los últimos cinco años:

$$II_{RH,crit} = Q_{anual,min}$$

Donde:

$II_{RH,crit}$: índice de intercambio de agua crítico, en m3/s.

$Q_{anual,min}$: valor mínimo del caudal anual medio registrado en los últimos cinco años en la salida de la laguna o en los tributarios a una bahía, en m^3/s.

Nótese que no se deberá considerar los caudales extremos debidos a la ocurrencia de fenómenos naturales extremos, como el Fenómeno El Niño.[22]

- Cuando no se dispone de una serie histórica del caudal, se deberá efectuar por lo menos cuatro mediciones con una frecuencia trimestral del caudal de salida de la laguna o de los tributarios de la bahía. El promedio de las cuatro mediciones corresponde al índice de intercambio de agua crítico, corregido con un factor de seguridad (2) que toma en cuenta la inseguridad de la información basada en cuatro mediciones, considerando solamente la variabilidad multianual de los caudales:

$$II_{RH,crit} = \frac{Q_{promedio}}{2}$$

22 Véase D.S. N° 04-2017-MINAM, artículo 6.- Consideraciones de excepción para la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua

4. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL A LARGO PLAZO

Los vertimientos de aguas residuales tratadas a cuerpos de agua lénticos conllevan el riesgo de que los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas se acumulen en el cuerpo de agua natural, debido a sus características ambientales específicas de corrientes bajas y al intercambio del volumen de agua muy lento.

Esto es de particular relevancia para los nutrientes (fósforo y nitrógeno) y los contaminantes persistentes, tales como metales y compuestos orgánicos persistentes, como los organoclorados e hidrocarburos aromáticos.

Una de las variables de mayor importancia para la evaluación del impacto ambiental a largo plazo, de un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural léntico es el índice de intercambio de agua de la laguna o lago, es decir, el volumen de agua en el cuerpo receptor que anualmente se renueva y que corresponde al volumen de agua natural disponible para la dilución.

Para determinar el índice de intercambio de agua crítico del cuerpo receptor se deberá aplicar la metodología descrita en el acápite III.3.3, y calcular las probables concentraciones en el largo plazo de todos los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas vertidas con el simple balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times II_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(II_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Donde:

C_0 : concentración en cuerpo receptor en el largo plazo.

C_{RH} ' : concentración máxima en el cuerpo receptor, determinada según capitulo III.3.1.

C_{vert} : concentración máxima en las aguas residuales tratadas, determinada según el capítulo I.3.

$II_{RH,crit}$: índice de intercambio de agua crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado según el capítulo III.3.3, en m^3/s.

Q_{vert} : caudal medio anual[23] del vertimiento, en m^3/s.

Cuando el proyecto prevé varios vertimientos al mismo cuerpo receptor, el balance de masas deberá considerar la carga contaminante total de todos los vertimientos proyectados:

$$C_0 = \frac{(C_{RH \times IIRH,crit}) + (C_{vert,1} \times Q_{vert,1}) + \ldots\ldots + (C_{vert,i} \times Q_{vert,i})}{(II_{RH,crit} + Q_{vert,1} + \ldots + Q_{vert,i})}$$

23 Para la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua a largo plazo, no se deberá aplicar el caudal máximo de vertimiento si no el promedio anual, dado que se evalúan los efectos acumulativos del vertimiento en un periodo de un año.

Es importante considerar que aun cuando de manera individual se determine que un vertimiento no supera la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, de manera simultánea dichos vertimientos pueden sobrepasar esta capacidad, debido a la confluencia de los mismos, generando el incumplimiento de la normativa ambiental aplicable. En tal sentido, se evalúa el impacto de los dos o más vertimientos en un cuerpo natural de agua de forma integral, aplicando así el principio de indivisibilidad (D.S. N° 019-2009-MINAM, Reglamento de la Ley Nº 27446, artículo 3, Principios del SEIA, literal a.

Con la siguiente inecuación se determina el cumplimiento de los ECA-Agua:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Para la evaluación de todos los parámetros contenidos potencialmente en el efluente, se elabora un cuadro que contenga la lista completa de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, la concentración calculada para cada parámetro en el cuerpo receptor en el largo plazo y el ECA-Agua correspondiente.

En el caso que este análisis muestre que la concentración en el cuerpo receptor será mayor que la del ECA-Agua correspondiente, se deberían realizar las debidas modificaciones al plan de manejo de aguas, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias que reduzcan el volumen y/o la carga de las aguas residuales generadas o el reuso/ recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad. Alternativamente, se podría también modificar el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de los parámetros críticos.

Para determinar la carga del vertimiento admisible se puede usar la siguiente ecuación, que integra la condición para el cumplimiento de los ECA-Agua con el balance de masas:

$$(C_{vert} \times Q_{vert}) \leq II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH}) + Q_{vert} \times C_{ECA}$$

La carga contaminante de vertimiento deberá ser reducida hasta el nivel de la carga admisible disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos o ambos.

Para determinar el caudal máximo admisible manteniendo las concentraciones invariadas se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})}$$

En el caso que no sea posible reducir el caudal del vertimiento, será necesario reducir las concentraciones del agua residual. La concentración máxima del contaminante en el efluente que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

La ecuación anterior es aplicable también para determinar la concentración máxima en el efluente, que permite cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, de los parámetros no reglamentados por el sector con un LMP. Esta concentración máxima podrá ser usada como un criterio de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

5. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL EN EL LÍMITE DE LA ZONA DE MEZCLA

La evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas en un cuerpo de agua léntico, debería comprobar que el emisor subacuático proyectado proporciona una dilución inicial mínima -Sa- que es mayor que la dilución requerida –S_{max}–:

$$S_a > S_{max}$$

Si esta inecuación expresa un resultado correcto, las concentraciones de los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas en el límite de la zona de mezcla serán inferiores a los ECA-Agua.

Esta evaluación debería ser realizada considerando las condiciones más críticas: estratificación máxima de la densidad del cuerpo receptor, corriente horizontal mínima, concentraciones y caudal del efluente máximo.

La evaluación de la dilución inicial mínima –S_a– proporcionada por el difusor subacuático propuesto deberá realizarse mediante el uso de los modelos numéricos descritos en el acápite III.5.2.

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (S_{max}) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(S_i , S_{(i+1)} , \dots , S_{(i+n)})$$

y

$$Si = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C_{RH,i})}$$

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$: dilución necesaria para respetar los ECA-Agua del parámetro i o i+n, respectivamente.

i, i+n : parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, determinados según el acápite I.2.

$C_{vert,i}$: concentración máxima del parámetro i en el efluente, determinada según el acápite I.3. o según el III.4, en el caso que resultara necesario reducir la concentración en el efluente para poder cumplir con el ECA-Agua en el largo plazo.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural, determinada según el acápite III.3.1.

S_{max} : dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla, definida como el valor máximo de los factores de dilución calculados para los diferentes parámetros relevantes para el tipo de efluente.

En el caso de que el diseño del difusor no proporcione una dilución inicial suficiente –es decir, $S_a < S_{max}$–, se deberá reconsiderar el diseño del emisor, incrementando el número de orificios de descarga y la longitud del difusor, o ampliando la longitud del emisor para lograr una mayor profundidad de descarga. Alternativamente, se podrá prever mecanismos que permitan reducir el caudal o las concentraciones del efluente considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias que reduzcan el volumen y/o la carga de las aguas residuales generadas, el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad o modificando el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de los parámetros críticos.

En caso de que no sea posible implementar un dispositivo de descarga que logre una dilución inicial mínima mayor que la dilución requerida para el cumplimiento de los ECA-Agua, se podrá aplicar la siguiente ecuación para determinar la concentración máxima admisible del vertimiento:

$$C_{vert,admi} = S_a \times (C_{ECA,i} - C_{RH,i}) + C_{ECA,i}$$

Esta ecuación antecedente es aplicable también para determinar la concentración máxima en el efluente, que permite cumplir con los ECA-Agua, en el cuerpo receptor, de los parámetros no reglamentados por el sector con un LMP. Esta concentración máxima podrá ser usada como un criterio de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En el caso de que el parámetro evaluado se encuentre en el cuerpo natural de agua en concentraciones superiores al ECA-Agua, es decir CRH ≥ CECA, su concentración en las aguas residuales tratadas vertidas deberá ser igual o menor que la concentración en el cuerpo receptor:[24]

$$C_{vert} \leq C_{RH}$$

En estas condiciones, el vertimiento no causará un incremento de la concentración en el cuerpo receptor y no creará un impacto adicional en el cuerpo natural de agua afectado por otras fuentes de contaminación.

Si se puede demostrar que un cuerpo de agua presenta parámetros en concentraciones superiores a los ECA-Agua por sus condiciones naturales, este podrá ser exceptuado de la aplicación de determinados ECA-Agua (artículo 6 del D.S. N° 004-2017-MINAM). Administrativamente, la exceptuación es realizada mediante la aprobación por

24 Véase el Ley Nº 28611, Ley General del Ambiente, artículo 121: "Del vertimiento de aguas residuales. El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes".

la ANA del estudio técnico que sustente la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad de las aguas naturales. Asimismo, la ANA deberá comunicar al MINAM los cuerpos de agua y los parámetros de excepción.

5.1 Modelos numéricos para la determinación de la dilución inicial y de la extensión máxima de la zona de mezcla

En la actualidad existen diferentes modelos numéricos que simulan los complejos procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de mezcla. Su solución es realizada mediante paquetes de *software* especializado, que además permiten el ingreso de los datos a través de interfaz gráfica y la representación de los resultados de la simulación en tablas, gráficos e imágenes en 2D y 3D.

Para tal propósito, se recomiendan los modelos de simulación auspiciados por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, el cual distribuye programas (software) aptos para determinar la dilución inicial de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores naturales y la extensión de la zona de mezcla inicial. Entre estos modelos de simulación, se cuenta con el software libre Visual Plumes[25] (USEPA, 2003) y el CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System), el cual se basa en los principios, criterios y metodologías establecidas en el estudio *Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments* de Norman H. Brooks y el estudio *Dilution Models for Effluent Discharges* de D. J. Baumgartner, W. E. Frick & P. J. W. Roberts. También puede hacerse uso de otro modelo aplicable para la simulación de los procesos hidrodinámicos en el campo cercano de un vertimiento de aguas residuales.

Los resultados del modelo deberán comprobar:

1) Que la zona de mezcla en su extensión máxima no se acerque a menos de 50 m de las zonas de uso de agua, como las tomas de agua para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario, áreas de acuicultura o a la orilla. Caso contrario, se deberá reubicar el dispositivo de descarga. Para la simulación de la extensión máxima de la zona de mezcla, se supone estratificación mínima de la densidad del cuerpo receptor, corriente horizontal máxima y caudal máximo del efluente.

2) Que el diseño del difusor subacuático proporcione una dilución inicial mínima –Sa– mayor que la dilución requerida –S_{max}– para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla:

$$S_a > S_{max}$$

Para el cálculo de la dilución mínima se supone estratificación máxima de la densidad del cuerpo

25 Visual Plumes está disponible con licencia libre en http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/visual-plumes

receptor, corriente horizontal mínima y caudal máximo del efluente.

Con el fin de calcular la probable concentración máxima en el límite de la zona de mezcla –$C_{LZDM,i}$– se podrá usar la siguiente ecuación:

$$C_{LZDM,i} = \frac{(C_{vert,i} + S_a \times C_{RH,i})}{(S_a + 1)}$$

Donde:

S_a : dilución inicial mínima proporcionada por el difusor subacuático propuesto.

$C_{vert,i}$: concentración máxima del parámetro i en el efluente, determinada según el acápite I.3. o según el III.4, en caso resulte necesario reducir la concentración en el efluente para poder cumplir con el ECA-Agua en el largo plazo.

$C_{RH,i}$: concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural, determinada según el acápite III.3.1.

I : representa los parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, determinados según el acápite I.2.

La probable concentración máxima en el límite de la zona de mezcla deberá ser inferior al ECA-Agua correspondiente:

$$C_{LZDM,i} \leq C_{ECA,i}$$

5.2 Emisores subacuáticos con difusores de orificios múltiples

En el caso de que el diseño del difusor subacuático no proporcione una dilución inicial suficiente –es decir, $S_a < S_{max}$–, se podrá optar por un emisor con un difusor de orificios múltiples, ya que la dispersión inicial es más alta que la de la descarga a través de un solo orificio.

El número de orificios depende de su diámetro y es calculado considerando que el área total de los orificios del difusor debería ser inferior al área de la tubería del difusor, para garantizar su funcionamiento hidráulico. Si el área total de los orificios excede el área de la tubería, la velocidad media de la descarga por los orificios sería menor que la velocidad de flujo de la tubería; esto es, el flujo tendría que desacelerarse antes de la descarga. Físicamente esto no es posible y, por lo tanto, algunos orificios no descargarán a su máxima capacidad, o no lo harán, anulando de esta manera el propósito del difusor. Brooks (1970) ha propuesto que para asegurar que los orificios descarguen plenamente se debe mantener un número de Froude mayor a 1. En la práctica, esto corresponde a una relación entre el área de la tubería y el área total de los orificios de 1 a 0,9; frecuentemente se encuentran difusores diseñados con una relación de 1:0,6 hasta 1:0,75.

La longitud del difusor depende del número de orificios y de su separación, que está en función de la superposición de las plumas de aguas residuales singulares. Si los orificios se encuentran a distancias muy

grandes, la pluma singular emerge y se comporta como una pluma individual. Cuando la distancia entre los orificios es menor, las plumas se superponen y la dilución disminuye. Eventualmente, cuando las plumas están muy juntas, se sobreponen rápidamente y se comportan como si la descarga fuera realizada desde una ranura; esto es conocido como una fuente lineal.

Para determinar la distancia óptima entre los orificios se aplica un proceso reiterativo, empleando un modelo numérico: inicialmente se selecciona una distancia grande y posteriormente se la reduce gradualmente, hasta que la dilución inicial se aproxima a la dilución requerida, lo que generalmente resultará en un distancia entre $H \geq S \geq H/3$ (donde H es la profundidad media de descarga y S es la distancia entre los orificios). Esta es la distancia óptima donde se logra la dilución requerida con una longitud del difusor mínima.

Asimismo, para lograr una dilución inicial máxima reduciendo la extensión de la zona de mezcla a un mínimo, el eje del difusor debería ser colocado en perpendicular a la dirección de la corriente predominante, que generalmente está orientada desde el tributario principal del lago/laguna/embalse hacia su salida.

6. CRITERIOS PARA EL CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Con referencia al programa de control de los impactos del vertimiento en un cuerpo natural de agua léntico, se debe indicar que los emisores subacuáticos fueron diseñados específicamente para ser aplicados en el ámbito marino, donde se realizan las descargas de aguas residuales, teniendo en cuenta la profundidad del emisor y del difusor y la velocidad de la corriente marina, los cuales aportan en la dilución y dispersión del contaminante. En ese sentido, para el caso de lagos y lagunas el programa de control propuesto deberá permitir verificar la dilución y dispersión de las descargas determinadas en el marco del Instrumento de Gestión Ambiental.

A continuación se describen los criterios generales para establecer el programa de control de los impactos del vertimiento en los cuerpos naturales de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como la calidad del agua superficial:

- La ubicación del punto de control de las cargas de las aguas residuales tratadas es seleccionada de modo que permita la caracterización del efluente vertido y la toma de muestra en condiciones seguras. De ser necesario, se preverá la instalación de un pozo entre la salida de la planta de tratamiento y el punto de vertido, que permita el fácil acceso y la toma de muestra de aguas residuales tratadas.
- Los puntos de control de cumplimiento de los ECA-Agua estarán ubicados en el límite de la zona de mezcla en el cuerpo receptor, determinada mediante la modelación numérica en las cuatro direcciones.

- Cuando el modelo numérico comprueba que la pluma alcanza la superficie hasta antes del límite de la zona de mezcla, las muestras serán tomadas en la superficie solamente; en caso contrario, se deberá prever muestras adicionales en el fondo a 50 cm del sustrato y, en caso de puntos con más de 10 m de profundidad, también a la mitad de la columna de agua (H/2).

- En el caso del vertimiento de aguas residuales tratadas de alta temperatura, como las aguas de refrigeración de las plantas termoeléctricas, se deberá establecer un punto adicional fuera del área de influencia del vertimiento (aguas arriba y en una distancia de aproximadamente tres veces el diámetro de la zona de mezcla), donde se determinará la temperatura del agua en condiciones naturales. El valor determinado será comparado con las mediciones realizadas en el límite de la zona de mezcla (ΔTemp $\leq$ 3 ^{o}C).

- Los parámetros de control en el cuerpo receptor comprenden los parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura), los parámetros recomendados para las diferentes actividades y categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural en la tabla 2, acápite I.2 y, adicionalmente, sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, que están indicados en los ECA-Agua, en la categoría correspondiente.

- Los parámetros de control en el efluente deberían ser coherentes, tratando en lo posible de que sean los mismos que en el cuerpo receptor. Asimismo, deben considerarse los parámetros para los cuales el sector correspondiente haya definido un Límite Máximo Permisible.

- Para poder determinar la carga contaminante en el efluente vertido al cuerpo natural de agua, se deberá establecer en cada toma de muestra el caudal de las aguas residuales tratadas vertidas mediante el dispositivo de medición instalado[26] o, en su defecto, mediante una metodología manual (correntómetro, balde o flotador). La ubicación del caudalímetro o del dispositivo de medición podrá ser seleccionada por el administrado en función de consideraciones técnicas y de accesibilidad. El único requisito por parte de la autoridad es que la ubicación seleccionada permita la medición del caudal total de las aguas residuales tratadas vertidas al cuerpo receptor.

- Es necesario precisar que la toma muestra de las aguas residuales por caracterizar (tratadas o no tratadas) debería realizarse en conformidad con los Protocolos de Monitoreo de Efluentes publicados por el sector correspondiente, y los puntos de control en el cuerpo receptor serán muestreados según R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.

26 El artículo 136 del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos sobre la medición y control de vertimientos establece que es responsabilidad del administrado instalar sistemas de medición de caudales de agua residual tratada y reportar los resultados de la medición.

- La frecuencia de control de las cargas contaminantes en el efluente y de la calidad del cuerpo natural de agua será determinada en función del volumen anual de las aguas residuales tratadas vertidas:

VOLUMEN ANUAL (M^3)	N.º DE MONITOREOS POR AÑO	FRECUENCIA DE CONTROL*
< 300 000 1	1	Anual
300 000-3 000 000	2	Semestral
>3 000 000-9 000 000	4	Trimestral
> 9 000 000	12	Mensual

* En el caso de vertimientos realizados por actividades estacionales, el número total de los monitoreos indicados en la tabla anterior deberá ser realizado en el periodo de producción con una frecuencia regular (ejemplo: actividad con cuatro meses de producción y 400 000 m^3 de volumen anual de aguas residuales => 2 monitoreos con frecuencia bimensual por realizarse en el periodo de producción).

En caso las normas ambientales sectoriales[27] establezcan una frecuencia de control más alta, el programa de control deberá corresponderse con ellas.

- Se debe precisar que la toma de muestra del cuerpo natural de agua y del agua residual debería ser realizada en la misma fecha.

- De acuerdo con la magnitud del proyecto, la estabilidad del proceso de tratamiento (tecnologías de tratamiento químico-físicos) y la sensibilidad ambiental y social del cuerpo receptor (áreas naturales protegidas o usos poblacionales del recurso hídrico), se recomienda prever estaciones de control automático de los parámetros pH, conductividad y turbiedad, reporte en tiempo real y mecanismos de alerta temprana, cuando ocurran variaciones anómalas de los parámetros monitoreados. Las estaciones automáticas que monitorean en continuo los parámetros básicos son herramientas de gestión ambiental muy útiles para los administrados, dado que les permiten identificar en tiempo real potenciales fallas de sus sistemas de tratamiento de aguas residuales e intervenir en plazos muy cortos. Esta intervención rápida puede evitar o reducir significativamente los impactos ambientales ocasionados accidentalmente y los consecuentes daños en el ambiente y/o en la salud de las personas, lo que es de particular relevancia en ecosistemas sensibles y cuando existen usos poblacionales del recurso hídrico. Asimismo, el uso de estaciones automáticas, en conjunto con los mecanismos de intervención rápida, puede reducir

27 Véase:
- Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales (2000). R.M. Nº 026-2000-ITINCI, Aprueban Protocolo del Monitoreo de Efluentes Líquidos del sector Industria.
- Ministerio de la Producción (2016). R.M. N° 061-2016-PRODUCE, Aprueban Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Aprueban Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR.
- Ministerio del Ambiente (2010). Decreto Supremo Nº 010-2010-MINAM, Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, que dispone que hasta la entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos se deberá aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en el artículo 7 de la R.M. Nº 011-96-EM/VMM, Ministerio de Energía y Minas (1996).

significativamente el riesgo de la empresa frente a fallas del sistema de tratamiento de aguas residuales y los consecuentes costos por la remediación ambiental, denuncias o conflictos socio-ambientales. Por lo tanto, se recomienda que cada proyecto evalúe la implementación de estaciones automáticas en función de sus costos y sus beneficios en lo que concierne a la reducción del riesgo de ocasionar accidentalmente impactos ambientales y de salud.

7. EVALUACIÓN DE VERTIMIENTOS EN CURSO Y EN FASE DE ADECUACIÓN A LOS ECA-AGUA

Los titulares de actividades que cuentan con un Instrumento de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad competente y que requieren adecuar sus Planes de Manejo Ambiental a los ECA-Agua, podrán aplicar el presente lineamiento según el siguiente detalle:

1. Recopilación de todos los datos disponibles del control del vertimiento y evaluación de las concentraciones medidas en el cuerpo receptor que cumplan con los ECA-Agua de la categoría correspondiente. En el caso de que esta evaluación demuestre que el vertimiento no causa ningún incumplimiento de los ECA-Agua asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o actividad (véase tabla 2, acápite I.2), no se deberá realizar evaluaciones adicionales.

2. En el caso de que se hayan encontrado incumplimientos de los ECA-Agua, se deberá analizar si los parámetros críticos ya exceden los ECA-Agua en los tributarios del cuerpo de agua léntico, utilizando los datos de los monitoreos realizados anteriormente o recopilando los datos mediante la toma de muestra y el análisis en laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Si este análisis confirme que los tributarios del cuerpo natural de agua léntico ya se encuentran contaminados, se podrá proponer una de las siguientes medidas:

   2.1 Si se puede demostrar que el cuerpo de agua presenta parámetros en concentraciones superiores a los ECA-Agua debido a las condiciones naturales, como por ejemplo cuando en las cuencas hidrográficas de los tributarios no existan fuentes antropogénicas del parámetro crítico, se propondrá que este cuerpo de agua sea exceptuado de la aplicación del ECA-Agua específico, haciendo referencia al artículo 121 de la Ley Nº 28611. Considérese que la excepción debería ser sustentada mediante un estudio técnico que demuestre la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad de las aguas naturales, el cual deberá ser aprobado por la ANA.

   2.2 Cuando la contaminación no tiene su origen en fuentes naturales, se deberá proyectar las medidas que permitan reducir la concentración

del parámetro crítico en el efluente a niveles iguales o menores de la concentración en el cuerpo receptor:[28]

$$C_{vert} \leq C_{RH}$$

Estas medidas abarcan modificaciones al plan de manejo de aguas, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias, o al sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de las sustancias críticas.

3. En caso los incumplimientos de los ECA-Agua fueran observados en los puntos de control próximos al vertimiento solamente, se deberá suponer una de las tres siguientes condiciones que deberían ser comprobadas con las metodologías propuestas:

   3.1 La carga contaminante del vertimiento de aguas residuales tratadas excede la capacidad de asimilación del cuerpo receptor.

   Se determina el Índice de Intercambio del agua de la laguna o lago según lo indicado en el acápite III.3.3, y posteriormente se calcula la carga contaminante del vertimiento admisible aplicando el balance de masas descrito en el acápite III.4.

$$(C_{vert} \times Q_{vert}) \leq II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH}) + Q_{vert} \times C_{ECA}$$

Nótese que este análisis deberá ser realizado solamente para aquellos parámetros en los cuales se han encontrado incumplimientos de los ECA-Agua correspondientes.

En el caso de que la actividad genere dos o más vertimientos a un mismo cuerpo receptor, en la determinación de la carga contaminante máxima se deberá considerar el aporte de todos los vertimientos de aguas residuales tratadas.

Si la carga contaminante máxima del vertimiento supera la carga contaminante admisible, esta deberá ser reducida hasta el nivel de la carga admisible, disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos o ambos, previendo las respectivas modificaciones al plan de manejo de aguas, considerando, por ejemplo, la implementación de tecnologías limpias o el reuso/recirculación parcial o total de las aguas residuales en la actividad, o incrementando la eficiencia de remoción de las sustancias críticas del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para determinar el caudal máximo admisible manteniendo las concentraciones invariadas se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})}$$

28 Véase el Ley Nº 28611, Ley General del Ambiente, artículo 121: "Del vertimiento de aguas residuales. El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes".

En caso no sea posible reducir el caudal del vertimiento, será necesario reducir las concentraciones de los contaminantes críticos en el agua residual. La concentración máxima del contaminante que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

3.2 Los puntos de control de la calidad del cuerpo receptor están ubicados al interior de la zona de mezcla y no son válidos para controlar el cumplimiento de los ECA-Agua.[29]

Se determina la extensión de la zona de mezcla recopilando la información requerida para la evaluación del impacto de un vertimiento en el cuerpo receptor, detallada en el acápite III.3, elaborando posteriormente uno de los modelos numéricos indicados en el acápite III.5.2, y comprobando que los puntos de control estén ubicados fuera de la zona de mezcla. En caso contrario, se propone su reubicación.

3.3 La dilución inicial mínima –S_a– proporcionada por el dispositivo de descarga actual es menor que la dilución requerida –S_{max}–:

$$S_a < S_{max}$$

Donde Sa y Smax podrán ser determinadas según lo indicado en el acápite III.5. Nótese que Smax deberá ser establecida solamente para aquellos parámetros en los cuales se ha encontrado incumplimientos de los ECA-Agua correspondientes.

En caso la evaluación confirme que el actual emisor no proporciona la dilución inicial requerida para el cumplimiento del ECA-Agua, se deberá reconsiderar el diseño del emisor, incrementando el número de orificios de descarga y la longitud del difusor, o ampliando la longitud del emisor para lograr una mayor profundidad de descarga.

29 Véase el artículo 7 del D.S. Nº 0004-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias : "En aquellos cuerpos de agua donde se vierten aguas tratadas, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA-Agua fuera de la zona de mezcla [...]".



IV.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN UN CUERPO NATURAL DE AGUA MARINO COSTERO

1. LA ZONA DE MEZCLA EN CUERPOS DE AGUA MARINO COSTEROS

Es aquel volumen de agua donde ocurre la dilución inicial del efluente con las aguas naturales del cuerpo receptor, inducido por el impulso de la descarga, la diferencia de densidad entre las aguas residuales tratadas y el agua salada, y los efectos de dispersión horizontal generados por las corrientes marinas. Por definición, la zona de mezcla es aquella en donde se logra la dilución inicial del vertimiento en el cuerpo de agua, sin considerar otros factores además de la sedimentación, procesos químicos o microbiológicos que eliminan o transforman las sustancias vertidas, ni el decaimiento bacterial. La dilución inicial es generada por tres fenómenos:

1) mezcla causada por el impulso de las aguas residuales tratadas al salir del dispositivo de descarga;

2) fuerza ascensional causada por la diferencia de densidad entre las aguas residuales tratadas y las aguas del cuerpo receptor (diferencias en temperatura y salinidad), que hace que el campo de aguas residuales tratadas ascienda en la columna de agua extendiéndose en el proceso y, por lo tanto, mezclándose con el agua del cuerpo receptor; y,

3) el efecto de la corriente que causa una mezcla lateral en el campo ascendente de las aguas residuales tratadas.

Considerando que las características de las aguas residuales vertidas, el tipo de dispositivo de descarga y las condiciones ambientales determinan la forma y extensión de la zona de mezcla, en los siguientes capítulos se discute los efectos de la densidad de las aguas residuales tratadas, las condiciones de estratificación de densidad del cuerpo natural de agua, la ubicación del dispositivo de descarga (en superficie o submarino) y el tipo de difusor (de orificio único o múltiple).

1.1. Vertimiento de aguas residuales tratadas de menor densidad que las aguas naturales marinas

Las aguas residuales de menor densidad que las aguas naturales son, entre otras:

- Aguas residuales tratadas doméstico-municipales.
- Aguas residuales tratadas industriales generadas en el uso de aguas dulces.

Asimismo, las siguientes aguas pueden presentar una menor densidad que las aguas naturales marinas debido a su elevada temperatura:

- Aguas de refrigeración de plantas termoeléctricas u otros procesos industriales.[30]

30 Nótese que las aguas de refrigeración no serán consideradas aguas residuales, en tanto no entran en contacto con la materia prima utilizada en el proceso productivo, ni ninguna otra sustancia o material contaminante que altere sus características originales supere los 35 °C, y que demande un tratamiento específico para su disposición. Sin embargo, las metodologías descritas en los siguientes capítulos pueden ser aplicadas para la evaluación ambiental de su descarga en el marco del Instrumento de Gestión Ambiental, permitiendo la simulación del incremento de la temperatura en el límite de la zona de mezcla que no debería ser mayor a 3 ºC con relación a la temperatura natural del agua.

- Salmueras de los procesos de desalinización de agua marina mediante la tecnología de destilación multietapa (Multi-stage Flash Distillation – MFS).

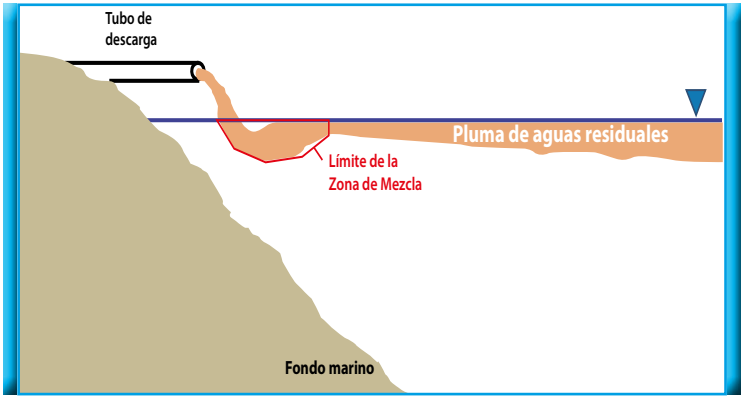
Vertimiento en la superficie del cuerpo de agua marino costero

En el caso de vertimientos en la superficie de los cuerpos naturales marino costeros, como en orilla de playa, la dilución inicial es generada por la mezcla causada por el impulso de las aguas residuales tratadas al salir del dispositivo de descarga solamente. Por lo tanto, esta tecnología de disposición final puede alcanzar una baja dilución de 1:3 hasta 1:10, lo que en muchos casos obligará a un mayor grado de tratamiento de las aguas residuales para poder cumplir los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla.

Vertimiento a través de un emisor submarino

Contrariamente a un vertimiento en la superficie del cuerpo de agua, las descargas mediante emisores submarinos permiten alcanzar diluciones muy elevadas (aproximadamente 1:100 para aguas residuales de menor densidad que el agua de mar), asegurando el cumplimiento de los ECA-Agua, y alejan los vertimientos de orilla de playa, donde podrían generarse impactos en la calidad sanitaria o estética de las aguas naturales. La decisión sobre el tipo de dispositivo de descarga

Gráfico 19. Zona de mezcla de un vertimiento de aguas residuales de menor densidad que el agua de mar en la superficie de un cuerpo natural de agua marino costero



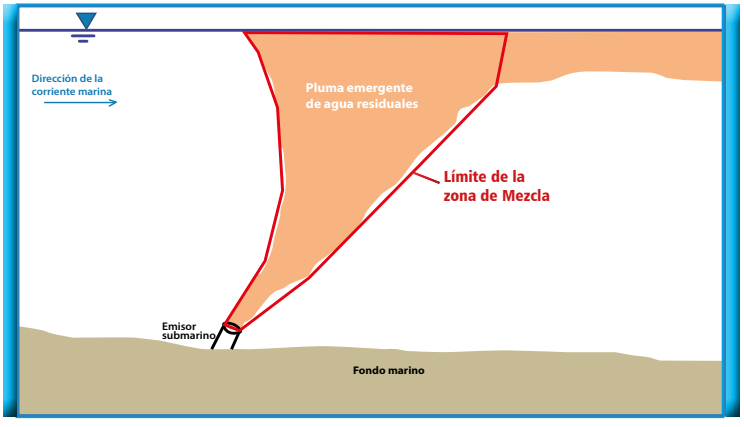
se deberá tomar considerando los costos y aspectos operativos de las dos alternativas.

Sin embargo, la evaluación económica en la mayoría de los casos dará preferencia al emisor submarino, que frecuentemente será menos costoso que un mayor grado de tratamiento debido principalmente a su bajo costo operativo.

La dilución inicial se produce, en primer lugar, por la fuerza ascensional causada por la diferencia de densidad entre las aguas residuales tratadas y las aguas del cuerpo receptor. En el caso de aguas residuales generadas por el uso de aguas dulces -como por ejemplo las aguas residuales tratadas domestico – municipales-, la diferencia de densidad -$\Delta\rho$- está en el orden de 0,0263 kg/L (valor normal de la densidad de aguas naturales marinas aproximadamente 1,0258kg/L; valor normal de la densidad de aguas residuales tratadas doméstico-municipales aproximadamente 0,9995 kg/L), originando una fuerte aceleración vertical ascendente de las aguas residuales vertidas.

El campo de las aguas residuales se extiende en el ascenso en la columna de agua y, por lo tanto, se mezcla con agua del cuerpo receptor. El punto de dilución inicial máxima se obtendrá en la superficie o en el punto de altura máxima del ascenso del campo de aguas residuales tratadas en un ambiente

Gráfico 20. Zona de mezcla de un vertimiento de aguas residuales de menor densidad que el agua de mar mediante emisor subacuático a un cuerpo natural de agua marino costera sin estratificación de la densidad



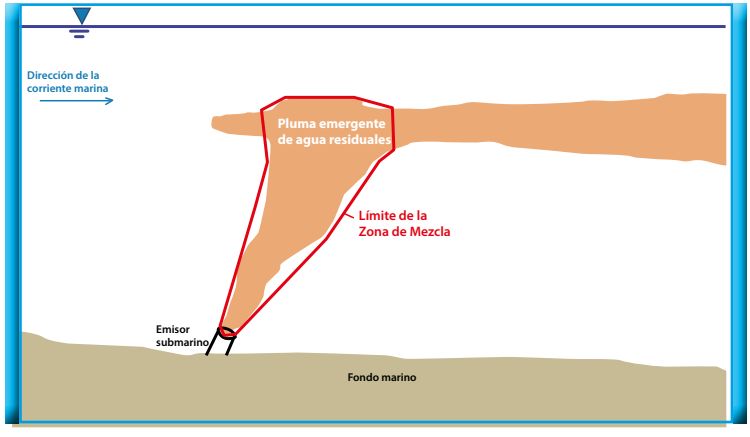
estratificado (punto de emergencia del efluente). En los siguientes gráficos se puede ver el comportamiento de este tipo de aguas residuales tratadas en un cuerpo de agua no estratificado (arriba) y estratificado (abajo).

1.2. Vertimiento de aguas residuales tratadas de igual densidad que las aguas naturales marinas

Las aguas residuales generadas en el uso de aguas saladas, como por ejemplo las aguas residuales de la industria de aceites y harina de pescado[31], tienen la misma o ligeramente menor densidad que las aguas naturales marinas. Cuando estas aguas residuales tratadas son vertidas al mar a través de un emisor submarino, la dilución inicial únicamente es determinada por la mezcla causada por el impulso de las aguas residuales al salir del dispositivo de descarga, y el efecto de la corriente que causa una mezcla lateral en el campo de dilución inicial.

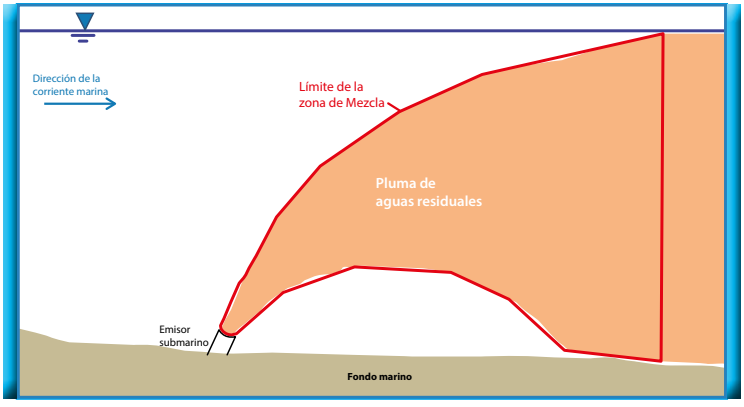
Cuando aguas residuales tratadas de igual densidad que las aguas naturales son vertidas a un ambiente no

Gráfico 21. Zona de mezcla de un vertimiento de aguas residuales de menor densidad que el agua de mar mediante emisor subacuático a un cuerpo natural de agua marino costera con estratificación de la densidad



31 Las aguas residuales tratadas de la industria de harina y aceite de pescado tienen una alta variabilidad de la carga contaminante, temperatura y densidad, dado que comprenden aguas residuales generadas en diferentes procesos. Las aguas residuales de igual densidad que la del agua de mar son: agua de bombeo y agua de limpieza de la planta, equipos y sistemas de tratamiento, cuando para tal fin se usa agua de mar. Las aguas de menor densidad son: las aguas de la columna barométrica de la planta evaporadora, el condensado resultado de la evaporación del agua de cola, que tiene una temperatura mayor que el agua natural, y el agua de limpieza, cuando para tal fin se usa agua dulce. Por lo tanto, los emisores submarinos de la industria de harina y aceite de pescado deben ser evaluados para un efluente de igual densidad que el agua de mar y un efluente de menor densidad. Cabe precisar que en la industria pesquera moderna innovada, el agua de cola resultante del proceso de filtración y prensado de la materia prima no es vertida al mar, dado que se recupera las proteínas contenidas en el agua de cola mediante la evaporación, incrementando la eficiencia de la planta procesadora, mejorando su rentabilidad y reduciendo el impacto ambiental.

Gráfico 22. Zona de mezcla de un vertimiento de aguas residuales de igual densidad que el agua de mar mediante emisor subacuático a un cuerpo natural de agua marino costera sin estratificación de la densidad



estratificado y con significativas corrientes horizontales, se expanden por la turbulencia generada por el impulso de descarga, siendo arrastradas por la corriente natural, donde se mezclan con las aguas naturales por procesos hidrodinámicos y de dispersión.

Este proceso de mezcla continúa hasta que la pluma cubra toda la columna de agua. En este punto se habrá logrado la mezcla completa. El límite de la zona de mezcla corresponde a aquel punto donde la pluma de aguas residuales tratadas ascenderá hasta la superficie, cubriendo toda la columna vertical de agua.

Para el caso de vertimientos de aguas residuales de la industria pesquera de consumo humano indirecto, el "Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hidricos Superficiales, aprobado con R.J. N° 010-2016-ANA, establece que el muestreo del cuerpo receptor deberá realizarse a 200 m del final del emisor, siguiendo la dirección de la corriente prevaleciente, entre otros puntos. Por lo tanto, en la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua se deberá considerar una extensión máxima de la zona de mezcla de 200 m del final del emisor.

1.3. Vertimiento de aguas residuales tratadas de mayor densidad que las aguas naturales marinas

Las aguas residuales tratadas de mayor densidad que las aguas naturales son, entre otras:

- Salmueras de los procesos de desalinización de agua marina mediante la tecnología de osmosis inversa.
- Agua de formación generada en la explotación de petróleo o gas.
- Aguas residuales de la industria de sales minerales.

En este contexto, el tipo de aguas residuales de mayor volumen son las salmueras de los procesos de desalinización de agua marina mediante la tecnología de osmosis inversa, que a continuación se describe amayor detalle.

Las plantas desalinizadoras de agua marina con tecnología de osmosis inversa, trabajan a tasas de rendimiento de 40% hasta 50%; es decir, entre el 50-60% de las aguas tomadas son de rechazo. Las aguas de salmuera no tienen concentraciones significativas de sustancias contaminantes, pero presentan elevada salinidad. Valores característicos de la salinidad están entre 65 y 85 g/L, aproximadamente el doble de la salinidad del agua de mar, que la hacen más densa que el agua natural. La temperatura de la salmuera de las plantas de osmosis inversa es aproximadamente igual que la del agua marina, contrario a las salmueras de plantas desalinizadoras con destilación.

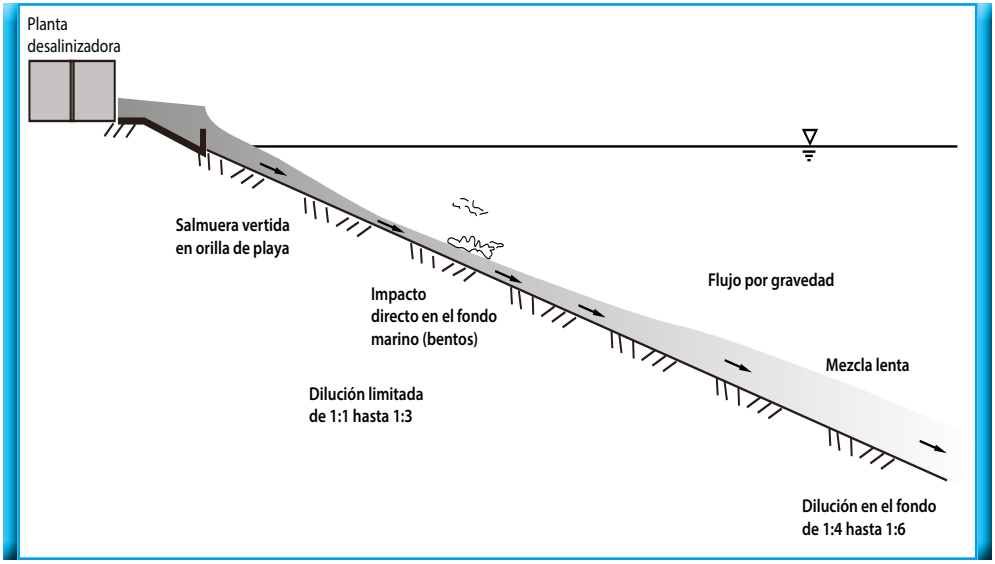
Dados los grandes volúmenes de salmuera generados en el proceso, la única disposición final técnica y económicamente viable es su vertimiento al cuerpo natural de agua marina. Aunque la alta salinidad de las aguas vertidas puede afectar el medio ambiente acuático, un diseño adecuado del dispositivo de descarga puede garantizar altos niveles de dilución inicial en la proximidad de la descarga, reduciendo los impactos ambientales al mínimo.

Otros impactos ambientales pueden generarse cuando las aguas de lavado de los filtros, que contienen altas concentraciones de sólidos suspendidos, son vertidas al mar, donde los sólidos sedimentan en el fondo marino, afectando el libre desarrollo del bentos. Por lo tanto, se debería reducir la materia sedimentable antes de su descarga hasta las concentraciones establecidas en el LMP correspondiente. Las soluciones de limpieza aplicadas a las membranas, que contienen detergentes, ácidos orgánicos, oxidantes y biocidas tales como el formaldehido, deben ser tratadas, neutralizadas y decloradas antes de su disposición final, la cual generalmente se realiza mediante su recolección en estanques, la neutralización del pH y su posterior vertimiento a una red de alcantarillado municipal o dosificación muy lenta a la salmuera dispuesta en el mar.

Vertimiento en la superficie del cuerpo de agua marino costero

Cuando se vierten aguas residuales de mayor densidad que las aguas naturales marinas en la orilla de playa, estas forman una corriente submarina sobre el fondo marino en dirección de la pendiente máxima, tal como se puede apreciar en el Gráfico 23.

Gráfico 23. Formación de una pluma de salmuera vertida en la orilla de playa a un cuerpo de agua natural marino costero



Debido a las bajas velocidades de flujo, se establecen condiciones hidrodinámicas laminares y, en consecuencia, la dilución con el agua de mar es mínima (1:1 hasta 1:3). Por lo tanto, se forman extensas capas de aguas de alta salinidad en el fondo marino, que impactan los ecosistemas bentónicos.

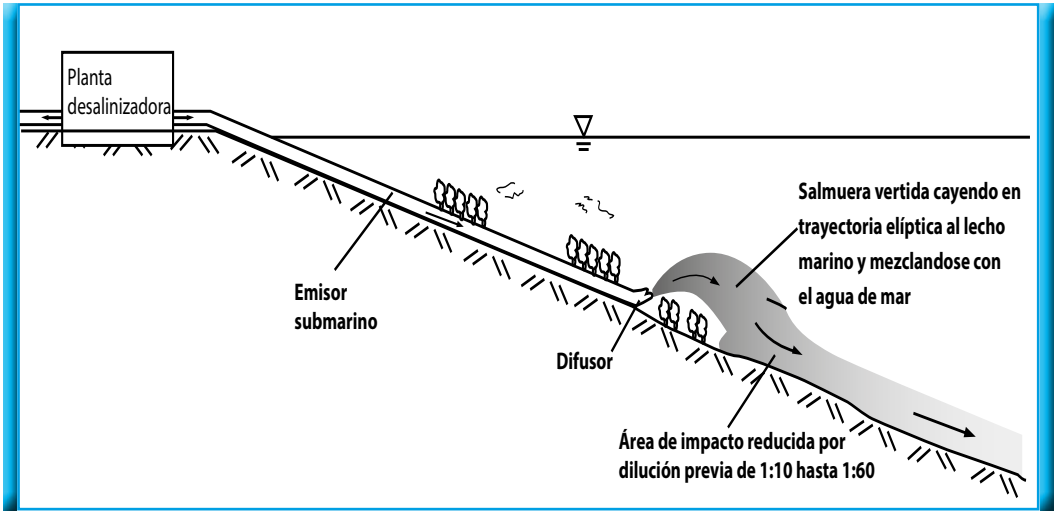
Por esta razón, la descarga de salmueras en la orilla de playa no permitirá una mezcla inicial del efluente suficientemente alta para reducir la salinidad a niveles inocuos para los ecosistemas marino costeros, y se deberá considerar su vertimiento a través de emisores submarinos que proporcionen una mezcla rápida del

efluente en la proximidad de la descarga. También dispositivos de descarga de salmueras en la superficie del cuerpo receptor en lugares de profundidades de algunos metros, instalados por ejemplo en un muelle, pueden ser ambiental y económicamente viables, previo sustento técnico-ambiental en el instrumento de gestión ambiental, mediante la modelación de la zona de mezcla y el cálculo de la dilución inicial.

Vertimiento a través de emisor submarino

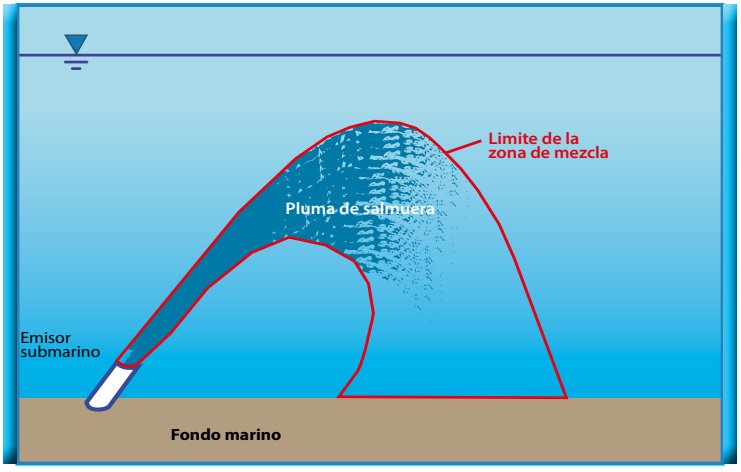
Dado que salmueras son más densas que el agua marina, la dilución inicial únicamente es determinada por la mezcla causada por el impulso de las aguas residuales al salir del dispositivo de descarga, y por su descenso en la columna de agua hasta que tocan el fondo marino.

Gráfico 24. Formación de una pluma de salmuera vertida mediante emisor subacuático a un cuerpo de agua natural marino



Como se puede observar en la figura anterior, las salmueras salen del emisor submarino, recorren una trayectoria elíptica y caen al lecho marino. En este proceso hidrodinámico, las aguas residuales se mezclan con las aguas marinas y las concentraciones de las sustancias contenidas en las aguas residuales y su salinidad se reducen debido a la dilución. El punto de dilución inicial máxima se obtendrá en el límite externo de la pluma que recae sobre el lecho marino.

Gráfico 25. Zona de mezcla de un vertimiento de aguas residuales de mayor densidad que el agua de mar mediante emisor subacuático a un cuerpo natural de agua marino costera



Para lograr una alta dilución inicial, es recomendable usar orificios a 60° calculados desde el plano horizontal, evitando de este modo la mezcla con el mismo efluente, lo cual ocurre al emplear orificios verticales, y a su vez aprovechar al máximo el componente vertical del impulso de descarga de agua para mayor dilución. En estos casos, el número de Froude debería ser mayor que 20 (Salas, 1994).

En el límite de la zona de mezcla, que en el caso específico del vertimiento de salmueras es el fondo marino, las concentraciones de los sólidos suspendidos deben ser inferiores a los ECA-Agua y la salinidad debería tener un nivel que no impacte en el medio ambiente bentónico.

1.4. Emisores con difusores de orificios múltiples

Para una determinada descarga en el mar a través de un emisor submarino, la dispersión inicial es mejorada mediante el uso de un difusor de orificios múltiples. Si la descarga se hace mediante un solo orificio, o sea masivamente, la dispersión y dilución será más lenta que la que ocurriría si se realizara en un área mayor a través de múltiples orificios. En efecto, sin el uso de difusores de orificios múltiples, permaneciendo invariables las otras condiciones, se requieren emisores mucho más largos en aguas profundas para proporcionar el mismo grado de dilución.

El número de orificios depende de su diámetro y es calculado bajo la condición de que el área total de los orificios del difusor debería ser inferior al área de la tubería del difusor, para garantizar el funcionamiento hidráulico del difusor.Si el área total de los orificios excede el área de la tubería, la velocidad media de la descarga por los orificios sería menor que la velocidad de flujo de la tubería, esto es, el flujo tendría que desacelerarse antes de la descarga. Físicamente esto no es posible y, por lo tanto, algunos orificios no descargarían a su máxima capacidad, o no lo harían, anulando de esta manera el propósito del difusor. Brooks (1970) ha propuesto que para asegurar que los orificios descargarán plenamente se debe mantener un número de Froude mayor a 1, lo que en la práctica corresponde a una relación entre el área de la tubería y el área total de los orificios de 1 a 0,9. Frecuentemente se encuentran difusores diseñados con una relación de 1:0,6 hasta 1:0,75.

La longitud del difusor depende del número de orificios y de su separación, que está en función de la superposición de las plumas de aguas residuales singulares. Si los orificios se encuentran a distancias muy grandes, la pluma singular emerge y se comporta como una pluma individual. Cuando la distancia entre los orificios es menor, las plumas se superponen y la dilución disminuye. Eventualmente, cuando las plumas están muy juntas, se sobreponen rápidamente y se comportan como si la descarga fuera realizada desde una ranura; esto es conocido como una fuente lineal. Para determinar la distancia óptima entre los orificios, se aplica un proceso iterativo empleando un modelo numérico: inicialmente se selecciona una distancia grande y posteriormente se reduce la distancia gradualmente, hasta que la dilución inicial se aproxima a la dilución requerida, lo que generalmente resultará en un distancia entre $H \geq S \geq H/3$ (donde H es la profundidad media de descarga y S es la distancia entre los orificios). Esta es la distancia óptima donde se logra la dilución requerida con una longitud del difusor mínima.

Asimismo, para lograr una dilución inicial máxima reduciendo la extensión de la zona de mezcla a un mínimo, el eje del difusor deberá ser colocado perpendicularmente a la dirección de la corriente marina predominante.

1.5. Extensión máxima de la zona de mezcla

Puede ser determinada con los modelos de simulación indicados en el capítulo IV.3.2.1, suponiendo las siguientes condiciones: estratificación mínima de la densidad del cuerpo receptor, corriente horizontal máxima en las diferentes direcciones de flujo y caudal del efluente máximo.

Para minimizar el riesgo de impactos en la salud de las personas que están en contacto directo con las aguas marinas en las actividades recreativas, de impactos en los ecosistemas marino costeros y que no haya afectación de la calidad de los productos

hidrobiológicos producidos, no se podrá establecer una zona de mezcla en las siguientes áreas acuáticas:

- Áreas habilitadas por la Dirección General de Extracción y Producción Pesquera para Consumo Humano Directo, Ministerio de Producción, para desarrollar actividades de acuicultura, a menos que el vertimiento industrial autorizado sea anterior en las áreas que se indican.
- Áreas donde el Ministerio de Producción ha otorgado un derecho de uso acuícola, a menos que el vertimiento industrial autorizado sea anterior en las áreas que se indican.
- Aguas superficiales donde se realizan actividades recreativas de contacto primario, incluyendo actividades como, por ejemplo, la natación o similares.[32]
- Áreas Naturales Protegidas en el Ámbito Marino o Marino costero, salvo que se cuente con la opinión favorable del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado del Ministerio del Ambiente.
- Ecosistemas frágiles según su definición por la Ley General del Ambiente, Ley Nº 28611, artículo 99, numeral 99.2, que comprende, entre otros, las bahías.[33]

En las áreas acuáticas indicadas no se puede aprovechar la dilución con el agua natural que ocurre en la zona de mezcla, y se deberá alejar el punto de vertimiento mediante la reubicación del dispositivo de descarga, salvo que la calidad de las aguas residuales tratadas a verter sea la correspondiente a los ECA-Agua para la categoría que corresponda.

Asimismo, en el caso de emisores submarinos instalados en proximidad de bahías, existe un alto riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo, dadas las bajas velocidades de corrientes, el bajo grado de intercambio de las aguas naturales y el consecuente riesgo de acumulación de contaminantes en las aguas de la bahía. Por lo tanto, es altamente recomendable que la parte final del emisor submarino (difusor) esté ubicado fuera de la bahía, asegurando que el vertimiento no retorne a ella en ningún nivel de la columna de agua. Esto deberá ser demostrado mediante la modelación numérica de la dilución inicial y del transporte horizontal alejado de la zona de mezcla.

32 En tanto la autoridad de salud no determine las aguas superficiales destinadas a uso recreativo de contacto primario, se deberá considerar como zona sensible una franja de 300 m desde la orilla de las playas, según su definición en el artículo 1º de la Ley Nº 26856. La distancia de 300 m de la orilla de playa es aplicada para la definición de zonas de actividades recreativas de contacto primario por varios países, entre ellos Brasil, y por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1988).

33 Los ecosistemas frágiles son aquellos reconocidos por las autoridades ambientales y sectoriales mediante Resolución Ministerial, a propuesta del Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA (hoy Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas – SERNANP).
Véase http://www.csgnetwork.com/h2odenscalc.html

2. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UN VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A UN CUERPO DE AGUA MARINO COSTERO

Para la evaluación del efecto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo receptor marino costero es necesario contar con información sobre las condiciones ambientales del vertimiento, como la configuración del cuerpo natural de agua, la batimetría y las corrientes marinas.

Asimismo, se deberá conocer el perfil vertical de la densidad del agua natural en el punto de vertimiento en las diferentes estaciones del año, el cual es un factor determinante de la dilución inicial de las aguas residuales tratadas en el cuerpo marino.

Cuando las aguas residuales tratadas contienen patógenos, es de particular importancia el conocimiento de la distancia entre la descarga y las áreas sensibles a la contaminación microbiológica, y de las corrientes hacia estas zonas, donde el impacto sobre actividades recreativas y de acuicultura puede imponerse, si la longitud del emisor no es suficiente para proporcionar el tiempo necesario para la eliminación de los agentes biológicos patógenos transportados por las corrientes hacia estas zonas.

También las características de las aguas residuales tratadas vertidas son determinantes de la dilución inicial; por lo tanto, se deberá estimar el caudal máximo de vertimiento, la densidad del efluente, las sustancias contenidas en las aguas residuales tratadas y sus concentraciones en las condiciones más críticas.

Las concentraciones de los compuestos químicos y las densidades de los parámetros microbiológicos en el cuerpo receptor son otros factores a considerarse, dado que determinan la capacidad del cuerpo receptor de asimilación de la carga contaminante del vertimiento de aguas residuales tratadas.

Otros parámetros imprescindibles para la evaluación del impacto de un vertimiento a través de un emisor submarino son: la profundidad de la descarga en el cuerpo de agua, el número de orificios, la distancia entre ellos, la orientación de los difusores y las características de diseño de los orificios.

2.1. Corrientes marinas

Un factor muy importante para la evaluación de la dilución inicial, de la extensión de la zona de mezcla y de los impactos en las zonas sensibles a la contaminación microbiológica, son las corrientes marinas; pues poseer datos de las direcciones de las corrientes, la velocidad de la corriente en varias profundidades y ubicaciones para todas las épocas del año y en marea ascendente y descendente, permite hacer estimaciones adecuadas sobre los efectos de dilución, dispersión y transporte de campo, y es indispensable para una estimación adecuada en el análisis de riesgos.

Los vectores de la velocidad de las corrientes marinas son determinados con base en estudios de las corrientes oceanográficas, o del modelamiento de las corrientes marinas. Los estudios oceanográficos abarcan, generalmente, el empleo intensivo de flotadores con vela de arrastre sumergida. Tales mediciones deberán concentrarse en la posición estimada del difusor. Para la determinación de las corrientes a diferentes profundidades, se emplean flotadores cuya vela de arrastre se encuentre a la profundidad de interés. Para poder determinar las velocidades mínimas de la corriente marina, que puede ser aplicada en la simulación de la dilución inicial mínima, se recomienda emplear medidores continuos, tales como el Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) u otro instrumento de medición continua reconocido por la Dirección de Hidrografía y Navegación, con un periodo mínimo de 30 días de medición, y realizar una evaluación de los resultados de la medición empleando una metodología estadística. No obstante, en la mayor parte de los casos será suficiente con la realización de medidas de la corriente marina a varias profundidades en la columna de agua marina, durante las diferentes estaciones del año y las épocas de transición (cuatro campañas).

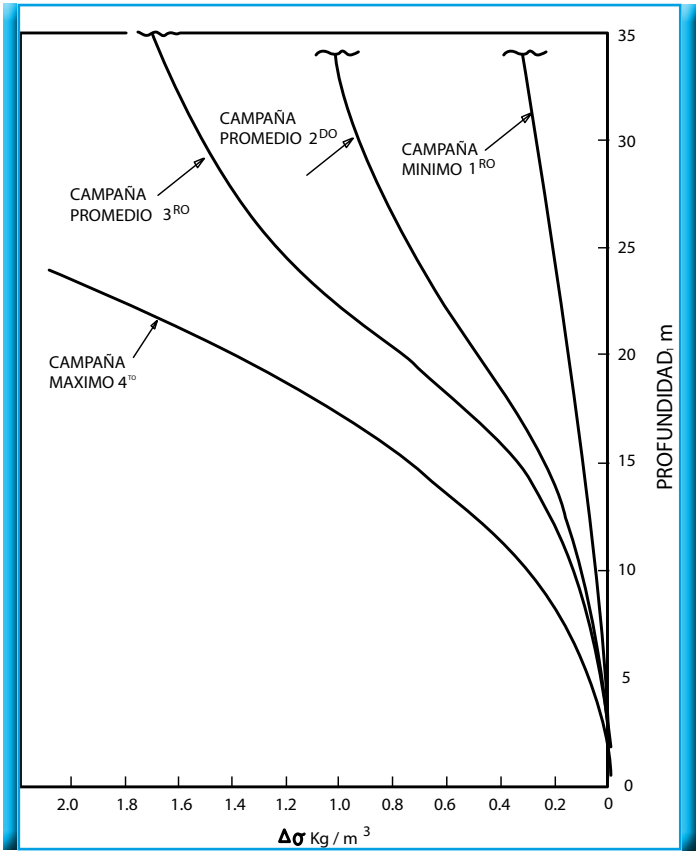
En el caso de aplicar el modelamiento de las corrientes marinas, el modelo debería ser calibrado y validado con los resultados de por lo menos dos (2) campañas de medición de las corrientes, realizadas en las diferentes estaciones del año.

2.2. Densidad del agua natural marina

Debido a la variabilidad vertical de la temperatura y/o salinidad, las aguas receptoras no están homogéneamente mezcladas en la profundidad; es decir, son más densas en el fondo que cerca de la superficie, lo cual produce una estratificación. Tales condiciones se encuentran en cuerpos de agua marinos cálidos, particularmente en el norte del Perú, donde la estratificación es ocasionada por un gradiente térmico con mayores temperaturas en la superficie (= menor densidad) y menores temperaturas en el fondo (= mayor densidad). Usualmente, en el verano habrá estratificación térmica máxima y en el invierno estratificación mínima. Un ejemplo de las curvas de estratificación térmica de la densidad se muestra en el gráfico 26.

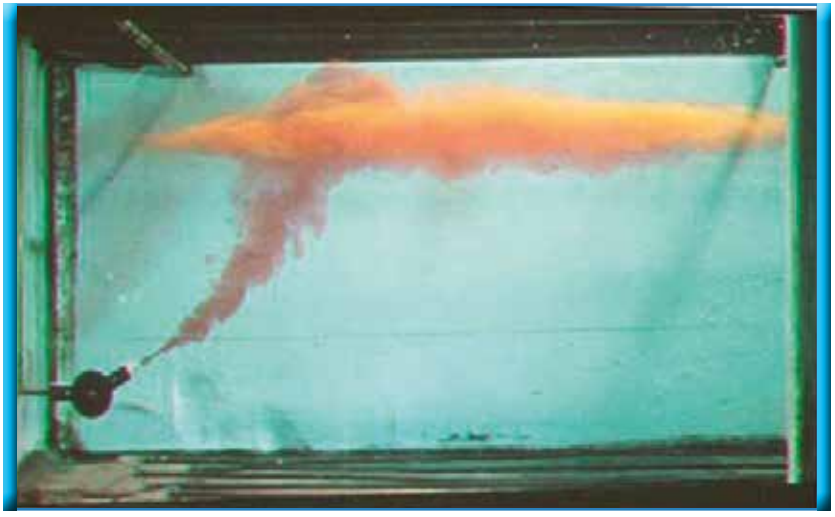
Otro caso en el que se encuentra una estratificación significativa de la densidad , son los lugares donde se descargan al mar grandes cantidades de agua dulce, es decir, los estuarios y los cuerpos de agua marino costeros en la proximidad de la desembocadura de ríos o canales. Aquí, las aguas dulces (menor densidad) se superponen a las aguas saladas (mayor densidad), causando gradientes de densidad verticales y horizontales significativos. Este fenómeno puede extenderse hasta algunos kilómetros mar adentro. Cabe señalar, que la estratificación será máxima durante los periodos de mayor caudal de descarga de agua dulce.

Gráfico 26. Curvas ejemplares de la estratificación térmica de la densidad en diferentes estaciones del año (Ludwig, 1988)



La variabilidad de la densidad con la profundidad tiene un efecto significativo en la dilución inicial, y puede evitar que la pluma de aguas residuales tratadas vertidas alcance totalmente la superficie (véase el gráfico 27).

Gráfico 27. Formación de una pluma emergente de aguas residuales en un cuerpo de agua natural marino con estratificación térmica de la densidad (instalación experimental de K. Hofer, VAW, Zúrich)



En el caso de vertimientos a cuerpos marinos del extremo norte del Perú (6º latitud sur), en estuarios o en la proximidad de las desembocaduras de los ríos o canales de agua dulce, se deberá determinar la estratificación de la densidad del cuerpo natural de agua en las diversas estaciones del año en, por lo menos, cuatro tomas de muestra en el punto de vertimiento propuesto a diferentes profundidades, con un muestreador de agua profunda y realizar la medición inmediata de temperatura y densidad con el densímetro. En alternativa a la medición de la densidad, se podrá medir la temperatura y la salinidad, para luego calcular la densidad con los algoritmos integrados en los software de simulación de la dilución inicial o los aplicativos publicados por autoridades ambientales internacionales, como por ejemplo la "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)".

También se podrá calcular la densidad manualmente usando la siguiente ecuación (El-Dessouky y Ettouny, 2002), que es aplicable para salinidades de 0 a 160 ppt y temperaturas entre 10 ºC y 100 ºC a una presión de 1 atm:

$$\rho = A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + A_4F_4 \ [kg/L]$$

Donde:

$A = (2T - 200)/160$

T : temperatura del agua en ^{o}C

$F_1 = 0,5$

$F_2 = A$

$F_3 = 2A^2 - 1$

$F_4 = 4A^3 - 3A$

$A_1 = 4,032219G_1 + 0,115313G_2 + 3,26 \cdot 10^{-4}G_3$

$B = (2Sal-150)/150$

Sa : salinidad en ppt (partes por mil) o gramos por litro (g/L)

$G_1 = 0,5$

$G_2 = B$

$G_3 = 2B^2 - 1$

$A_2 = -0,108199G_1 + 1,571 \cdot 10^{-3}G_2 - 4,23 \cdot 10^{-4}G_3$

2.3. Determinación de las concentraciones en el cuerpo natural de agua

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, es necesario contar con información respecto a las concentraciones de los parámetros que ya se encuentran en él , las cuales se determinan a través de la toma de muestra de agua y el análisis en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Los parámetros que se analizan son aquellos que estarán potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas. De forma referencial, se recomienda analizar los parámetros definidos para las diferentes actividades y categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural en la tabla 2 (capítulo I.2) y, adicionalmente, las sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, que están indicados en los ECA-Agua en la categoría correspondiente.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua marino, se realizará por lo menos cuatro tomas de muestra con una frecuencia trimestral en la ubicación del vertimiento proyectado en diferentes profundidades, que deben ser seleccionadas en función de la estratificación térmica del cuerpo de agua[35]. La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor debería ser realizada en las mismas fechas en las cuales se determina las corrientes y la estratificación térmica, en el marco del estudio oceanográfico.

En el caso de la adecuación de un vertimiento en curso a la normatividad ambiental, el punto de toma de muestra deberá ser ubicado fuera de la zona

35 Estratificación térmica de la densidad se encuentra en cuerpos de agua marinos cálidos, particularmente en el extremo norte del Perú (6º latitud sur).

de influencia del vertimiento actual, es decir, a una distancia de algunas centenas de metros del punto de vertimiento en curso, en dirección contraria a la dirección de las corrientes predominantes.

3. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ECA-AGUA

La evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo de agua marino efectuado a través de un emisor submarino, debería comprobar que el diseño del difusor submarino, o de otro dispositivo de descarga, proporciona una dilución inicial mínima -S_a- que es mayor que la dilución requerida -S_{max}-.

$$S_a > S_{max}$$

Si esta inecuación da un resultado correcto, las concentraciones de los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas en el límite de la zona de mezcla serán inferiores a los ECA-Agua.

Para calcular la probable concentración máxima en el límite de la zona de mezcla - $C_{LZDM,i}$ - se podrá usar la siguiente ecuación:

$$C_{LZDM,i} = \frac{(C_{vert,i} + S_a \times C_{RH,i})}{(S_a + 1)}$$

La probable concentración máxima en el límite de la zona de mezcla deberá ser inferior al ECA-Agua correspondiente:

$$C_{LZDM,i} \leq C_{ECA,i}$$

Donde:

$C_{vert,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el efluente, determinada según el capítulo I.3.

S_a : Dilución inicial mínima que proporciona el dispositivo de descarga, determinada según el capítulo IV.3.2.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural determinada según lo indicado en el capítulo IV.2.3.

i : Representa los parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, determinados según el capítulo I.2.

En el caso de que el diseño del difusor submarino no proporcione una dilución inicial suficiente –es decir, $S_a < S_{max}$–, se deberá reconsiderar el diseño del emisor submarino incrementando el número de orificios, el espacio entre ellos, la longitud del emisor para lograr una mayor profundidad de descarga o, en su defecto, disminuyendo el diámetro de los orificios, entre otras opciones de diseño. Alternativamente, se podrá prever mecanismos que permitan reducir el caudal o las concentraciones del efluente considerando, por ejemplo: la implementación de tecnologías limpias que

reduzcan el volumen y/o la carga de las aguas residuales generadas, el reúso/recirculación parcial o total de las aguas residuales, o modificando el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de los parámetros críticos. Para este caso, se podrá calcular la concentración máxima admisible del vertimiento (Cvert,admi), que permitirá cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, con la siguiente ecuación:

$$C_{vert,admi} = S_a \text{ x } (C_{ECA,i} - C_{RH,i}) + C_{ECA,i}$$

Esta ecuación es aplicable también para determinar la concentración máxima en el efluente, que permite cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, de los parámetros no reglamentados por el sector con un LMP. Esta concentración máxima podrá ser usada como un criterio de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En el caso de que el parámetro evaluado se encuentre en el cuerpo natural de agua en concentraciones superiores al Estándar de Calidad Ambiental correspondiente, es decir CRH ≥ CECA, su concentración en las aguas residuales tratadas vertidas deberá ser igual o menor que la concentración en el cuerpo receptor:[36]

$$C_{vert} \leq C_{RH}$$

En estas condiciones, el vertimiento no causará un incremento de la concentración en el cuerpo receptor, y no creará un impacto adicional en el cuerpo natural de agua afectado por otras fuentes de contaminación.

En caso se pueda demostrar que un cuerpo de agua presenta parámetros en concentraciones superiores a los ECA-Agua por sus condiciones naturales, este cuerpo de agua podrá ser exceptuado de la aplicación de determinados ECA-Agua (artículo 6 del D. S. N°004-2017-MINAM). Administrativamente, la excepción es realizada mediante la aprobación por la ANA del estudio técnico que sustente la influencia natural de una zona en particular sobre la calidad de las aguas naturales. Asimismo, la ANA deberá comunicar al MINAM los cuerpos de agua y los parámetros de excepción.

3.1 Determinación de la dilución inicial requerida (S_{max})

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (S_{max}) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(Si\ ,\ S_{(i+1)}\ ,\ \ldots\ ,\ S_{(i+n)}) \quad \text{y}$$

$$S_i = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C_{RH,i})}$$

36 Véase Ley Nº 28611, Ley General del Ambiente, artículo 121: "Del vertimiento de aguas residuales, El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes."

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$: Dilución necesaria para respetar los ECA-Agua del parámetro i o i+n respectivamente.

i, i+n: Parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, determinados según el capítulo I.2.

$C_{vert,i}$: Concentración del parámetro i en el efluente, determinada según el capítulo I.3.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural determinada según lo indicado en el capítulo IV.2.3.

S_{max} : Dilución requerida para cumplir con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla, definida como el valor máximo de los factores de dilución calculados para los parámetros relevantes para el tipo de efluente.

Exclúyase del cálculo de la dilución requerida a los parámetros microbiológicos, dado que estos no deberán ser evaluados en el límite de la zona de mezcla donde ocurre la dilución inicial, si no en el campo lejano con una metodología diferente descrita en el capítulo IV.4.

Determinación de la dilución inicial requerida para el vertimiento de salmueras

Para el vertimiento de salmueras al mar, el Ministerio del Ambiente (MINAM) propuso una diferencia máxima de los sólidos totales disueltos de 4 g/L con respecto al contenido natural del mar, a cumplirse en el límite de la zona de mezcla.[37]

Con concentraciones de sólidos disueltos en las salmueras de las plantas de osmosis inversa de 65 g/L hasta 85 g/L y una concentración de sólidos disueltos en el agua natural marina de 35 g/L, obtenemos una dilución requerida –SSTD– de:

$$S_{STD} = \frac{(C_{vert,STD} - C_{ECA,STD})}{(C_{ECA,STD} - C_{RH,STD})} = \frac{(C_{vert,STD} - (C_{RH,STD} + 4\ g/L))}{((C_{RH,STD} + 4\ g/L) - C_{RH,STD})} = \frac{(65 \text{ hasta } 85) - (35 + 4)}{4} = 7 \text{ hasta } 12$$

La propuesta del MINAM mencionada anteriormente constituye un proyecto de norma que hasta la fecha no ha sido aprobada, que corresponde al criterio aplicado por la US-EPA (diferencia máxima de la salinidad de 4 g/L con respecto a la salinidad natural, a cumplirse en el límite de la zona de mezcla). Sin embargo, debería considerarse que no todos

37 Resolución Ministerial Nº 031-2014-MINAM: Publicación del Proyecto de Decreto Supremo que aprueba los Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Plantas Desalinizadoras, de fecha 3 de febrero de 2014.

los ecosistemas toleran un incremento de la salinidad de 4 g/L, como es el caso del molusco bivalvo *Crassostrea gigas* u ostra del Pacífico, que es más sensible al incremento de salinidad. En el caso de incrementos de 1,5 g/L, la tasa de supervivencia de larvas se reduce 10%, pero con incrementos de 2,5 g/L la reducción de la tasa de supervivencia alcanza a 100%. También a nivel internacional frecuentemente se encuentran límites más restrictivos. En Japón, las autoridades ambientales han establecido la salinidad máxima admisible en el fondo marino con 2 g/L superiores a la salinidad natural. En Abu Dabi, se reglamentó un delta de salinidad máximo de 1,75 g/L a cumplirse en el límite de la zona de mezcla, y en Omán el delta de salinidad debería ser menor de 2 g/L en una distancia no mayor de 300 m del difusor. En Australia, el Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) especifica en la Guía para Aguas Continentales y Marinas que el incremento medio de salinidad tiene ser inferior a 5% respecto a la salinidad natural del ambiente, lo que en mares de Australia equivale aproximadamente a un incremento de la salinidad de 1,5 g/L. Por lo que, para evitar algún daño al ecosistema en el cual se están vertiendo las aguas de las plantas desalinizadoras, se recomienda realizar estudios específicos en los ecosistemas marinos locales y su tolerancia a las variaciones de la salinidad, y adecuar el cálculo de la dilución requerida según corresponda.

3.2. Determinación de la dilución inicial mínima (Sa)

La dilución inicial mínima (Sa) es el principal factor para el diseño de sistemas de descarga a cuerpos de agua marinos. En la literatura mundial suele encontrarse diseños de emisores submarinos con diluciones iniciales entre 50 y 200, alcanzando diluciones significativamente mayores en el caso de velocidades de corriente altas, o cuando las aguas residuales tienen la misma densidad que el agua natural.

La evaluación de la dilución inicial mínima –Sa– proporcionada por el difusor submarino propuesto, deberá ser realizada mediante el uso de los modelos numéricos descritos a continuación. Alternativamente, para la evaluación de los vertimientos de aguas residuales de menor densidad que el agua de mar, como por ejemplo vertimientos de aguas residuales doméstico-municipales o de industrias manufactureras, se podrá hacer uso de las metodologías simplificadas que se describen en el numeral IV.3.2.2.

Modelos numéricos para la determinación de la extensión de la zona de mezcla y de la dilución inicial

En la actualidad existen diferentes modelos numéricos que simulan los complejos procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de mezcla. Realizada mediante paquetes de software especializado, que además permiten el ingreso de los datos a través de interfaz gráfica y la representación de los resultados de la simulación en tablas, gráficos e imágenes en 2D y 3D.

Con tal propósito, se recomienda los modelos de

simulación auspiciados por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la US-EPA, el cual distribuye programas (software) aptos para determinar la dilución inicial de las aguas residuales vertidas a cuerpos receptores marinos, la extensión de la zona de mezcla inicial, la temperatura del agua en el límite de la zona de mezcla y el decaimiento de los coliformes en el campo lejano. Entre estos modelos de simulación, se cuenta con el software libre Visual Plumes[38] (USEPA, 2003) y el software CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System), el cual se basa en los principios, criterios y metodologías establecidos en el estudio Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments de Norman H. Brooks y el estudio Dilution Models for Effluent Discharges de D. J. Baumgartner, W. E. Frick y P. J. W. Roberts. También puede hacerse uso de otro modelo aplicable para la simulación de los procesos hidrodinámicos en el campo cercano de un vertimiento de aguas residuales.

Mediante el modelamiento debidamente sustentado en todas las variables y constantes aplicadas, se deberá comprobar que el diseño del difusor submarino proporciona una dilución inicial mínima –Sa– que es mayor que la dilución requerida –Smax–, para respetar los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla; es decir, en la superficie o en el punto de altura máxima de la subida en un ambiente estratificado (punto de emergencia del efluente) o en el lecho marino, cuando se trata de aguas residuales de mayor densidad que el agua de mar.

Las condiciones más críticas en términos de dilución, comprende el escenario de velocidad de corriente nula, estratificación del cuerpo de agua marino máxima y caudal del efluente máximo. Aplicando estas condiciones para el modelamiento, se obtiene un diseño del emisor conservativo, que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua en todo momento. Sin embargo, cuando se dispone de datos de corriente determinados mediante medidores continuos en un periodo mínimo de 30 días, se podrá aplicar el percentil de 20% de todos los datos de velocidad registrados como la corriente mínima de diseño (correspondiente a la velocidad que en 80% de las mediciones fue superada).

En el caso del vertimiento de aguas de alta temperatura ($T > 35$ °C), como las aguas de refrigeración de plantas termoeléctricas o las salmueras de los procesos de desalinización de agua marina mediante la tecnología de destilación multietapa (Multi-stage Flash Distillation – MFS), se deberá comprobar que la dilución inicial sea mayor que la dilución requerida para el cumplimiento de los ECA-Agua de los parámetros críticos, y adicionalmente, que el incremento de la temperatura en el límite de la zona de mezcla no sea mayor de 3 °C con relación a la temperatura natural del agua.[39]

Para la determinación de la extensión máxima de la zona

38 Visual Plumes está disponible con licencia libre en http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/visual-plumes
39 ECA-Agua de la temperatura en cuerpos de agua marinos de categoría 2 y 4.

de mezcla se aplica la corriente horizontal máxima en las diferentes direcciones de flujo, estratificación del cuerpo de agua marino mínima y el caudal del efluente máximo.

Metodologías simplificadas para la determinación de la dilución inicial

Las metodologías simplificadas son ecuaciones determinísticas que permiten simular los procesos de dilución inicial, y se diferencian de los modelos numéricos (software) por su simplicidad y el número reducido de datos de ingreso (no requieren de datos de la corriente marina).

Sin embargo, se recomienda su aplicación para la evaluación de pequeñas descargas submarinas al mar solamente, dado que dan resultados muy conservativos. En el caso de descargas grandes, como por ejemplo de zonas urbanas, la realización de estudios oceanográficos y la aplicación de un software de modelación es la opción económicamente más viable, dado que resultará en una evaluación más exacta, un diseño del dispositivo de descarga optimizado y, por consiguiente, en un menor costo de construcción.

Los modelos matemáticos presentados en los siguientes capítulos son aplicables para el vertimiento a través de emisores submarinos de aguas residuales tratadas que tengan una menor densidad que las aguas naturales marinas, entre otras:

- Aguas residuales tratadas doméstico-municipales.
- Aguas residuales tratadas industriales generadas en el uso de aguas dulces.

Nótese que las metodologías descritas no son aplicables para descargas en la superficie del cuerpo receptor, ni para vertimientos de aguas residuales de igual o mayor densidad que el agua de mar. Este tipo de vertimientos debería ser evaluado con los modelos numéricos indicados en el numeral IV.3.2.1.

Emisores submarinos con un solo orificio

La dilución inicial de un emisor con un solo orificio en condiciones de corriente nula puede ser calculada con la ecuación propuesta por Brooks (1973):

$$S_a = 0{,}155 \times gd'^{1/3} \times z_{max}5/3 \; / \; Q^{2/3}$$

Donde:

$$g_d' = g \times \Delta\rho \; / \; \rho_o$$

g : fuerza de gravedad, g = 9,80665 m/s^2.

$\Delta\rho$: diferencia entre la densidad del agua natural y la densidad del efluente en kg/L; valor normal para aguas marinas y aguas residuales tratadas doméstico-municipales: 1,0258-0,9995=0,0263 kg/L.

ρ_o : densidad del agua natural en kg/L; valor normal para aguas marinas: 1,0258 kg/L.

z_{max} : elevación de ascenso máxima, en metros, que se determina en un ambiente estratificado como se encuentra estacionalmente en los cuerpos marino costeros del norte del Perú (Brooks, 1973):

$$z_{max} = 2{,}91 \times gd'^{1/4} \times Q^{1/4} \; / \; G^{3/8}$$

$$\text{con } G = (g/\rho_o) \times (\Delta\sigma/H)$$

Cuando la ecuación anterior arroja un valor z_{max} mayor que la profundidad de descarga, el cuerpo receptor corresponde a un ambiente no estratificado, característico de los cuerpos marino costeros del centro y sur del Perú. En este caso: $z_{max} = H$

Q : caudal máximo de vertimiento en m^3/s.

H : profundidad de descarga, en metros.

$\Delta\sigma$: variación de densidad en la columna de agua marina expresada en kg/L (diferencia de la densidad en profundidad de la descarga y en la superficie determinada según el capitulo IV.2.2. Ejemplo: salinidad=35 ppt, temperatura en superficie: 22 °C, temperatura en el fondo: 18 °C, $\Delta\sigma$=0,001141 kg/L).

4. EMISORES CON DIFUSORES DE ORIFICIOS MÚLTIPLES

La dilución inicial de un emisor con orificios múltiples en condiciones de corriente nula puede ser calculada con la ecuación propuesta por Roberts (1977 y 1980):

$$Sa = 0{,}38 \times jo^{1/3} \times z_{max} / q \quad (\text{válido para } F \leq 0{,}1)$$

Donde:

F : número de Froude en el campo ascendiente de aguas residuales, $F = U^3 / j_o$.

j_o : flujo impulsado por la fuerza vertical ascendente por metro de difusor, en m^3/s^2.

$$j_o = q \times g \times \Delta\rho / \rho_d$$

q : caudal lineal de vertimiento en $m^3/(s \cdot m)$, $q = Q / LD$.

Q : caudal máximo de vertimiento en m^3/s.

L_D : longitud del difusor en m.

g : fuerza de gravedad, $g = 9{,}80665\ m/s^2$

$\Delta\rho$: diferencia entre la densidad del agua natural y la densidad del efluente en kg/L; valor normal para aguas marinas y aguas residuales doméstico-municipales: 1,0258-0,9995=0,0263 kg/L.

ρ_d : densidad del agua residual en kg/L; valor normal para aguas residuales tratadas doméstico-municipales: 0,9995 kg/L.

z_{max} : elevación de ascenso máxima en un ambiente estratificado, expresada en metros, que se calcula con la ecuación propuesta por Wright (1984):

$$z_{max} = 2{,}84 \times j_o^{1/3} \times \left[\frac{\rho_o \times H}{g \times \Delta\sigma} \right]^{1/2}$$

Cuando la ecuación anterior arroja un valor z_{max} mayor que la profundidad de descarga o cuando la diferencia de la densidad en la profundidad de la descarga y en la superficie - $\Delta\sigma$ – sea nula, el cuerpo receptor corresponde a un ambiente no estratificado. En este caso:

$$z_{max} = H$$

ρo : densidad del agua natural, valor normal 1,0258 kg/L.

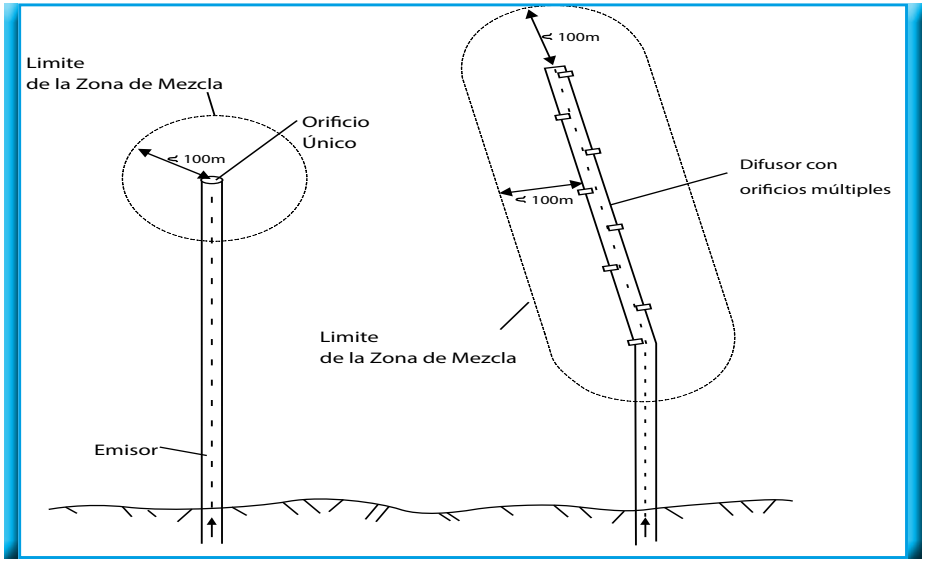
$\Delta\sigma$: variación de densidad en la columna de agua marina expresada en kg/L (diferencia de la densidad en la profundidad de la descarga y en la superficie. Ejemplo: salinidad=35 ppt, temperatura en superficie: 22 ^{o}C, temperatura en el fondo: 18 ^{o}C, $\Delta\sigma$=0,001141 kg/L).

H : profundidad media de descarga, en metros.

5. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Dado que las metodologías simplificadas descritas anteriormente no permiten determinar la extensión de la zona de mezcla, se podrá emplear el criterio aplicado por la US-EPA, que define la zona de mezcla con un área acuática que tiene una extensión máxima de 100 m, medidos desde el difusor en todas las direcciones.

Gráfico 28. Límite de la zona de mezcla a aplicarse en defecto del cálculo de la extensión máxima de la zona de mezcla mediante un modelo de simulación numérico



6. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE VERTIMIENTOS CON CARGA DE PATÓGENOS

Para los vertimientos de efluentes con carga de patógenos a un cuerpo de agua marino costero, se deberá comprobar que no haya impacto negativo en zonas sensibles en proximidad del vertimiento, demostrando que la densidad de los coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible será inferior al ECA-Agua correspondiente. Las zonas sensibles a patógenos son cuerpos de agua marino costeros usados para la producción y extracción de moluscos u otras especies hidrobiológicas[40] y para actividades recreacionales.[41]

Para esta evaluación se puede aplicar la metodología convencional siguiente, o, alternativamente, los modelos numéricos *(software)* que permiten la simulación del transporte horizontal, la dispersión y el decaimiento de los coliformes. Independientemente de la metodología aplicada, se recomienda determinar la tasa de desaparición de coliformes (T_{90}) con la metodología descrita en el numeral IV.4.3.

El tiempo de transporte desde el vertimiento hasta el límite de la zona sensible (Tt) debería ser mayor que el tiempo de residencia mínimamente requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes, a los niveles del ECA-Agua ($T_{residencia,min}$)

$$T_t > T_{residencia,min}$$

En el caso de que el tiempo de transporte desde el vertimiento hasta el límite de la zona sensible sea menor que el tiempo de residencia mínimamente requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes a los niveles del Estándar de Calidad Ambiental ($T_t < T_{residencia,min}$), será necesario aumentar la distancia del difusor de la zona sensible para aumentar el tiempo de transporte o, alternativamente, reduciendo la carga microbiológica del vertimiento proyectando los sistemas de tratamiento correspondientes. Sin embargo, no se recomienda la cloración de las aguas residuales de alta carga orgánica, considerando el riesgo de formación de trihalometanos que pueden afectar al medio ambiente acuático.

6.1. Determinación del tiempo de transporte

El tiempo de transporte desde el vertimiento hasta el límite de zona sensible (Tt) se calcula con:

$$T_t = \frac{D}{U \times 3600}$$

40 Áreas habilitadas por la Dirección General de Pesca para Consumo Humano Directo e Indirecto, Ministerio de Producción, para desarrollar actividades de acuicultura y áreas donde el Ministerio de Producción ha otorgado un derecho de uso acuícola.

41 Aguas superficiales destinadas al uso recreativo de contacto primario por la autoridad de salud, incluyendo actividades como natación, esquí acuático, buceo libre, surf, canotaje, navegación en tabla a vela, moto acuática, pesca submarina o similares. En tanto la autoridad de salud no determine las aguas superficiales destinadas para uso recreativo de contacto primario, se recomienda considerar como zona sensible una franja de 300 m desde la orilla de las playas según su definición en el artículo 1 de la Ley Nº 26856. La distancia de 300 m de la orilla de playa es aplicada para la definición de las zonas de actividades recreativas de contacto primario por varios países, entre ellos Brasil, y por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1988).

Donde:

U : vector de velocidad máxima, en m/s. Esta velocidad deberá ser determinada para las diferentes estaciones del año mediante flotadores con vela de arrastre en varias profundidades, o con el modelamiento de las corrientes marinas (véase el capítulo IV.2.1).

D : distancia mínima desde el vertimiento hasta el límite de la zona sensible en dirección de la corriente marina, en metros. En el caso de situaciones de flujo complejo con vectores de corriente que describen curvas, la distancia deberá ser determinada siguiendo las curvas de los vectores, desde el vertimiento hasta el límite de las zonas sensibles.

En la identificación de las zonas sensibles potencialmente impactadas, se deberá considerar la dispersión horizontal de la pluma de aguas residuales en el campo lejano. Esto es de particular importancia en el caso de que la corriente marina sea paralela al límite de la zona sensible, situación frecuente en zonas recreativas de contacto primario y corriente paralela a la orilla de playa. En los siguientes gráficos se representa cómo se deberá considerar la dispersión horizontal para la determinación de las zonas sensibles potencialmente impactadas y de la distancia D.

Gráfico 29. Dispersión horizontal de la pluma de aguas residuales en el campo lejano y punto de impacto en la zona de actividades recreativas de contacto primario

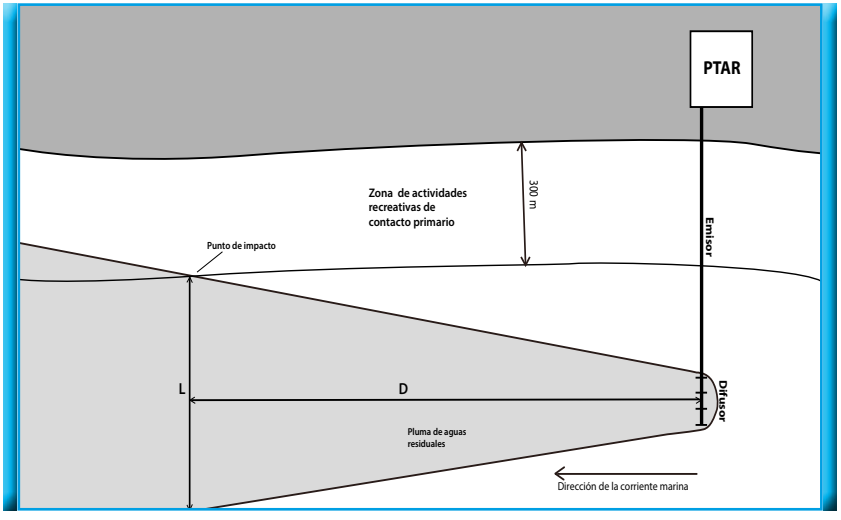
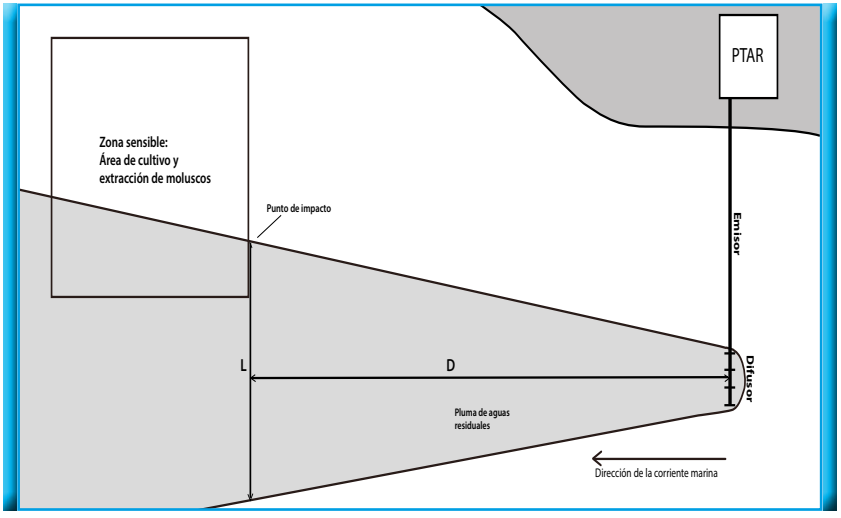


Gráfico 30. Dispersión horizontal de la pluma de aguas residuales en el campo lejano y punto de impacto en el área de cultivo y extracción de moluscos



L : ancho de la pluma en la distancia D del vertimiento en metros, que se puede calcular con la ecuación de mezcla turbulenta de Brooks (1960):

$$L = b \times \left(1 + \frac{8 \times \alpha \times D}{U \times b^{2/3}} \right)^{3/2}$$

b : ancho de la pluma emergiendo a la superficie, en metros, que se puede calcular con:

$$b = L_d \times \cos(90 - \gamma) + 0{,}5 \times H_{med}$$

Ld : longitud del difusor, en metros. En caso de orificio único: $L_d = 0$.

γ : ángulo en el plano horizontal entre el vector de la corriente marina -U- y el eje central del difusor, en grados sexagesimales.

H_{med} : profundidad media de descarga, en metros.

α : coeficiente de dispersión horizontal en $m^{2/3}/s$, que en zonas costeras de alta disipación de energía (como las costas del Perú) llega a valores de hasta 0,0005 $m^{2/3}/s$.

6.2. Determinación del tiempo de residencia mínimamente requerido

El tiempo de residencia mínimamente requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes a los niveles del Estándar de Calidad Ambiental (Tresidencia,min), se calcula con:

$$T_{residencia,min} = T_{90} \text{ x } LOG_{10}(C_{Mezcla} / C_{ECA})$$

Donde:

T_{90} : tasa de desaparición de coliformes termotolerantes, determinada según lo indicado en el numeral IV.4.3.

C_{ECA} : ECA-Agua de los coliformes termotolerantes según la categoría correspondiente a la zona sensible a la contaminación microbiológica[42] .

C_{Mezcla}: densidad de coliformes termotolerantes después de la dilución inicial en la zona de mezcla y de la dispersión horizontal desde la zona de mezcla hasta el límite de la zona sensible. Se calcula con:

$$C_{Mezcla} = \frac{C_{coli.term,vert}}{S_a \text{ x } C_0/C_T}$$

$C_{coli.term,vert}$: densidad máxima de coliformes termotolerantes en las aguas residuales tratadas.

Sa : dilución inicial calculada según el capítulo IV.3.2.

C0/CT : factor de dispersión horizontal que está en función del régimen de corrientes locales y la dispersión turbulenta, según Brooks (1960) y se calcula con:

b : ancho de la pluma emergiendo a la superficie, el cual se puede calcular con la ecuación indicada anteriormente.

Tt : tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de la zona sensible, en horas, que se determina según lo detallado anteriormente.

6.3. Determinación de la tasa de desaparición de coliformes termotolerantes

La tasa de desaparición de coliformes termotolerantes (T_{90}) es el intervalo de tiempo, en horas, requerido para la desaparición de 90% de los organismos remanentes. Muchos estudios de T_{90} indican un valor entre 1,0 y 3,0 horas. Los valores determinados para aguas relativamente cálidas han sido consistentemente menores que para aguas más frías. Sin embargo, el T90 no es constante sino que varía considerablemente en función de la radiación solar (determinada por el ángulo solar, la cobertura nubosa, la profundidad y los sólidos en suspensión que influyen sobre la transparencia), de la temperatura y

42 Para zonas de actividades recreativas de contacto primario (categoría 1 subcategoría B1): 200 NMP/100mL; para áreas aprobadas para la extracción y cultivo de moluscos,equinodermos y tunicados en aguas marino costeras (categoría 2 subcategoría 1): ≤ 14 NMP/100mL; para áreas restringidas para la extracción y cultivo de moluscos ,equinodermos y tunicados en aguas marino costeras (categoría 2 subcategoría 1): ≤ 88 NMP/100mL; para zonas de extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras (categoría 2 subcategoría 2): ≤ 30 NMP/100mL. Áreas aprobadas son áreas acuáticas de donde se extraen o cultivan moluscos bivalvos seguros para el comercio directo y consumo, libres de contaminación fecal humana o animal, de organismos patógenos o cualquier sustancia deletérea o venenosa y potencialmente peligrosa. Áreas restringidas son áreas acuáticas impactadas por un grado de contaminación donde se extraen moluscos bivalvos seguros para el consumo humano, luego de ser depurados.

la salinidad del agua. Para la determinación del T_{90} de coliformes termotolerantes se recomienda la siguiente ecuación propuesta por Mancini (1978) y adaptada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España (1993), que es aplicable para cuerpos receptores con una salinidad mayor que 30 g/L:

$$T_{90} = \frac{1}{\xi/60 \times (1-0{,}65 \times C^2) \times (1 - SST/800) + 0{,}02 \times 10^{(T-20)/35}}$$

Donde:

ξ : ángulo del sol sobre el horizonte, en grados sexagesimales (noche: 0º; mediodía: 90º).

C : fracción del cielo cubierto por nubes, en tantos por uno (sin nubes: 0; cielo cubierto: 1).

SST : concentración promedia de sólidos en suspensión, en mg/L.

T : temperatura del agua, en ºC.

Con esta ecuación se puede calcular valores de T_{90} horarios para determinadas características del cuerpo marino y de radiación solar.

Para la evaluación del impacto potencial en una zona de actividades recreativas de contacto primario, se considera las características del cuerpo marino y de radiación solar de la temporada de playa (verano).

Como ejemplo, para la estación de verano se puede suponer una temperatura de 19ºC, cielo sin cobertura de nubes (C = 0) y una concentración de sólidos suspendidos de 50 mg/L. Con estos parámetros obtenemos los siguientes T90 variables en función del ángulo del sol sobre el horizonte y la hora de día:

HORA	Ξ	T_{90}	$1/T_{90}$
18:00	0	53,4	0,019
19:00	0	53,4	0,019
20:00	0	53,4	0,019
21:00	0	53,4	0,019
22:00	0	53,4	0,019
23:00	0	53,4	0,019
00:00	0	53,4	0,019
01:00	0	53,4	0,019
02:00	0	53,4	0,019
03:00	0	53,4	0,019
04:00	0	53,4	0,019
05:00	0	53,4	0,019
06:00	0	53,4	0,019
07:00	15	4,0	0,253
08:00	30	2,1	0,487
09:00	45	1,4	0,722
10:00	60	1,0	0,956
11:00	75	0,8	1,191
12:00	90	0,7	1,425
13:00	75	0,8	1,191
14:00	60	1,0	0,956
15:00	45	1,4	0,722
16:00	30	2,1	0,487
17:00	15	4,0	0,253

En la tabla anterior, se puede observar la gran influencia de la radiación solar sobre la tasa de desaparición de

coliformes termotolerantes, resultando en un T90 de 53,4 horas en la noche y 0,7 horas a mediodía. Considerando esta variabilidad horaria de la tasa de desaparición, se calcula el T90 medio para un periodo que corresponde al tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de zona sensible (Tt), iniciando con la hora de puesta del sol (18:00 h) mediante la siguiente ecuación:

$$T_{90,medio} = \frac{Tt}{1/T_{90,18h+1}/T_{90,18h+1} + \ldots\ldots + 1/T_{90,18h+Tt}}$$

Donde:

$T_{90,18h}$: tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00 horas.

$T_{90,18h+1}$: tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00+1 horas.

…… representa todos los recíprocos de los T_{90} entre las 18:00+1 y 18:00 +T_t horas.

$T_{90,18h+Tt}$: tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00+Tt horas.

Tt : tiempo de transporte, en horas.

Esta metodología de cálculo del T90 considera que las aguas residuales tratadas son vertidas en la noche y transportadas por la corriente marina hacia la zona de impacto en las condiciones ambientales menos favorables en términos de desaparición de coliformes (13 horas sin radiación solar). Sin embargo, superadas las 13 horas de permanencia en el cuerpo receptor, el T90 baja rápidamente dado que se puede considerar la radiación en horas de día. Bajo tales condiciones obtenemos los siguientes T_{90} en función del tiempo de transporte T_t:

T_T	T_{90} (PROMEDIO)
≤ 13 horas	53,4
16 horas	9,4
18 horas	4,7
24 horas	2,7

Para la evaluación de un potencial impacto en una zona de producción y extracción de moluscos u otras especies hidrobiológicas, se deberá considerar las características del cuerpo marino y de radiación solar de la estación de invierno, dado que son actividades que se realizan durante todo el año y las condiciones ambientales de invierno son las menos favorables en términos de desaparición de coliformes (alto grado de cubertura del cielo por nubes y bajas temperaturas del agua). De forma ejemplar se supone los siguientes valores: T= 15 °C y C = 1; SST = 50 mg/L. Con estos parámetros, y aplicando la metodología descrita en lo anterior, se obtiene los siguientes T_{90} medios en función del tiempo de transporte T_t:

T_T	T_{90} (PROMEDIO)
≤ 13 horas	69,5
16 horas	22,1
18 horas	12,1
24 horas	7,3

Considérese que los valores de T_{90} indicados son ejemplares y, por lo tanto, el T_{90} deberá ser determinado para cada caso y las condiciones ambientales específicas de la zona de estudio, considerando particularmente el tiempo de transporte mínimo desde el vertimiento hasta el límite de la zona sensible.

6.4. Determinación de la densidad de coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible

La probable densidad de coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible a patógenos puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$C_{Tt} = \frac{C_{Coli.term,vert}}{S_a x\, C_o / C_T x 10^{(\frac{T_t}{T_{90}})}}$$

Donde:

C_{Tt} : densidad de los coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible, en NMP/100mL.

$C_{coli.term,vert}$: densidad máxima de coliformes termotolerantes en las aguas residuales tratadas, en NMP/100 mL.

S_a : dilución inicial calculada según el capítulo IV.3.2.

C_0/C_T : factor de dispersión horizontal determinado según el numeral IV.4.2.

T_t : tiempo de transporte, en horas, desde el vertimiento hasta el límite de la zona sensible, determinado según el numeral IV.4.1.

T_{90} : tasa de desaparición de los coliformes termotolerantes, en horas, determinada según el numeral IV.4.3.

7. CRITERIOS PARA EL CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Se describen los criterios generales para establecer el programa de control de los impactos del vertimiento en los cuerpos naturales de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial:

- La ubicación del punto de control de las cargas de las aguas residuales tratadas es seleccionada de modo que permita la caracterización del efluente vertido y la toma de muestra en condiciones seguras. De ser necesario, se preverá la instalación de una caja de registro, válvula de muestreo u otro dispositivo conforme con el protocolo de monitoreo establecido por el sector competente entre la salida de la planta de tratamiento y el punto de vertido, que permita un fácil acceso y la toma de muestra de las aguas residuales tratadas.

- Los puntos de control del cumplimiento de los ECA-Agua estarán ubicados en el límite de la zona de mezcla en el cuerpo receptor, considerando los siguientes criterios:

  – Por lo menos cuatro puntos en las cuatro direcciones alrededor del emisor submarino u otro dispositivo de descarga en el límite de la zona de mezcla determinada mediante la modelación numérica, o, en su defecto, en una distancia horizontal del difusor no mayor de 100 m. Para una mejor orientación en la toma de muestra, el inicio y final del emisor deberá contar con una boya de señalización.

  – La toma de muestra debería ser realizada en las siguientes profundidades.

  – Para aguas residuales tratadas de menor densidad que las aguas marinas (aguas residuales generadas en el uso de agua dulce como las aguas residuales doméstico-municipales):

    - Cuerpo de agua sin estratificación vertical de la densidad (característica de los cuerpos marino costeros del centro y sur del Perú): en la superficie.

    - Cuerpo de agua con estratificación vertical de la densidad (característica de cuerpos marino costeros del extremo norte del Perú, estuarios o en la proximidad de desembocaduras de ríos o canales de agua dulce): en la superficie y adicionalmente en la profundidad que corresponde a la altura máxima del ascenso de la pluma de aguas residuales (punto de emergencia del efluente).

  – Para aguas residuales tratadas de igual densidad que las aguas marinas (aguas residuales generadas en el uso de aguas saladas): en la superficie, en el fondo a 50 cm del sustrato y, en caso de puntos con más de 10 m de profundidad, también a la mitad de la columna de agua (H/2).

  – Para aguas residuales de mayor densidad que las aguas marinas: aproximadamente 0,5 m sobre el fondo de mar, y cuando las aguas residuales tratadas contienen aceites y grasas y/o hidrocarburos de petróleo, adicionalmente en la superficie.

  – En caso de vertimientos al mar de aguas residuales tratadas que contienen patógenos (aguas residuales doméstico-municipales o agroindustriales), se prevé varios puntos ubicados en el límite de las zonas sensibles, tales como las zonas de cultivo y extracción de moluscos y las zonas de actividades recreativas. La toma de muestra deberá ser realizada en la superficie del cuerpo de agua marino costero. Sin embargo, en el caso de zonas de cultivo y extracción de moluscos y un cuerpo de agua con estratificación vertical de la densidad, la toma de muestra debe ser realizada en la superficie, y adicionalmente

en la profundidad que corresponde a la altura máxima del ascenso de la pluma de aguas residuales (punto de emergencia del efluente).

– En el caso del vertimiento de aguas de alta temperatura (T > 35°C), como las aguas de refrigeración de plantas termoeléctricas, las salmueras de los procesos de desalinización de agua marina mediante la tecnología de destilación multietapa (Multi-stage Flash Distillation - MFS), se deberá establecer un punto adicional fuera del área de influencia del vertimiento (en una distancia de aproximadamente 500 m de la zona de mezcla) donde se determinará la temperatura del agua en condiciones naturales. El valor determinado será comparado con las mediciones realizadas en el límite de la zona de mezcla con el criterio $\Delta Temp \leq 3\ ^{o}C$.

– En el caso que una misma persona natural o jurídica tenga varios vertimientos autorizados a un mismo cuerpo receptor, y las zonas de mezcla se sobreponen o están muy próximas, se podrá establecer puntos de control únicos para los diferentes vertimientos, pues el responsable por los potenciales impactos de los diferentes vertimientos es la misma persona. Si los vertimientos son de titulares diferentes, los puntos deberán ser establecidos individualmente para cada vertimiento y la zona de mezcla no podrá sobreponerse, pues los puntos de control deben permitir el monitoreo del impacto de cada actividad individual. Esto es una necesidad administrativa para poder establecer la responsabilidad de cada titular de una autorización de vertimiento, dado que no es aceptable que potenciales impactos negativos sean imputados a personas que no los ocasionaron. Aquellas empresas que se encuentran en la situación de tener vertimientos muy próximos y requieran reducir el número de los puntos de control estableciendo puntos de control únicos para los diferentes vertimientos, podrían conformar un consorcio u otra persona jurídica que sea titular único de todos los vertimientos y asuma la responsabilidad para eventuales impactos ambientales negativos. El marco legal para los administrados del sector pesquero brinda la opción de formarse consorcios e instalar emisores compartidos.

• Los parámetros de control en el cuerpo receptor comprenden los parámetros de campo (pH y temperatura), los parámetros recomendados para las diferentes actividades y categorías ECA-Agua del cuerpo de agua natural en la tabla 2, acápite I.2, y adicionalmente sustancias químicas usadas y generadas en el proceso productivo y sus posibles productos de reacción o degradación, que están indicados en los ECA-Agua, en la categoría correspondiente. Los parámetros microbiológicos[43]

43 Coliformes termotolerantes en el límite de zonas de producción y extracción de moluscos u otras especies hidrobiológicas; coliformes termotolerantes y enterococos en el límite de zonas de actividades recreativas.

no deberán ser controlados en el límite de la zona de mezcla, sino en el límite de las zonas sensibles a la contaminación microbiológica.

- Los parámetros de control en el efluente deberían ser coherentes, tratando en lo posible de que sean los mismos que en el cuerpo receptor. Asimismo, debe considerarse los parámetros para los cuales el sector correspondiente haya definido un Límite Máximo Permisible.

- Para determinar la carga contaminante en el efluente vertido al cuerpo natural de agua, se deberá determinar en cada toma de muestra el caudal de las aguas residuales tratadas vertidas mediante el dispositivo de medición instalado[44] o, en su defecto, mediante una metodología manual (correntómetro, balde o flotador). El caudalímetro o el dispositivo de medición del caudal deberá ser instalado en la caja de registro o en proximidad de la válvula de muestreo y debe permitir la medición del caudal total de las aguas residuales tratadas vertidas al cuerpo receptor.

- Cabe precisar que la toma de muestra de las aguas residuales a caracterizar (tratadas o no tratadas) debería realizarse en conformidad con los protocolos de monitoreo publicados por el sector correspondiente, y los puntos de control en el cuerpo receptor serán muestreados según R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hidricos Superficiales.

- La frecuencia de control del efluente y de la calidad del cuerpo natural de agua será determinada en función del caudal de aguas residuales tratadas vertidas:

VOLUMEN ANUAL (M^3)	N.º DE MONITOREOS POR AÑO*	FRECUENCIA DE CONTROL*
< 300 000	1	Anual
300 000-3 000 000	2	Semestral
>3 000 000-9 000 000	4	Trimestral
>9 000 000	12	Mensual

* En el caso de vertimientos realizados por actividades estacionales, el número total de los monitoreos indicados en la tabla anterior deberán ser realizados en el periodo de producción con una frecuencia regular (ejemplo: actividad con cuatro meses de producción y 400 000 m^3 de volumen anual de aguas residuales => 2 monitoreos con frecuencia bimensual a realizarse en el periodo de producción).

44 El artículo 136 del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos sobre la Medición y control de vertimientos indica que es responsabilidad del administrado instalar sistemas de medición de los caudales del agua residual tratada y reportar los resultados de la medición.

En caso las normas ambientales sectoriales[45] establezcan una frecuencia de control más alta, el programa de control deberá estar conforme con ellas.

En el caso del vertimiento de aguas residuales con carga de patógenos, la calidad sanitaria del agua en el límite de las zonas de actividades recreativas de contacto primario deberá ser controlada en los meses de temporada de baño solamente.

- Cabe precisar que la toma de muestra del cuerpo natural de agua y del agua residual debería ser realizada en la misma fecha.

8. EVALUACIÓN DE VERTIMIENTOS EN CURSO Y EN FASE DE ADECUACIÓN A LOS ECA-AGUA

Los titulares de actividades que cuentan con un Instrumento de Gestión Ambiental aprobado por la autoridad competente y que requieren adecuar sus Planes de Manejo Ambiental a los ECA-Agua en conformidad con lo establecido en el D.S. Nº 004-2017-MINAM, podrán aplicar el presente lineamiento según el siguiente detalle:

1. Recopilación de todos los datos disponibles del control del vertimiento y evaluación de las concentraciones medidas en el cuerpo receptor que cumplan con los ECA-Agua de la categoría correspondiente. En caso esta evaluación demuestre que el vertimiento no causa ningún incumplimiento de los ECA-Agua asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o actividad (véase tabla 2, capítulo I.2), no se deberá realizar evaluaciones adicionales.

   En el caso que se haya encontrado incumplimientos de los ECA-Agua, se deberá suponer una de las dos siguientes condiciones que deberían ser comprobadas con las metodologías propuestas en la presente guía:

   1.1 Los puntos de control de la calidad del cuerpo receptor están ubicados al interior de la zona de mezcla y no son válidos para controlar el cumplimiento de los ECA-Agua[46].

   Se determina la extensión máxima de la zona de mezcla, recopilando la información requerida para la evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo natural de agua marino costero detallada en el capítulo IV.2, elaborando posteriormente uno de los modelos numéricos indicados en

45 Véase:
- Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales (2000). R.M. Nº 026-2000-ITINCI, Aprueba el Protocolo del Monitoreo de Efluentes Líquidos del sector Industria.
- Ministerio de la Producción (2016). R.M. N° 061-2016-PRODUCE, Aprueba el Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). R.M. Nº 273-2013-VIVIENDA, Aprueba el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR.
- Ministerio del Ambiente (2010). D. S. Nº 010-2010-MINAM, Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, que dispone que hasta la entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos se deberá aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en el artículo 7 de la R.M. Nº 011-96-EM/VMM, Ministerio de Energía y Minas (1996).

46 Véase el artículo 7 del D.S. Nº 004-2017-MINAM - Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias: "En aquellos cuerpos de agua donde se vierten aguas tratadas, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla [...]".

el capítulo IV.3.2.1, y comprobando que los puntos de control estén ubicados fuera de la zona de mezcla. En caso contrario, se propone la reubicación de los puntos de control establecidos.

1.2 La dilución inicial mínima –S_a– proporcionada por el dispositivo de descarga actual es menor que la dilución requerida –S_{max}–:

$$Sa < S_{max}$$

Donde Smax podrá ser determinado según lo indicado en el capítulo IV.3.1 para aquellos parámetros en los cuales se ha encontrado incumplimientos de los ECA-Agua correspondientes.

Sa podrá ser determinado con un modelo numérico según lo indicado en el numeral IV.3.2.1.

En el caso que el dispositivo de descarga actual no proporcione una dilución inicial suficiente, es decir: $Sa < S_{max}$, se deberá reconsiderar el diseño del dispositivo de descarga, previendo, por ejemplo, la construcción de un emisor submarino o, cuando este ya existe, incrementando el número de orificios, el espacio entre ellos, la longitud del emisor para lograr una mayor profundidad de descarga o, en su defecto, disminuyendo el diámetro de los orificios, entre otras opciones de diseño. En caso que el cuerpo receptor tenga una baja capacidad de asimilación, afectado por otras fuentes de contaminación, se recomienda evaluar la reubicación del dispositivo de descarga a través de un emisor más largo. Alternativamente, se podrá prever mecanismos que permiten reducir el caudal o las concentraciones del efluente considerando, por ejemplo: la implementación de tecnologías limpias que reduzcan el volumen y/o la carga de las aguas residuales generadas, el reúso/ recirculación parcial o total de las aguas residuales o modificando el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de los parámetros críticos.

2. En el caso que se haya observado incumplimientos de los ECA-Agua de los parámetros microbiológicos, se debería realizar la evaluación específica (método del T90) indicada en el capítulo IV.4. En función del resultado de esta evaluación se debería proponer las siguientes medidas:

   2.1 En el caso de que los parámetros microbiológicos fueron evaluados en el límite de la zona de mezcla, se podrá proponer la reubicación de los puntos de control de la contaminación microbiológica, estableciendo varios puntos en el límite de las zonas sensibles, tales como las zonas de cultivo y extracción de moluscos y las zonas de actividades recreativas.

   2.2 En caso la evaluación indique un riesgo de impactos en las zonas sensibles identificadas, será necesario alargar el emisor submarino para aumentar la distancia del difusor de la zona sensible e incrementar el tiempo de transporte o, alternativamente, reducir la carga microbiológica del vertimiento proyectando los sistemas de tratamiento correspondientes.





V.

ANEXOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Administrado: persona natural o jurídica que presenta ante la autoridad competente la solicitud de aprobación del instrumento de gestión ambiental o autorización de vertimiento de aguas residuales tratadas.

Afluente: agua residual que ingresa a una planta de tratamiento de aguas residuales o proceso de tratamiento.

Agua de bombeo: es el agua de mar empleada en el trasvase de materia prima desde la chata a la planta de procesamiento.

Agua de cola: fracción líquida obtenida en la industria de harina y aceite de pescado del proceso de filtración y prensado de la materia prima, después de haber eliminado gran parte de los sólidos en suspensión y de la materia grasa. El agua de cola, proveniente de las centrífugas del proceso, es tratada en plantas evaporadoras cuyo objetivo, como su propio nombre lo dice, es evaporar los líquidos con el fin de concentrar los finos sólidos suspendidos y disueltos; este soluble es adicionado al proceso en la etapa de secado.

Aguas continentales: son cuerpos de aguas permanentes que comprenden las aguas superficiales dulces y subterráneas, situados hacia tierra.

Aguas marinas: son cuerpos de agua que se encuentran en mares y océanos.

Aguas residuales industriales: aguas residuales originadas como consecuencia del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, pesquera, agroindustrial, entre otras.

Aguas residuales municipales: aguas residuales domésticas que pueden incluir la mezcla con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial, recolectadas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

Aguas residuales: aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, que tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas, y que por sus características de calidad requieran de un tratamiento previo.

Agua turbinada: son aquellas procedentes de un cuerpo de agua que han sido aprovechadas para la generación hidroeléctrica y que no requieren de una modificación de su estado natural, ni la adición de elementos que alteren dicho estado. En atención a sus características, no son consideradas aguas residuales industriales ni efluentes.

Bahía: entrada del mar en la costa, de extensión considerable, que por sus características morfológicas y el largo reducido de la bocana de ingreso a la bahía en relación con las dimensiones de esta permite la renovación de sus aguas principalmente durante las mareas ascendentes y descendentes, y aquellas cuyas velocidades de las corrientes marinas son predominantemente menores o iguales a 5 cm por segundo.

Caja de registro: pozo de inspección y medición incluido en el tramo terrestre del emisor por donde pasan uno o más efluentes a su destino final.

Calibración (de instrumentos): comparación de la lectura de un instrumento generado por un patrón o estándar conocido con el objetivo de realizar los ajustes que eliminen desviaciones o desajustes instrumentales.

Calibración (de modelos de simulación de la calidad del agua): es el ajuste iterativo de las constantes de las ecuaciones matemáticas, hasta que el modelo simule los datos medidos con un margen de error mínimo.

Carga contaminante: es la masa de una sustancia o el número de individuos microbiológicos contenido en un volumen de agua que pasa por una sección determinada en una unidad de tiempo. La carga contaminante es determinada multiplicando la concentración de la sustancia o la densidad de individuos microbiológicos por el caudal de agua, determinado en el momento de la toma de muestra.

Caudal medio anual: es el promedio de los caudales en un periodo de un año.

Caudal: es el volumen de agua que pasa por una sección determinada en una unidad de tiempo.

Chata: muelle flotante, de fondo plano, que sirve para la descarga de la materia prima de la industria de harina y aceite de pescado.

Ciclo de nitrógeno: procesos químicos, físicos y biológicos que determinan las concentraciones de nitrógeno en sus diferentes formas en un cuerpo natural de agua, Son: hidrólisis, nitrificación, desnitrificación, sedimentación, asimilación en algas, dilución por tributarios y descomposición de materia orgánica en los sedimentos.

Conductividad: es un parámetro que mide la cantidad de iones disueltos en el agua, y se expresa en microsiemens por centímetro (μS/cm).

Cuenca hidrográfica: territorio cuyas aguas superficiales naturales afluyen todas a un mismo río, lago o mar.

Cuerpo de agua natural léntico: son cuerpos de aguas continentales caracterizados por bajas velocidades de corrientes y altas frecuencias de intercambio del volumen almacenado, como lagos, lagunas, embalses, entre otros.

Cuerpo de agua natural lótico: son cuerpos de aguas continentales caracterizados por corrientes unidireccionales continuas, como ríos, quebradas, entre otros.

Cuerpo de agua natural marino costero: son cuerpos de agua que se encuentran en mares y océanos.

Cuerpo de agua: extensión de agua, tal como un río, lago, mar u océano, que cubre parte de la Tierra. Algunos cuerpos de agua son artificiales, como los embalses, aunque la mayoría son naturales. Pueden contener agua salada o dulce.

Cuerpo receptor: cuerpo natural de agua continental o marino-costera que recibe el vertimiento de aguas residuales tratadas.

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno): cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para la estabilización de la materia orgánica bajo condiciones de tiempo y temperatura específicos (generalmente cinco días y a 20 ºC).

Desembocadura: es la parte más baja de un cuerpo de agua (quebrada, río), donde vierte sus aguas a un lago o mar.

Dinámica: es el proceso por el que la acción de los ríos modifica de alguna manera el relieve terrestre y el propio trazado. Es un concepto fundamental en el análisis de la hidrografía, en especial en el estudio de las aguas continentales.

Efluente: agua residual tratada o líquido que sale de una planta o proceso de tratamiento.

Embalse: gran depósito que se forma artificialmente, por lo común cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa, y en el que se almacenan aguas de un río o arroyo con el fin de utilizarla en el riego de terrenos, en el abastecimiento de poblaciones y en la producción de energía.

Emisor submarino: tubería y accesorios complementarios que permiten la disposición de las aguas residuales pretratadas en el mar.

Época de avenida: mes del año en el cual el caudal mensual medio llega a su máximo.

Época de estiaje: mes del año en el cual el caudal mensual medio llega a su mínimo.

Equipo multiparamétrico: instrumento que puede medir simultáneamente varios parámetros como pH, temperatura, conductividad, SDT y oxígeno disuelto.

Estándar de Calidad Ambiental para Agua: (ECA-Agua) es el nivel de concentración máximo de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en los recursos hídricos superficiales, y que no presenta riesgo significativo para la salud de las personas ni el ambiente. Los estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural, y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas, siendo un referente indispensable en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Estuario: parte más ancha y profunda en la desembocadura de los ríos, en los mares abiertos o en los océanos, en aquellas áreas donde las mareas tienen mayor amplitud u oscilación.

Estudio de Impacto Ambiental (EIA): estudio que evalúa y describe las características físicas, químicas, biológicas y socioeconómicas existentes en el área de influencia del proyecto, previas a la ejecución de la actividad. Identifica los impactos y las medidas de mitigación que se han de aplicar una vez iniciadas

las actividades de producción, con el fin de lograr el desarrollo sostenible de la actividad en armonía con la protección del ambiente.

Fiscalización: facultad de investigar la comisión de posibles infracciones administrativas sancionables y, si fuera el caso, imponer sanciones por el incumplimiento de obligaciones derivadas de los instrumentos de gestión ambiental, así como de las normas ambientales como los Límites Máximos Permisibles y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

Frecuencia de control: es la periodicidad del monitoreo de la carga contaminante en el efluente y de la calidad del cuerpo natural receptor del vertimiento.

Oceanográficos: Procesos biológicos, físicos, geológicos y químicos que ocurren en los mares y océanos.

Hidrodinámica: movimiento de agua natural o de una pluma de aguas residuales. Es la dinámica del agua en la que se considera la velocidad, la presión, el flujo y el gasto del fluido.

Hidrografía: descripción y estudio sistemático de los diferentes cuerpos de agua planetarios, en especial de las aguas continentales. En el estudio de estas, las características hidrográficas más importantes de los ríos son el caudal, la cuenca, la vertiente hidrográfica, el cauce o lecho, el régimen fluvial, el régimen, la dinámica fluvial, la erosión, la sedimentación fluvial y los tipos de valles y pendientes.

Índice de intercambio de agua: corresponde al caudal anual medio en la salida de la laguna y el lago. En el caso de un vertimiento a una bahía, el índice de intercambio de agua corresponde al caudal anual medio de los ríos y quebradas tributarios de la bahía evaluada.

In situ: en el lugar, en el sitio.

Instrumento de Gestión Ambiental: mecanismos diseñados para posibilitar la ejecución de la política ambiental, con base en los principios establecidos en la ley. Constituyen medios operativos que son diseñados, normados y aplicados con carácter funcional o complementario, para garantizar el cumplimiento de la Política Nacional Ambiental y las normas ambientales que rigen en el país. Incluye, por ejemplo, Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Planes de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA).

Laboratorio acreditado por INACAL: el laboratorio que realiza los análisis de los parámetros de calidad debe estar acreditado con la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025:2006, Requisitos generales para la competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración, y tener la acreditación por cada ensayo analítico realizado para la medición de los parámetros establecidos. Las acreditaciones deben ser emitidas por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

Lago: gran masa permanente de agua depositada en depresiones del terreno.

Laguna: depósito natural de agua, generalmente dulce y de menores dimensiones que el lago.

Límite Máximo Permisible (LMP): medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o una emisión, que corresponde a los niveles de tratamiento de aguas residuales alcanzables con las mejores técnicas disponibles, y técnica y económicamente viables. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente y su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental.

Línea de base: caracterización del ambiente antes de la implementación del proyecto o actividad.

Mar: masa de agua salada de tamaño inferior al océano.

Muestra de agua: porción representativa del efluente o cuerpo hídrico receptor que es colectada con el fin de conocer sus características físicas, químicas y biológicas.

Muestreo de agua: es una herramienta del monitoreo. Su función básica es la extracción de una parte del cuerpo de agua para determinar sus características y condiciones actuales.

Orificio: es la salida a través de la cual corre el agua residual del emisor submarino.

Oxígeno disuelto: concentración de oxígeno solubilizado en un líquido que depende de la temperatura y la presión atmosférica, condicionante para el desarrollo de la vida acuática.

Parámetros de calidad: compuestos, elementos, sustancias, indicadores y propiedades físicas, químicas y biológicas de interés para la determinación de la calidad de agua.

PPT (Parts Per Thousand en inglés, partes por mil en español): es una unidad de medida de concentraciones correspondiente a 0,998859 gramos por litro (g/L).

Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR): infraestructura y procesos que permiten la reducción de las concentraciones de las sustancias y de las densidades de patógenos contenidos en las aguas residuales.

Punto de control: representa aquel lugar definido por sus coordenadas geográficas y establecido en el Estudio de Impacto Ambiental o en la Autorización de Vertimiento o reuso en un cuerpo de agua o en un vertimiento de aguas residuales tratadas para llevar a cabo la evaluación de su calidad y cantidad, como parte de las actividades de fiscalización de vertimientos y/o reusos de aguas residuales tratadas.

Punto de monitoreo: es la ubicación geográfica de un punto donde se realiza la evaluación de la calidad y cantidad en un cuerpo natural de agua en forma periódica, en el marco de las actividades de vigilancia.

Quebrada, riachuelo y arroyo: corriente natural de agua que normalmente fluye con continuidad pero que,

a diferencia de un río, tiene escaso caudal, que puede desaparecer durante el estiaje.

Quebrada: hendidura de una montaña que en su fondo contiene una corriente natural de agua de caudal bajo, que puede desaparecer durante la época de estiaje.

Recurso hídrico: recurso natural renovable que fluye en los cuerpos naturales de agua continentales y marinos. También son los bienes naturales asociados al agua; por ejemplo: los cauces de los ríos, playas, lechos y riberas, barriales, bienes artificiales como presas, canales, entre otros.

Reuso de agua residual tratada: reutilización de aguas residuales, previamente tratadas, resultantes de las actividades antropogénicas.

Río: corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado y desemboca en el mar, en un lago o en otro río.

Salmueras: aguas residuales generadas como producto del proceso de desalinización de agua, caracterizadas por su alto contenido de sales.

Sólidos totales disueltos: es la cantidad total de sólidos disueltos en el agua por unidad de medida volumétrica, medida generalmente en gramos por litro (g/L). La determinación de sólidos disueltos totales mide gravimétricamente la masa total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos), a través de una membrana con poros de 2,0 μm (o más pequeños) que quedan como residuo al evaporar el agua y secar el residuo.

Tasa de desoxigenación carbonácea: se refiere a la degradación de la materia orgánica carbonácea, como resultado del proceso de oxidación húmeda que se lleva a cabo mediante los microorganismos presentes.

Tasa de reaeración: la reaeración puede definirse como el proceso de absorción del oxígeno atmosférico por parte del agua en movimiento.

Transecto: es una banda de puntos de muestreo en los cuales se toman los datos definidos previamente.

Tratamiento primario: tipo de tratamiento que remueve los materiales sedimentables y la materia flotante persistente, usando tratamiento físico o físico-químico. También se incluye en estos tratamientos la neutralización del pH y la eliminación de contaminantes volátiles como el amoniaco (desorción).

Tratamiento secundario: tipo de tratamiento que reduce las demandas biológicas de oxígeno mediante la descomposición de los contaminantes orgánicos. Puede incluir procesos biológicos y químicos. El procedimiento secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que bacterias aerobias oxiden la materia orgánica que llevan las aguas. El tratamiento secundario incluye también una etapa final de separación de los lodos mediante filtración, decantación o sedimentación.

Tratamiento terciario: tipo de tratamiento que reduce las concentraciones de contaminantes específicos a niveles inferiores que los alcanzables con el tratamiento secundario. Frecuentemente se prevé tratamiento terciario para la remoción de fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, bacterias, parásitos, compuestos orgánicos, etcétera. Es un tipo de tratamiento más costoso que los anteriores y se usa en casos especiales, como por ejemplo para purificar desechos de algunas industrias o para tratar aguas residuales que son vertidas a cuerpos de agua altamente sensibles, o que son reusadas en la acuicultura, agricultura o riego de jardines y parques.

USEPA: United States Environmental Protection Agency.

Vertimiento de aguas residuales tratadas: descarga de aguas residuales previamente tratadas, que se efectúa en un cuerpo natural de agua continental o marítima. Se excluyen las provenientes de naves y artefactos navales.

Vertimiento de salmueras: descarga de aguas con alto contenido de sales disueltas a un cuerpo natural de agua, que se obtienen como resultado del proceso de desalinización. Son consideradas aguas residuales, por lo que su vertimiento, previo tratamiento, requiere de autorización.

Vertimiento: en este documento, el término "vertimiento" se refiere a la descarga de aguas residuales tratadas.

Zona de mezcla: es aquel volumen de agua en el cuerpo receptor donde se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y de dispersión, sin considerar otros factores, además del decaimiento bacteriano, la sedimentación, la asimilación en materia orgánica y la precipitación química.

BIBLIOGRAFÍA

Autoridad Nacional del Agua (2010). *Resolución Jefatural Nº 202-2010-ANA*. Clasificación de cuerpos de agua superficiales y marino-costeros. Lima: ANA.

Autoridad Nacional del Agua (2013). *Resolución Jefatural Nº 224-2013-ANA – Aprobación del nuevo Reglamento para el Otorgamiento de Autorizaciones de Vertimientos y Reusos de Aguas Residuales Tratadas*. Lima: ANA.

Baumgartner, D. J., W. E. FRICK & P. J. W. Roberts (1994). *Dilution Models for Effluent Discharges*. Third edition. EPA/600/R-94/086. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

Bleninger, T. & G. H. Jirka (2010). *Environmental Planning, Prediction and Management of Brine Discharges from Desalination Plants*. Final report. Middle East Desalination Research Center, Muscat, Sultanate of Oman.

Brooks, N. H. (1960). *Diffusion of Sewage Effluent in an Ocean Current*. Preceedings. First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment. Berkeley, NY: University of California, Pergamos Press.

Brooks, N. H. (1970). *Conceptual Design of Submarine Outfalls, Hydraulic Design of Diffusers*. Berkeley, NY: Program VIII, Pollution of Coastal and Estuarine Waters, University of California.

Brooks, N. H. (1973). *Dispersion in Hydraulic and Coastal Environments*. Report N° 66013-73-010, U. S. Environmental Protection Agency.

Cameron J. O. (2012). *Near Field Mixing of Negatively Buoyant Jets*. University of Canterbury, Department of Civil and Natural Resources Engineering, Christchurch, New Zealand.

Universidad Católica de Chile & SEI (2009). *Guía metodológica – Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Desarrollada por el Centro de Cambio Global de la Universidad Católica de Chile y el Stockholm Environment Institute (SEI) con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

CEPIS & ISCTN (2005). RÍOS EP. Elaborado por el Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares, Cuba (ISCTN). Judith Dominguez, Anel Hernandez (programador), Jorge Borroto y CEPIS-SB/SDE Henry Salas.

Chapra, S. C., G. J. Pelletier & H. Tao (2006). QUAL2K: *A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality*. Version 2.04: Documentation and User's Manual. Medford,

MA: Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University.

Chapra, S. C. & G. J. Pelletier (2008). *QUAL2Kw: User Manual. Version 5.1: A Modelling Framework for Simulating River and Stream Water Quality*. Environmental Assessment Program Olympia. Washington: Washington State Department of Ecology.

CIGEA (1998). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante*. La Habana: Agencia de Medio Ambiente.

Comisión Europea (2010). *Orientaciones técnicas para la identificación de las zonas de mezcla en aplicación de lo dispuesto en el artículo 4, apartado 4, de la Directiva 2008/105/CE*. Bruselas: Comisión Europea.

Comisión Nacional del Agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Guía para el diseño de emisores submarinos. México: CONAGUA, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Dawoud, M. A. & M. M. Al Mulla (2012). Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. *International Journal of Environment and Sustainability,* vol. 1, N° 3, pp. 22-37. Abu Dhabi y Dubai.

Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente (2007). *Manual para la gestión de vertidos - Autorización de vertido*. Madrid: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente.

Endrizzi, S., M. Tubino & G. Und Zolezzi (2002). *Lateral Mixing in Meandering Channels: A Theoretical Approach*. Proceedings River Flow 2000, International Conference on Fluvial Hydraulics, Bousmar, D. and Zech, Y., Eds. Louvain-La-Neuve, Bélgica.

Fischer, H. B., E. J. List, r. C. Y. Koh, J. IMBERGER & N. H. BROOKS (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters.* New York: Academic Press.

Frick, W.E., P. J. W. Roberts, L. R. Davis, J. Keyes, D.J. Baumgartner & K. P. George (2003). *Dilution Models for Effluent Discharges*. 4th Edition (Visual Plumes). EPA document N.º EPA/600/R-03/025. Athens, Georgia: Ecosystems Research Division, National Exposure Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency.

Gutiérrez Díaz, J. (2009). *Metodología: descargas de aguas residuales y autodepuración de corrientes superficiales, modelo simple de OD-DBO (STREETERPHELPS)*. La Habana: Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA).

Hydroscience (1971). *Simplified Mathematical Modeling of Water Quality.* U.S. Environmental Protection Agency, Mitre Group. Westwood, NJ, USA:

Hydroscience, Inc. Donald J. O'Connor, Robert V. Thoman, John L. Mancini and Henry J. Salas.

Hydroscience (1972). *Addendum to Simplified Mathematical Modeling of Water Quality*. U.S. Environmental Protection Agency, Mitre Group. Westwood, NJ, USA: Hydroscience, Inc. Henry J. Salas, Donald J. O'Connor, Robert V. Thoman, John L. Mancini.

Jirka, H. G., L. R. Doneker & W. S. Hinton (1996). *User's Manual for CORMIX: a Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. Washington D.C.: Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency.

Jirka, H. G. (2003). *Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet*. Países Bajos: Environmental Fluid Mechanics 4, pp. 1-56.

Jirka, G. H., T. Bleninger, R. Burrows & T. Larsen (2004). *Environmental Quality Standards in the EC-Water Framework Directive: Consequences for Water Pollution Control for Point Sources*. European Water Management Online (EWMO).

Jirka, H. G. & L. R. Doneker (2007). *User's Manual for CORMIX: a Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. Washington D.C.: EPA Document Nº EPA-823-K-07-001, U.S. Environmental Protection Agency.

Ludwig, R. (1988). *Evaluación del Impacto Ambiental. Ubicación y diseño de emisores submarinos.* MARC Report 43. London: Monitoring and Assessment Research Center & World Health Organization. Traducido por Salas, H. Lima: CEPIS.

Mancini, J. L. (1978). Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates under Various Conditions. *Journal of the Water Pollution Control Federation, Nov.* 1978, pp. 2477-2484.

Marks, B. J. (1996). *Initial Dilution of a Horizontal Jet in a Strong Current*. Vancouver, Canada: Department of Civil Engineering, The University of British Columbia.

Metcalf y Eddy, Inc. (1996). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. México: McGraw-Hill.

Ministerio de Energía y Minas (1996). *Resolución Ministerial Nº 011-96-EM/VMM – Aprueba los niveles máximos permisibles para efluentes líquidos para las actividades minero-metalúrgicas.* Lima: MEM.

Ministerio de Energía y Minas (1994). *Resolución Directoral N° 004-94-EM/DGAA – Guía de Monitoreo de Agua y Aire para la Actividad*

Minero-Metalúrgica. Publicado por el Ministerio de Energía y Minas.

Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales (2000). *Resolución Ministerial Nº026-2000-ITINCI – Aprueba el Protocolo del Monitoreo de Efluentes Líquidos del sector Industria.* Lima: MINCETUR.

Ministerio del Ambiente (2010). *Decreto Supremo Nº010-2010-MINAM – Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.* Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (2017). *Decreto Supremo Nº004-2017-MINAM – Aprueba los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y disposiciones complementarias.* Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (2014). *Resolución Ministerial Nº 031-2014-MINAM – Dispone la publicación del Proyecto de Decreto Supremo que aprueba los Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Plantas Desalinizadoras.* Lima: MINAM.

Ministerio de la Producción (2016). *Resolución Ministerial N° 061-2016-PRODUCE – Aprueba el Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto.* Lima: PRODUCE.

Ministerio de la Producción (2009). *Resolución Ministerial Nº 181-2009-PRODUCE – Aprueban el documento Guía para la actualización del Plan de Manejo Ambiental para que los titulares de los establecimientos industriales pesqueros alcancen el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles aprobados por Decreto Supremo N° 010-2008-PRODUCE.* Lima: PRODUCE.

Ministerio de la Producción (2009). *Decreto Supremo Nº 010-2008-PRODUCE - Límites Máximos Permisibles (LMP) para la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Normas Complementarias.* Lima: PRODUCE.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1993). *Orden de 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar.* Madrid: MOPT.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009). *Decreto Supremo Nº 021-2009-VIVIENDA – Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario.* Lima: MVCS.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). *Resolución Ministerial Nº273-2013-VIVIENDA – Aprueba el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – PTAR.* Lima: MVCS.

O'Connor, D. J. & W. E. Dobbins (1958). Mechanisms of Reaeration in Natural Streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division, Transactions,* ASCE, vol. 103, pp. 641-684.

Palomar, P. e I. J. Losada (2012). *Impacts of Brine Discharge on the Marine Environment*. Modelling as a Predictive Tool, Desalination, Trends and Technologies. Michael Schorr (Ed.). Rijeka, Croatia: InTech.

Papps, D. A. (1995). *Merging Buoyant Jets in Stationary and Flowing Ambient Fluids*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2008). *Directiva 2008/105/CE relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas*. Estrasburgo.

Presidencia del Consejo de Ministros (2008). *Decreto Supremo N° 037-2008-PCM – Establece los límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el Subsector Hidrocarburos*. Lima: PCM.

Republic of South Africa, Department of Water Affairs and Forestry (2004). Water Quality Management Series, Sub-Series N° MS 13.3. *Operational Policy for the Disposal of Land-Derived Water Containing Waste to the Marine Environment of South Africa: Guidance on Implementation*. Edition 1. Pretoria, África del Sur.

Roberts, P. J. W. (1977). *Dispersion of Buoyant Waste Discharge from Outfall Diffusers of Finite Length.* Rep. N° KH-R-35, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA.

Roberts, P. J. W. (1997). Mixing in Inclined Dense Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Roberts, P. J. W., H. Salas, F. M. Reiff, M. Libhaber, A. LABBE & J. C. Thomson (2010). *Design of Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. IWA.

Rutherford, J. C. (1994). *River Mixing*. Chichester, England: John Wiley.

Salas, H. & P. Martino (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de lagos cálidos tropicales.* Lima: Programa Regional del CEPIS-HEP-OPS 1981-1990, CEPIS.

Salas, H. J. (1994). *Emisores submarinos: alternativa viable para la disposición de aguas negras de ciudades costeras en América Latina y el Caribe.* CEPIS.

Schnurbusch, S. A. (2000). *A Mixing Zone Guidance Document prepared for the Oregon Department of Environmental Quality.* Portland State University.

SEI (2011). WEAP – *Water Evaluation and Planning System, Tutorial, A Collection of Stand-Alone*

Modules to Aid in Learning the WEAP software. Stockholm Environment Institute.

Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín: Universidad de Medellín y Ediciones de la U.

Socolofsky, S. A. & G. H. Jirka (2002). *Environmental Fluid Mechanics Part I: Mass Transfer and Diffusion – Engineering Lectures*. 2nd Edition. Karlsruhe, Alemania: Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe.

The Environmental Pollution Prevention Project-EP3 (1996). *Prácticas recomendadas para mejorar la eficiencia de los procesos en la industria de harina de pescado*. Arlington, Virginia, EE. UU.

Thomann, R. V. & J. A. Mueller (1987). *Principles of Surface Water Quality Modelling and Control.* New York: Harper & Row.

Tsivoglou, E. C. y L. A. Neal (1976). Tracer Measurement of Reaeration: III. Predicting the Reaeration Capacity of Inland Streams. *Journal WPCF,* vol. 48, N° 12, pp. 2669-2689.

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (2007). *Propuestas de mejora en el control de efluentes de una planta pesquera*. Lima: UPC.

USEPA (1985). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling. Second Edition. EPA Document Nº EPA/600/3-85/040. Athens, Georgia: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

USEPA (1990). *Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Single Port Discharges (CORMIX1).* EPA Document Nº EPA/600/3-90-012. Athens, GA: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency.

USEPA (1991a). *CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Discharges.* EPA Document Nº EPA/600/3-91-073. Washington, DC.: Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency.

USEPA (1991b). *Technical Support Document for Water Quality-based Toxics Control.* EPA Document NºEPA/505/2-90-001. Washington, DC: Office of Water, United States Environmental Protection Agency.

USEPA (1994a). *Dilution Models for Effluent Discharges.* EPA Document Nº EPA/600/R-94/086. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.

USEPA (1994b). *Water Quality Standards Handbook. Second Edition*. EPA Document Nº EPA 823-

B-94-005. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.

USEPA (1995a). *Mixing Zone and Dilution Policy*. Denver, CO: United States Environmental Protection Agency, Region VIII, Water Management Division.

USEPA (1995b). *Technical Guidance Manual for Performing Wasteload Allocations, Book II: Streams and Rivers – Part 1: Biochemical Oxygen Demand/Dissolved Oxygen and Nutrients/ Eutrophication*. EPA Document Nº EPA-823-B-97-002. Washington, DC: Office of Water, United States Environmental Protection Agency.

USEPA (2003). *Dilution Models for Effluent Discharges*. 4th Edition (Visual Plumes). W. E. Frick, P. J. W. Roberts, L. R. Davis, J. Keyes, D. J. Baumgartner & K.P. George, EPA/600/R-03/025, March. Athens, Georgia.

USEPA (2006). *Compilation of EPA Mixing Zone Documents*. EPA Document Nº EPA 823-R-06-003. Washington D.C.: Office of Water, United States Environmental Protection Agency.

Vollenweider, R.A. & J. Kerekes (1982). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*. París: Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD).

Wright, S.J. (1984). Buoyant Jets in Density Stratified Cross Flow. *J. Hydraulic. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 110, pp. 643-656.


ESTACION E-2
VERTIMIENTO RIRA



VI.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN PRÁCTICA


1

Vertimiento de aguas residuales domésticas tratadas a una quebrada

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se resume las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- Planta de tratamiento de las aguas residuales (PTAR) de una población rural de 3750 habitantes. En la localidad servida no existen actividades industriales.
- En la actualidad, el vertimiento de aguas residuales es realizado sin tratamiento a un cuerpo natural de agua.
- El sistema de alcantarillado es de tipo separado, y recoge exclusivamente aguas residuales domésticas. Las aguas de escorrentía pluvial son acopiadas en un sistema de drenaje superficial.
- La PTAR proyectada abarca el tratamiento primario con criba media y desarenador, y secundario en dos lagunas facultativas diseñadas para cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (D.S. Nº 003-2010-MINAM). El área total neta de las lagunas es de 13 750 m^2, la profundidad es 1,5 m y el tiempo de retención real es de 25 días.
- Las aguas residuales tratadas serán descargadas a una quebrada de Categoría ECA-Agua 3, Riego de vegetales y bebida de animales.
- Aguas abajo del vertimiento, hasta una distancia del vertimiento de un (1) kilómetro, no existen usos primarios (poblacionales, agrícolas, industriales u otros) del recurso hídrico.

2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Determinación de la lista de parámetros a evaluarse

En conformidad con la tabla 2, acápite I.2 de la Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, los parámetros por evaluarse para el caso de aguas residuales domésticas vertidas a un cuerpo de agua de categoría ECA-Agua 3 son los siguientes:

- Oxígeno disuelto
- Aceites y grasas
- Coliformes termotolerantes
- Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días
- Demanda química de oxígeno

No se deberá evaluar parámetros adicionales, ya que no existen actividades industriales en la localidad servida.

2.2 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento proyectado de una PTAR futura, se supone que las concentraciones máximas corresponden a aquellas indicadas en los LMP.

Tabla 5. Concentraciones máximas del efluente

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP (DS Nº003-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PROYECTADA
Oxígeno disuelto	mg/L	---	0*
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200	200
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150	150
Aceites y grasas	mg/L	20	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10 000	10 000

* Se supone una concentración de oxígeno disuelto en el efluente de cero (0) mg/L, lo que es una suposición conservadora.

2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas

Para la estimación del caudal máximo del vertimiento se aplican los criterios propuestos en la Norma OS.100, Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria:

- Dotación de agua: 180 L/hab/d
- Variación máxima anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5
- Caudal de contribución de alcantarillado: 80% del caudal de agua potable consumida.

Con estas variables el caudal medio se calcula con:

$$Q_{AR,medio} = \frac{180 \text{ x } 3750 \text{ x } 0{,}80}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60} = 6{,}25 \text{ L/s}$$

Y el caudal horario máximo se calcula con:

$$Q_{AR,max} = \frac{180 \text{ x } 3750 \text{ x } 2{,}5 \text{ x } 0{,}80}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60} = 15{,}63 \text{ L/s}$$

Este caudal horario máximo corresponde al caudal en entrada a la futura PTAR. Para poder determinar el caudal máximo del vertimiento, se deberá considerar el gran volumen de las lagunas de estabilización, lo que resultará en la ecualización del caudal. Suponiendo, de forma conservadora, un caudal horario máximo de 15,63 L/s, con una duración de seis horas y una descarga de la PTAR diseñada para un caudal continuo de 6,25 L/s, es posible calcular el volumen requerido para la ecualización del caudal.

Volumen de ecualización = (15,63 – 6,25) x 6 x 3600 = 202 608 L = 202,6 m^3

Considerando el área total neta de las lagunas de 13 750 m^2, se calcula un incremento del nivel del agua máximo de 1,5 cm, lo que demuestra la alta capacidad de ecualización del flujo de las lagunas. Por lo tanto, la evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor se calcula con el caudal medio del vertimiento de 6,25 L/s.

$$Q_{vert} = 6{,}25 \text{ L/s}$$

2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento primario (criba media y desarenador) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales, antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Estas características del cuerpo receptor fueron determinadas en la época de estiaje, que es el periodo más crítico a juzgar por la capacidad de asimilación de la carga contaminante.

Tal como se evidencia en la tabla 6, que contiene las precipitaciones mensuales históricas registradas en la estación meteorológica XXX, ubicada a 17 km del área del proyecto, el mes con las menores precipitaciones mensuales es junio.

Tabla 6. Precipitación mensual histórica y promedio multianual

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL HISTORICA (mm)

ESTACIÓN: XXX
CUENCA: XXX
FUENTE: SENAMHI

LATITUD: XX°XX'XX''
LONGITUD: XX°XX'XX''
ELEVACIÓN: XX m.s.n.m.

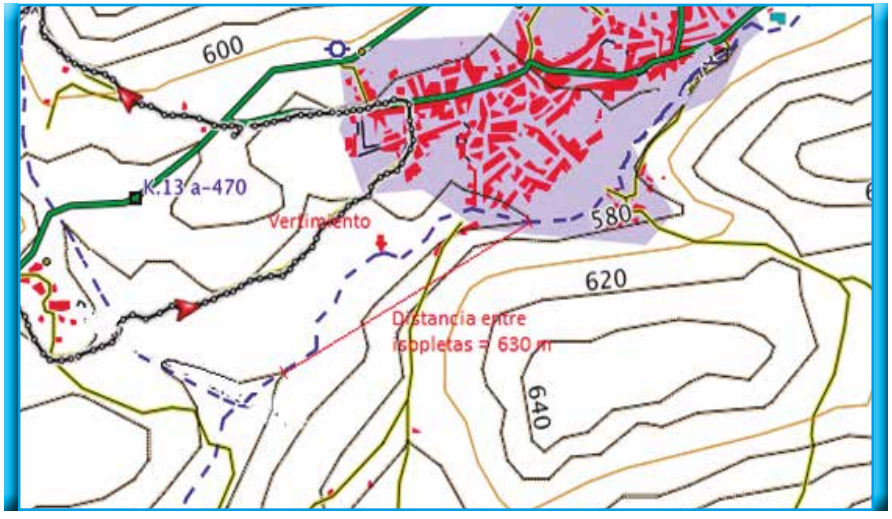
2009	83.7	128.8	91.1	49.4	35.7	1.7	14.0	21.0	18.6	107.4	19.5	66.4
2010	122.4	83.6	95.9	28.3	28.4	10.8	42.0	2.8	34.3	41.5	86.9	51.6
2011	69.3	123.3	95.2	24.4	16.9	3.5	31.9	30.4	77.1	82.5	65.3	86.8
2012	73.5	79.6	98.0	50.5	23.0	0.0	0.4	42.0	38.5	45.0	63.8	97.3
2013	28.3	132.8	69.6	12.0	10.4	21.9	9.3	6.4	45.5	55.9	90.7	107.1
PROMEDIO	75.4	109.6	90.0	32.9	22.9	7.6	19.5	20.5	42.8	66.5	65.2	81.8

Considerando el régimen multianual de las precipitaciones, se puede suponer que el cuerpo receptor en el mes de junio tiene el caudal mínimo. Por lo tanto, el día 17 de junio de 2013 se determinaron las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor en la ubicación del vertimiento proyectado, con los siguientes resultados:

- Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento: W_{min} = 1,7 m
- Profundidad media del río aguas abajo del vertimiento: d = 0,13 m
- Velocidad de flujo media[47]: u = 1,0 m/s
- Caudal instantáneo: Q_x = 180 L/s
- Factor de irregularidad del cauce: c = 0,6 (cauce natural con serpentear moderado)

La pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento fue determinada con base en el mapa topográfico.

Gráfico 31. Mapa topográfico del área del proyecto con indicación del punto de vertimiento proyectado y distancia entre las curvas de nivel



- Pendiente del cauce: s = (560-540) / 630 = 0,032 m/m

47 Promedio de todas las mediciones realizadas con el correntómetro en la sección donde se determinó el caudal.

4. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento, se aplica el método simplificado desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA).

Dado que el vertimiento será realizado en la orilla del curso de agua, la longitud de la zona de mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \, u}{2 \, \pi \, Dy} = \frac{1{,}7^2 \, x 1{,}0}{2 \, x \, 3{,}1416 \, x \, 0{,}0158} = 29{,}1 \, m \approx 30 \, m$$

Donde:

Dy: Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, y se calcula con:

$$Dy = c \, x \, d \, x \, u^* = 0{,}6 \, x \, 0{,}13 \, x \, 0{,}202 = 0{,}0158$$

u*: Velocidad de corte en m/s, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \, x \, d \, x \, s)} = \sqrt{(9{,}80665 \, x \, 0{,}13 \, x \, 0{,}032)} = 0{,}202$$

1.4.1 Restricciones de la zona de mezcla

No es necesario restringir –es decir, limitar– la extensión máxima de la zona de mezcla, dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- No existen usos primarios, poblacionales, agrícolas, industriales u otros de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia de hasta dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla (igual a 60 m).
- No existe un cuerpo de agua léntico natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (30 m).
- No existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (30 m).
- La longitud de la zona de mezcla no es mayor de 500 m.

5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

Dado que no se dispone de una serie histórica de datos hidrológicos, el caudal del cuerpo receptor ha sido determinado en la época de estiaje en una medición única (véase el acápite VI.1.3).

Este caudal instantáneo –Q_x– se corrige con un factor de seguridad de 2, que considera la variabilidad multianual de los caudales en época de estiaje y la inseguridad de la información basada en una medición única:

$$Q_{RH,crit} = \frac{Qx}{2} = \frac{180 \, L/s}{2} = 90 \, L/s$$

El referido caudal crítico de dilución no debe ser reducido adicionalmente, dado que no es necesario restringir la extensión de la zona de mezcla, tal como se ha demostrado en el acápite VI.1.4.1.

6. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, se han determinado las características químico-físicas del cuerpo receptor a través de la toma de muestras de agua y el análisis en un laboratorio cuyos parámetros están acreditados ante INACAL.

La toma de muestra fue realizada en una distancia de aproximadamente 20 m aguas arriba del vertimiento actual, lo que permite excluir la influencia del vertimiento en curso sobre la calidad del agua en el punto de control. Asimismo, la toma de muestra fue realizada el día 17 de junio de 2013, que corresponde a la época de estiaje, como se ha demostrado en el acápite VI.1. Por lo tanto, las concentraciones determinadas corresponden al periodo más crítico en lo que concierne a la capacidad de asimilación de carga contaminante.

Tabla 7. Concentraciones en el cuerpo natural de agua determinadas en la época de estiaje

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/AÑO	17/6/2013	ECA-AGUA CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	
Caudal del cuerpo receptor	L/s	180	
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	
Nombre laboratorio		XXXX SAC	
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	
Coordenada norte (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	
Coordenada este (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	
Oxígeno disuelto	mg O_2 /L	7,95	5 (bebida); 4 (riego)
DBO_5	mg O_2 /L	< 6	15
DQO	mg O_2 /L	11	40
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	<1,0	1
Coliformes termotolerantes (44,5 °C)	NMP/100mL	330	1000 (riego tallo bajo y bebida) 2000 (riego tallo alto)

Se analizaron los parámetros que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, que son aquellos definidos en el acápite VI.1.2.1.

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que ninguno de los parámetros evaluados excede los ECA-Agua de la categoría 3.

7. BALANCE DE MASA

A continuación se calculan las concentraciones de los parámetros aguas abajo de la zona de mezcla (C0) mediante el balance de masa:

$$C0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

El cumplimiento de los ECA-Agua se evalúa con:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0 : concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{RH} : concentración en el cuerpo receptor, determinada según el acápite VI.1.6.

C_{vert} : concentración máxima en las aguas residuales tratadas, determinada según el acápite VI.1.2.2.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado según el acápite VI.1.5.

Qv_{ertV}: caudal máximo del vertimiento, determinado según el acápite VI.1.2.3.

C_{ECA} : ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

Tabla 8. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$Q_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
Oxígeno disuelto (O_2)	Véase evaluación específica en el acápite VI.1.8.						
DBO_5	6,25	10	90	0	0,6	15	Cumple ECA-Agua
DQO	6,25	200	90	11	23,3	40	Cumple ECA-Agua
Aceites y grasas	6,25	20	90	0	1,3	1	Excede ECA-Agua
Coliformes termotolerantes	6,25	10 000	90	330	958	1000	Cumple ECA-Agua

El balance de masa demuestra que la mayoría de los parámetros cumplirán con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla. Sin embargo, se evidencia un riesgo de incumplimiento del parámetro aceites y grasas.

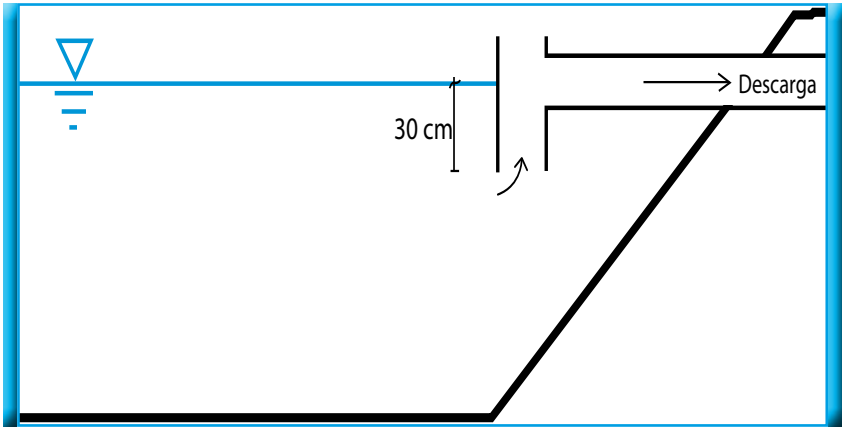
La carga contaminante máxima admisible de los aceites y grasas en las aguas residuales vertidas se calcula con la siguiente ecuación, que integra la condición para el cumplimiento de los ECA-Agua y la ecuación de mezcla:

$$(C_{vert} \text{ x } Q_{vert} \leq Q_{RH,crit} \text{ x } (C_{ECA} - C_{RH}) + Q_{vert} \text{ x } C_{ECA} \leq 90 \text{ x } (1 - 0) + 6{,}25 \text{ x } 1 \leq 96{,}25 \text{ mg/s}$$

Para reducir la carga contaminante del vertimiento a niveles inferiores a la carga admisible, hay dos opciones: reducción del caudal del vertimiento mediante el reuso parcial de las aguas residuales tratadas, o reducción de la concentración de los aceites y grasas en el efluente, mediante mejoras del sistema de tratamiento. Sin embargo, en el área del proyecto no existe una demanda de las aguas residuales tratadas con la finalidad de reuso y, por lo tanto, no será posible reducir el caudal del vertimiento. Por ello, habrá que reducir la concentración de aceites y grasas en el agua residual tratada. La concentración máxima del contaminante que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \text{ x } (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA} \leq \frac{90 \text{ x } (1-0)}{6{,}25} + 1 \leq 15{,}4 \text{ mg/l}$$

Gráfico 32. Dispositivo de descarga de la laguna facultativa



Para obtener una mayor eficiencia de remoción de aceites y grasas y una mayor seguridad para el cumplimiento del ECA-Agua, se ubicarán los dispositivos de descarga de la laguna en una profundidad de aproximadamente 30 cm debajo de la superficie. Esta medida garantizará que los aceites y grasas flotantes en la superficie de la laguna no serán descargados al cuerpo natural de agua. Asimismo, se incluirá en el plan de operación y mantenimiento la limpieza manual de la materia flotante en la superficie de la laguna, con una frecuencia semestral.

8. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE OXÍGENO DISUELTO AGUAS ABAJO DE LA ZONA DE MEZCLA

El oxígeno disuelto llega a la concentración mínima aguas abajo y distante de la zona de mezcla, debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de la materia orgánica y la nitrificación del nitrógeno amoniacal, para luego recuperarse a través de la reaeración y la producción de oxígeno de las algas.

A seguir se evalúa el cumplimiento del ECA-Agua para oxígeno disuelto con la metodología propuesta por Hydroscience (1971).

Esta evaluación se realiza para las condiciones más críticas, las cuales se encuentran en la época de estiaje, debido a los bajos caudales disponibles para la dilución y las temperaturas del agua relativamente altas.

El método simplificado corresponde a la siguiente inecuación:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

Donde:

$ECAO_2$: ECA-Agua de oxígeno disuelto en la categoría 3: 5,0 mg O_2/L.

CO_2,RH : concentración de oxígeno disuelto medida en el cuerpo receptor en el periodo de estiaje: 7,95 mg O_2/L.

D_C : Déficit máximo de oxígeno disuelto, que se calcula con Hydroscience (1971):

$$D_C = L_0 x \phi^{\frac{\phi}{1-\phi}} = 20{,}8 x 20{,}2^{\frac{20{,}2}{1-20{,}2}} = 0{,}88\ mg/L$$

L_0 : demanda de oxígeno disuelto debido al consumo de la materia orgánica (mg O_2/L) después de la mezcla completa, que se calcula con el balance de masas:

$$L_0 = \frac{DBO_{U,vert} \text{ x } Q_{vert} + DBO_{U,RH} \text{ x } Q_{RH,crit}}{(Q_{vert} + Q_{RH,crit})} = \frac{320 x 6{,}25 + 0 x 90}{(6{,}25 + 90)} = 20{,}8 mg/l$$

DBO_U,vert: demanda Bioquímica de Oxígeno última del vertimiento, que para aguas residuales doméstico-municipales, luego de un tratamiento secundario, puede ser determinada con la siguiente relación empírica con la DBO del ensayo de cinco días:

$$DBO_{U,vert} = DBO_{5,vert} \text{ x } 3{,}20 = 100 \text{ x } 3{,}20 = 320 \text{ mg/l}$$

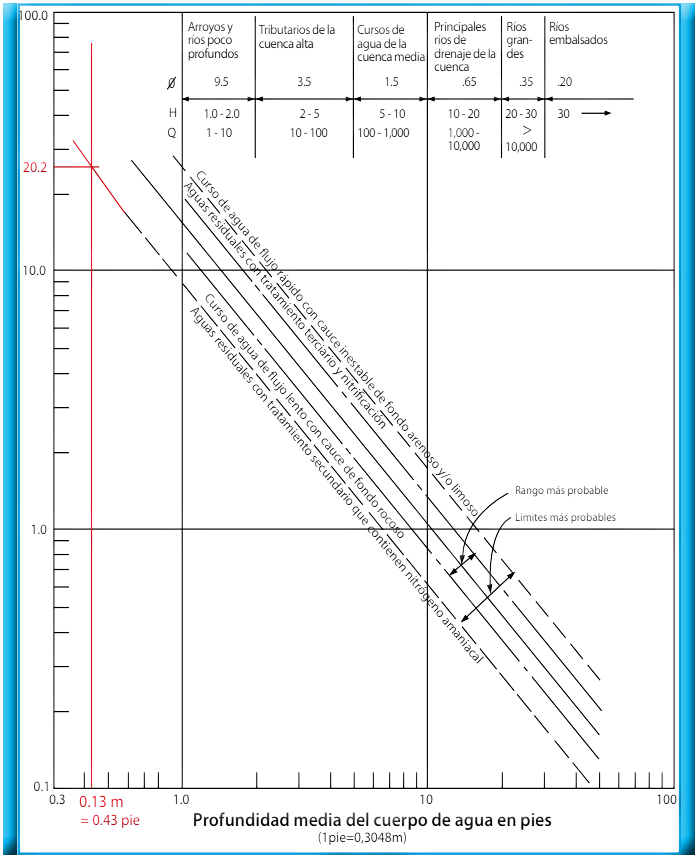
$DBO_{U,RH}$: demanda Bioquímica de Oxígeno última del cuerpo de agua determinada en un ensayo de laboratorio de veinte días. En el caso específico en el que el análisis de la DBO_5 ha demostrado la ausencia de carga orgánica en el cuerpo receptor, la $DBO_{U,RH}$ es supuesta de cero (0) mg/l.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado en el acápite VI.1.5: 90 L/s.

Q_{vert} : caudal máximo del vertimiento, determinado en el acápite VI.1.2.3.: 6,25 L/s.

Φ : tasa de asimilación definida con K_a/K_d (tasa de reaeración entre tasa de desoxigenación carbonácea), que se determina en función de la profundidad media del cuerpo natural aplicando el gráfico 31, y considerando las condiciones más críticas (curso de agua de flujo lento y aguas residuales con tratamiento secundario que contienen nitrógeno amoniacal).

Gráfico 33. Tasa de asimilación de oxígeno disuelto – Φ (Salas & Martino, 1990)



Con estos datos de ingreso se obtiene:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

$$5{,}0 \leq 7{,}95 - 0{,}88$$

$$5{,}0 \leq 7{,}07$$

Esto demuestra que la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla ocasionada por la oxidación de la materia orgánica contenida en el efluente será 7,07 mg/l, y cumplirá con el ECA-Agua de 5,0 mg/l.

9 PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL

A continuación se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo receptor, el cual comprende la determinación de la carga contaminante en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 9. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL*	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida del dispositivo de descarga	Caudal, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, aceites y grasas (MEH), coliformes termotolerantes (44,5 °C), DBO_5, DQO, sólidos suspendidos totales	Anual	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 10. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL*	FRECUENCIA DE CONTROL*	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
	NOMBRE	CAT. ECA				ZONA	NORTE	ESTE
RH-1	Quebrada XXXXX	3	20 m aguas arriba del vertimiento	pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, aceites y grasas (MEH), coliformes termotolerantes (44,5 °C), DBO_5, DQO	Anual en la época de estiaje (junio)	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-2	Quebrada XXXXX	3	30 m aguas abajo del vertimiento en la misma orilla donde se realiza el vertimiento		Anual en la época de estiaje (junio)	XX	XXXXXXX	XXXXXX

* La frecuencia de control ha sido establecida en función del volumen anual de aguas residuales vertidas:
V_{anual} = 3750 habitantes x 0,18 m^3/hab/día x 365 días x 80% = 197 100 m^3. Valor que está en el rango de 0 – 300 000 m^3 y resulta en una frecuencia anual, lo que está conforme con la frecuencia mínima establecida en la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

Las tomas de muestra del efluente y del cuerpo receptor serán realizadas en la misma fecha y en conformidad con la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

Dado que la evaluación realizada en el acápite VI.1.8 no indica un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, no será necesario establecer puntos de control adicionales para el control de las concentraciones de oxígeno disuelto aguas abajo del vertimiento.

10 CONCLUSIONES

- El vertimiento de aguas residuales domésticas tratadas a la quebrada XXX no causará un incumplimiento de los ECA-Agua fuera de la zona de mezcla, dado que:
  - Las concentraciones en el límite de la zona de mezcla calculadas con el balance de masas en las condiciones más críticas no exceden los ECA-Agua de los parámetros característicos de las aguas residuales vertidas, a excepción de los aceites y grasas.
  - La concentración de aceites y grasas en el efluente no será mayor de 15,4 mg/l, lo que permitirá cumplir con el ECA-Agua correspondiente. Para tal fin, se incluirá en el diseño de la PTAR un dispositivo en la descarga, que permitirá la retención de los aceites y grasas en la laguna facultativa.
  - La concentración mínima de oxígeno aguas abajo de la zona de mezcla es mayor que el ECA-Agua correspondiente.
- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en dos puntos de control establecidos a 20 m aguas arriba y a 30 m aguas abajo del vertimiento. No será necesario establecer un punto adicional para el control del oxígeno disuelto, dado que la evaluación no indica un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua. Considerando el bajo volumen de aguas residuales vertidas, se realizará solo una (1) toma de muestra por año, preferiblemente en el mes de junio, cuando el caudal del cuerpo receptor llegue a un mínimo.


2

VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES URBANAS TRATADAS A UN RÍO

1. Descripción del proyecto

Se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- PTAR de una población urbana de 215 458 habitantes.
- En la ciudad servida existen actividades industriales, como mataderos, curtiembre, cemento, acero, cervecería y de productos lácteos.
- En la actualidad, el vertimiento de aguas residuales es realizado sin tratamiento a un cuerpo natural de agua.
- El tratamiento proyectado abarca tratamiento primario con criba gruesa y fina, desarenador y sedimentadores primarios, tratamiento secundario biológico mediante lodos activados, sedimentadores secundarios, filtros de arena rápidos y desinfección con luz ultravioleta (UV).
- El sistema de tratamiento es diseñado para cumplir con los LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (D.S. Nº 003-2010-MINAM), y el caudal de diseño es determinado para el probable número de habitantes en el año 2024, calculado con una tasa de crecimiento de la población de 3%.
- Las aguas residuales tratadas serán descargadas a un río de Categoría ECA-Agua 3, Riego de vegetales y bebida de animales. El río no tributa a un cuerpo de agua natural léntico.
- Aguas abajo del vertimiento, a una distancia del vertimiento de 1200 metros, existe una toma de agua para uso agrícola; sin embargo, hasta esta distancia no existen otros usos del recurso hídrico.

2. Características del agua residual tratada

2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

En la tabla 11 se determina la lista de parámetros por evaluarse en función de las características de las aguas residuales municipales y de las actividades industriales presentes en el área servida por el servicio de alcantarillado.

2.2 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento proyectado de una PTAR futura, se supone que las concentraciones máximas de los parámetros considerados en el D.S.N° 003-2010-MINAM corresponden a los LMP.

Tabla 11. Lista de parámetros por evaluarse

AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE MATADEROS[2]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE CURTIEMBRE[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE PROCESOS METALÚRGICOS (ACERO)[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA FABRICACIÓN DE CERVEZA[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS[3]	PARÁMETROS A EVALUARSE
OD		OD			OD		OD
A y g	A y g	A y g		A y g	A y g	A y g	A y g
C. term.		C. term.					C. term.
DBO_5	DBO_5	DBO_5			DBO_5	DBO_5	DBO_5
DQO	DQO	DQO		DQO	DQO	DQO	DQO
$P\text{-}PO_4(L)$	$P\text{-}PO_4$	$P\text{-}PO_4(L)$			$P\text{-}PO_4(L)$	$P\text{-}PO_4$	--- 4
$N\text{-}NO_3(L)$	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NO_3(L)$		$N\text{-}NO_3(L)$	$N\text{-}NO_3(L)$	$N\text{-}NO_3$	--- 4
$N\text{-}NO_4(L)$	$N\text{-}NO_4$	$N\text{-}NO_4(L)$			$N\text{-}NO_4(L)$	$N\text{-}NO_4$	--- 4
		SO_4		SO_4			SO_4
Metales			Metales	Metales			Metales
				CN_{WAD}			CN_{WAD}
		Cr^{+6}		Cr^{+6}			Cr^{+6}
		Fenoles					Fenoles

Leyenda: (A y g) aceites y grasas, (C. term.) coliformes termotolerantes, (DBO_5) demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, (DQO) demanda química de oxígeno, (CN_{WAD}) cianuro WAD, (Cr^{+6}) cromo hexavalente, (Metales) todos los metales y metaloides determinados con ICP e indicados en la categoría ECA-Agua 3: aluminio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, calcio, cobalto, cobre, hierro, litio, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, sodio y zinc, ($N\text{-}NO_3$) nitrógeno en nitratos, ($P\text{-}PO_4$) fosfatos como fósforo.

1 Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2014). Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, acápite I.2, tabla 2.

2 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana de Santiago de Chile (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Industria procesadora de la carne.

3 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana de Santiago de Chile (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Fabricación de productos lácteos.

4 Los nutrientes no deberán ser evaluados, dado que el cuerpo receptor no tributa a un cuerpo de agua natural léntico.

Tabla 12. Concentraciones máximas de los parámetros considerados en el D.S. N° 003-2010-MINAM

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP (D.S. N.º 003-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PROYECTADA
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200	200
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150	150
Aceites y grasas	mg/L	20	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000	10 000

Para poder determinar las concentraciones máximas de los parámetros no considerados en los LMP, se ha caracterizado la calidad de las aguas residuales crudas que en la actualidad son vertidas al cuerpo receptor. Con tal propósito, se han tomado muestras singulares en tres fechas diferentes y en diferentes horarios.

Tabla 13. Concentraciones máximas de los parámetros no considerados en los LMP

		RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (MIN. PARA OD)
Fecha de muestreo		23/7/2013	24/7/2013	25/7/2013	---
Hora de muestreo		10:30	08:30	15:00	---
Caudal	L/s	679	725	518	---
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	---
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	---
OD	mg O_2 /L	2,46	4,09	2,70	2,46
Temperatura	°C	24,61	25,12	24,89	25,12
Conductividad	μS/cm	1684	2453	2248	2453
pH	---	7,45	8,42	7,69	8,42
SO_4	mg/L	38,8	44,6	32,2	44,6
Aluminio	mg/L	1,81	2,52	1,71	2,52
Arsénico	mg/L	0,0200	0,0526	0,0243	0,0526

		RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (MIN. PARA OD)
Bario	mg/L	0,2002	0,3839	0,2307	0,3839
Berilio	mg/L	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Boro	mg/L	0,565	0,856	1,397	1,397
Cadmio	mg/L	0,0005	0,0026	0,0006	0,0026
Calcio	mg/L	55,4	59,5	51,5	59,5
Cobalto	mg/L	0,0011	0,0014	0,0012	0,0014
Cobre	mg/L	0,0814	0,0843	0,0846	0,0846
Hierro	mg/L	1,883	1,925	1,844	1,925
Litio	mg/L	0,0594	0,0569	0,0545	0,0594
Magnesio	mg/L	18,5	17,0	17,4	18,5
Manganeso	mg/L	0,0998	0,1087	0,1093	0,1093
Mercurio	mg/L	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010
Níquel	mg/L	0,0038	0,0056	0,0119	0,0119
Plata	mg/L	0,0015	0,0023	0,0003	0,0023
Plomo	mg/L	0,0237	0,0480	0,1953	0,1953
Selenio	mg/L	0,0009	0,0000	0,0011	0,0011
Sodio	mg/L	215,7	179,4	169,5	215,7
Zinc	mg/L	0,343	0,320	0,198	0,343
CN_{WAD}	mg/L	0,0023	0,0040	0,0020	0,0040
Cr^{+6}	mg/L	0,6606	0,2558	0,1112	0,6606
Fenoles	mg/L	0,0063	0,0049	0,0035	0,0063

2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas

Para la estimación del caudal máximo del vertimiento se aplican los criterios propuestos en la Norma OS. 100, Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria:

- Dotación de agua: 220 L/hab/d

- Variación máxima anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5
- Caudal de contribución de alcantarillado: 80% del caudal de agua potable consumida.

Con estas variables, el caudal medio y máximo horario se calcula con:

$$Q_{vert,medio} = \frac{220 \text{ x } 215\,458 \text{ x } 0{,}80}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60} = 439 \text{ L/s}$$

$$Q_{vert,max} = Q_{vert,medio} \text{ x } 1{,}8 = 790 \text{ L/s}$$

Para corroborar el caudal medio y máximo horario estimado, el día 25 de julio de 2013 se realizó la medición continua del caudal actualmente vertido mediante el uso de un correntómetro acústico.

Gráfico 34. Caudales horarios de aguas residuales medidos el día 25/7/2013

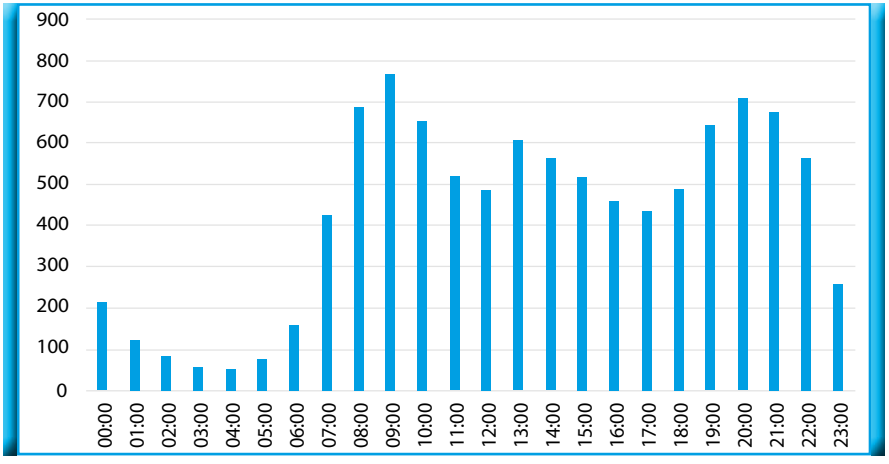


Tabla 14. Caudal horario medio y máximo del día 25/7/2013

Caudal medio	L/s	427
Caudal máximo	L/s	767
Relación	---	1 : 1,8

Como demuestra la tabla anterior, los resultados de la medición continua del caudal actualmente vertido confirmaron las estimaciones de los caudales medio y máximo horario.

Para determinar el caudal máximo futuro se debe considerar el crecimiento proyectado de la población. Con 215 458 habitantes en el año 2013 y un crecimiento de la población proyectado del 3%, la población futura se calcula con:

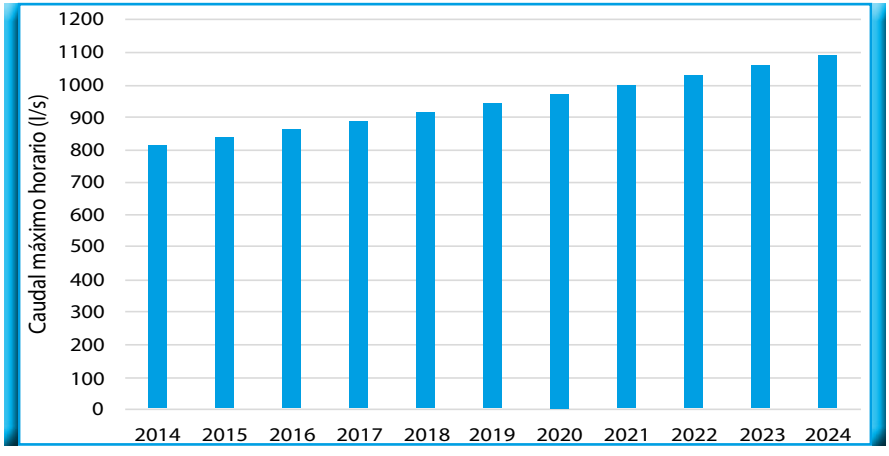
$$Hab_{añoX} = Hab_{2013} \times (1+0{,}03)^{años}$$

Con esta proyección de la población, el caudal máximo horario se calcula con:

$$Q_{vert} = \frac{220 \times Hab_{añoX} \times 1{,}8 \times 0{,}80}{24 \times 60 \times 60}$$

Como se representa en el gráfico 35, el caudal máximo del vertimiento muestra un crecimiento continuo correspondiente al crecimiento poblacional, llegando a un valor máximo de 1,093 L/s en el año 2024.

Gráfico 35. Caudal máximo horario de aguas residuales vertidas en el periodo 2014-2024



2.2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento primario (criba gruesa, media y fina, desarenador y sedimentadores primarios) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor fueron determinadas en la época de estiaje, que es el periodo más crítico en materia de capacidad de asimilación de la carga contaminante.

Tal como se evidencia en la tabla de los caudales mensuales en el acápite VI.2.5, la época de estiaje corresponde a los meses de junio y julio.

El día 22 de julio de 2013 se determinaron las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor correspondientes a la época de estiaje, con los siguientes resultados:

- Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento: $W_{min} = 24,5$ m
- Profundidad media del río aguas abajo del vertimiento: $d = 0,40$ m
- Velocidad de flujo media[48]: $u = 1,3$ m/s
- Caudal instantáneo: $Q_x = 12\,360$ L/s
- Factor de irregularidad del cauce: $c = 0,6$ (cauce natural con serpentear moderado).

La pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento fue determinada mediante GPS, determinando la diferencia de altitud entre el fondo del cauce en el punto de vertimiento proyectado y un punto ubicado en el fondo del cauce 500 m aguas abajo. La diferencia de altitud medida son 1,05 m. Con estos datos se calcula la pendiente del cauce con:

$$s = 1,05 / 500 = 0,021 \text{ m/m}$$

4. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento se aplica el método simplificado desarrollado por la US-EPA.

Para la época de estiaje y vertimiento en la orilla del curso de agua, la longitud de la zona de mezcla se calcula con:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \, u}{2 \, \pi \, Dy} = \frac{24,52 \text{ x} 1,3}{2 \text{ x } 3,1416 \text{ x } 0,069} = 1800 \text{ m}$$

Donde:

D_y : coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, que se calcula con:

$$D_y = c \text{ x } d \text{ x } u^* = 0,6 \text{ x } 0,4 \text{ x } 0,287 = 0,069$$

u^* : velocidad de corte en m/s, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \text{ x } d \text{ x } s)} = \sqrt{(9,80665 \text{ x } 0,4 \text{ x } 0,021)} = 0,287$$

4.1 Restricciones de la zona de mezcla

Dado que a 1200 metros aguas abajo del vertimiento existe una toma de agua para uso agrícola, es necesario restringir –es decir, limitar– la extensión máxima de la zona de mezcla, para proteger el

48 Promedio de todas las mediciones realizadas con el correntómetro en la sección donde se determinó el caudal.

uso del riesgo de impactos salud ocasionados por las concentraciones mayores a los ECA-Agua que ocurren en la zona de mezcla:

$$L_{ZdM} \leq \frac{L_{uso}}{2} = \frac{1200}{2} = 600 \text{ m}$$

Asimismo, la longitud de la zona de mezcla no debería ser mayor de 500 m[49]:

$$L_{ZdM} \leq 500 \text{ m}$$

Por lo tanto, para el vertimiento en orilla del río se debería reducir la longitud de la zona de mezcla de 1800 m (mezcla completa) a 500 m.

Sin embargo, para el vertimiento en el centro del río, mediante la disposición subacuática de las aguas residuales, la mezcla de las aguas residuales con el agua natural será más rápida y se reduce la longitud de la zona de mezcla.

Para el vertimiento en el centro del curso de agua la longitud de la zona de mezcla se calcula como sigue:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \, u}{8 \, \pi \, Dy} = \frac{24{,}5^2 \text{ x} 1{,}3}{8 \text{ x } 3{,}1416 \text{ x } 0{,}069} = 450 \text{ m}$$

Mediante el vertimiento en el centro del río se logra la mezcla completa a 450 m, lo que es inferior a la extensión máxima permisible de 500 m, y permite proteger el uso del agua ubicado 1800 m aguas abajo del vertimiento.

5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

En la tabla 15 se representa la serie de datos históricos del caudal registrados en la estación hidrológica XXXX, ubicada a aproximadamente cinco kilómetros aguas arriba del vertimiento. Dado que entre la estación hidrológica y el punto de vertimiento no existen tomas de agua o tributarios significativos, los datos son representativos para el tramo de río estudiado.

5.1 Reducción del caudal debido a la restricción de la zona de mezcla

En el numeral VI.2.4.1 se ha demostrado que para el vertimiento en la orilla será necesario restringir la extensión de la zona de mezcla para proteger el uso de agua con fines agrícolas ubicada a 1200 m del vertimiento, y para respetar la longitud máxima de 500 m, y no será posible aprovechar la sección de flujo total para la dilución. Esto significa que también el caudal crítico de dilución debería ser reducido según la siguiente ecuación.

Para un vertimiento en la orilla del río el caudal crítico de dilución reducido se calcula con:

$$\dot{Q}_{RH,crit,red} = Q_{RH,crit} \frac{\sqrt{(2 \, \pi \, Dy \, LZdM / u)}}{Wmin} = 7780 \text{ x}$$

$$\frac{\sqrt{(2\text{x}3{,}1416\text{x}0{,}069\text{x}500/1{,}3)}}{24{,}5} = 4101 \text{ L/s}$$

49 Véase ANA (2014). Lineamientos para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, acápite II.2.3.

Tabla 15. Caudales mensuales históricos medidos en la estación hidrológica XXXX, en m³/s

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2006	14,89	30,63	37,04	31,33	12,04	10,62	11,71	12,88	13,02	13,03	13,81	14,51
2007	16,64	14,28	17,03	14,21	12,33	12,03	11,97	12,02	12,44	13,14	13,00	12,99
2008	17,34	13,25	12,71	11,16	9,61	9,52	9,51	9,52	10,25	10,50	10,51	10,50
2009	9,67	17,69	20,08	9,01	9,00	8,60	7,78	8,01	8,84	9,20	9,21	9,20
2010	8,46	9,13	10,74	11,10	10,68	10,05	10,00	0,91	11,01	11,78	11,87	12,01
2011	11,87	33,79	33,66	27,31	13,32	12,97	13,04	13,00	12,72	13,90	13,69	14,12
2012	41,27	40,12	39,08	33,56	14,28	14,06	14,54	15,21	13,12	10,89	10,25	11,41
Promedio multianual	15,23	24,86	30,91	19,62	11,76	10,92	10,93	11,15	11,29	11,48	11,66	11,87

El caudal crítico de dilución ($Q_{RH,crit}$) es el valor mínimo de los caudales mensuales medios en los últimos cinco años, que corresponde a 7780 L/s registrados en el mes de julio de 2009.

Esto constituye una reducción del caudal disponible para la dilución de aproximadamente 50%, lo que conlleva restricciones significativas de la carga contaminante que se podrá disponer en el cuerpo receptor. Considerando el alto volumen del vertimiento proyectado, será necesario aprovechar el caudal total del río. Por lo tanto, se incluirá en el proyecto la disposición subacuática de las aguas residuales en el centro del río, lo que permite una mezcla más rápida de las aguas residuales con el agua natural y reduce la longitud de la zona de mezcla, de modo que no será necesario reducir el caudal disponible para la dilución.

6. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor se han establecido las características químico-físicas del cuerpo receptor a través de tres tomas de muestras de agua y el análisis en un laboratorio cuyos parámetros estén acreditados ante INACAL. Las tomas de muestra fueron realizadas en una distancia de aproximadamente 50 m aguas arriba del vertimiento actual, lo que permitió excluir la influencia del vertimiento en curso sobre la calidad del agua en el punto de control. Asimismo, los tres muestreos fueron realizados en la época de estiaje (junio-julio), el 27 de junio y el 10 y 25 de julio de 2013. Por lo tanto, las concentraciones determinadas corresponden al periodo más crítico en lo que corresponde a la capacidad de asimilación de carga contaminante. Se analizaron los parámetros, que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas y son aquellos definidos en el acápite VI.2.2.1.

Tabla 16. Concentraciones en el cuerpo natural de agua determinadas en la época de estiaje

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/ AÑO	27/6/2013	10/7/2013	25/7/2013	VALOR MÁXIMO (MÍNIMO PARA OD)	ECA-AGUACATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	14:00	09:00		
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	Laboratorio	Laboratorio		
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC		
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Coordenada norte (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
Coordenada este (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
TemperaturaC°	C°	16,1	16,2	15,6	16,2	-
pH	-	8,29	8,14	8,05	8,29	6,5-8,4 (bebida), 6,5-8,5 (riego)
Cond.	μS/cm	228	247	190	247	2000 (riego), 5000 (bebida)
OD	mg/L	8,85	9,28	8,67	8,67	5 (bebida), 4 (riego)
A y g	mg/L	<1,7	<1,7	<1,7	0	1
DBO_5	mg/L O_2	<6	<6	<3	0	15
DQO	mg/L O_2	9	<9	10	10	40
C. term	NMP/ 100mL	49	31	13	49	1000 (riego tallo bajo y bebida) 2000 (riego tallo alto)
SO_4	mg/L	4,5	4,3	3,2	4,5	300 (riego), 500 (bebida)
Aluminio total	mg/L	0,3	0,85	0,99	0,99	5
Arsénico	mg/L	0,021	0,018	0,007	0,021	0,05 (riego), 0,1 (bebida)
Bario	mg/L	0,042	0,037	0,030	0,042	0,7 (riego)
Berilio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0	0,1 (bebida)
Boro	mg/L	0,30	0,29	0,12	0,30	0,5-6 (riego), 5 (bebida)
Cadmio	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0	0,005 (riego), 0,01 (bebida)
Calcio	mg/L	20,789	19,098	13,773	20,789	200 (riego)
Cobalto	mg/L	<0,00022	0,00042	0,00041	0,00042	0,05 (riego), 1 (bebida)
Cobre	mg/L	0,003	<0,003	<0,003	0,003	0,2 (riego), 0,5 (bebida)
Hierro	mg/L	0,247	0,679	0,682	0,682	1
Litio	mg/L	0,0326	0,0299	0,0134	0,0326	2,5
Magnesio	mg/L	6,716	7,172	4,510	7,172	150
Manganeso	mg/L	0,0421	0,0753	0,0544	0,0753	0,2

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/AÑO	27/6/2013	10/7/2013	25/7/2013	VALOR MÁXIMO (MÍNIMO PARA OD)	ECA-AGUACATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	14:00	09:00		
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	Laboratorio	Laboratorio		
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC		
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Coordenada norte (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
Coordenada este (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
Mercurio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0	0,001
Níquel	mg/L	<0,003	<0,003	0,010	0,010	0,2
Plata	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0	0,05
Plomo	mg/L	<0,003	<0,003	<0,003	0	0,05
Selenio	mg/L	<0,006	<0,006	<0,006	0	0,05
Sodio	mg/L	31,11	24,54	19,06	31,11	200 (riego)
Zinc	mg/L	0,053	<0,003	<0,003	0,053	2 (riego), 24 (bebida)
CN_{WAD}	mg/L	n.d.	n.d.	n.d.	0	0.1
Cr^{+6}	mg/L	<0,006	<0,006	0,018	0,018	0,1 (riego), 1 (bebida)
Fenoles	mg/L	n. d	n. d	n. d	0	0,001

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que ninguno de los parámetros evaluados excede los ECA-Agua de la categoría 3.

7 BALANCE DE MASA

A continuación se calculan las concentraciones de los parámetros aguas abajo de la zona de mezcla mediante el balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

El cumplimiento de los ECA-Agua se evalúa con:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0 : concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{RH} : concentración en el cuerpo receptor, determinada en el acápite VI.2.6.

C_{vert} : concentración máxima en las aguas residuales tratadas, determinada en el acápite VI.2.2.2.

$Q_{RH,\ crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado en el acápite VI.2.5.1

Q_{vert} : caudal máximo del vertimiento, determinado en el acápite VI.2.2.3 para el año 2024.

C_{ECA} : ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

Tabla 17. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$Q_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
OD	Véase evaluación específica en el acápite VI.2.8.						
A y g	1093 L/s	20 mg/L	7475 L/s	0 mg/L	3 mg/L	1	**Excede ECA-Agua.**
DBO_5	1093 L/s	100 mg/L	7475 L/s	0 mg/L O_2	13 mg/L O_2	15	Cumple ECA-Agua
DQO	1093 L/s	200 mg/L	7475 L/s	10 mg/L O_2	34 mg/L O_2	40	Cumple ECA-Agua
C. term	1093 L/s	10000 NMP/100mL	7475 L/s	49,00 NMP/ 100mL	1318 NMP/ 100mL	1000 (riego tallo bajo y bebida) 2000 (riego tallo alto)	**Excede ECA-Agua**
SO_4	1093 L/s	44,6 mg/L	7475 L/s	4,5 mg/L	9,6 mg/L	300 (riego) 500 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Aluminio	1093 L/s	2,52 mg/L	7475 L/s	0,99 mg/L	1,18 mg/L	5	Cumple ECA-Agua
Arsénico	1093 L/s	0,0526 mg/L	7475 L/s	0,0210 mg/L	0,0250 mg/L	0,05 (riego)0,1 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Bario	1093 L/s	0,3839 mg/L	7475 L/s	0,0420 mg/L	0,0856 mg/L	0,7 (riego)	Cumple ECA-Agua
Berilio	1093 L/s	0,0000 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0000 mg/L	0,1 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Boro	1093 L/s	1,397 mg/L	7475 L/s	0,300 mg/L	0,440 mg/L	0,5-6 (riego) 5 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Cadmio	1093 L/s	0,0026 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0003 mg/L	0,005 (riego) 0,01 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Calcio	1093 L/s	59,5 mg/L	7475 L/s	20,8 mg/L	25,7 mg/L	200 (riego)	Cumple ECA-Agua
Cobalto	1093 L/s	0,0014 mg/L	7475 L/s	0,0004 mg/L	0,0005 mg/L	0,05 (riego) 1 (bebida)	Cumple ECA-Agua
Cobre	1093 L/s	0,0846 mg/L	7475 L/s	0,0030 mg/L	0,0134 mg/L	0,2 (riego) 0,5 (bebida)	Cumple ECA-Agua

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$Q_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
Hierro	1093 L/s	1,925 mg/L	7475 L/s	0,682 mg/L	0,841 mg/L	1	Cumple ECA-Agua
Litio	1093 L/s	0,0594 mg/L	7475 L/s	0,0326 mg/L	0,0360 mg/L	2,5	Cumple ECA-Agua
Magnesio	1093 L/s	8,5 mg/L	7475 L/s	7,2 mg/L	8,6 mg/L	150	Cumple ECA-Agua
Manganeso	1093 L/s	0,1093 mg/L	7475 L/s	0,0753 mg/L	0,0796 mg/L	0,2	Cumple ECA-Agua
Mercurio	1093 L/s	0,0010 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0001 mg/L	0,001	Cumple ECA-Agua
Níquel	1093 L/s	0,0119 mg/L	7475 L/s	0,0100 mg/L	0,0102 mg/L	0,2	Cumple ECA-Agua
Plata	1093 L/s	0,0023 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0003 mg/L	0,05	Cumple ECA-Agua
Plomo	1093 L/s	0,1953 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0249 mg/L	0,05	Cumple ECA-Agua.
Selenio	1093 L/s	0,0011 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0001 mg/L	0,05	Cumple ECA-Agua.
Sodio	1093 L/s	215,7 mg/L	7475 L/s	31,1 mg/L	54,7 mg/L	200 (riego)	Cumple ECA-Agua.
Zinc	1093 L/s	0,343 mg/L	7475 L/s	0,053 mg/L	0,090 mg	2 (riego) 24 (bebida)	Cumple ECA-Agua.
C_{NWAD}	1093 L/s	0,0040 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0005 mg/L	0,1	Cumple ECA-Agua.
Cr^{+6}	1093 L/s	0,6606 mg/L	7475 L/s	0,0180 mg/L	0,1000 mg/L	0,1 (riego) 1 (bebida)	Cumple ECA-Agua.
Fenoles	1093 L/s	0,0063 mg/L	7475 L/s	0,0000 mg/L	0,0008 mg/L	0,001	Cumple ECA-Agua.

El balance de masa demuestra que la mayoría de los parámetros cumplirán con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla. Sin embargo, se evidencia un riesgo de incumplimiento de los parámetros aceites y grasas y coliformes termotolerantes.

Para cumplir con el ECA-Agua, la carga contaminante del vertimiento debe ser reducida hasta el nivel de la carga admisible disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos, o ambos.

A continuación se evalúan las dos opciones:

- Reducción del caudal de vertimiento mediante reuso parcial de las aguas residuales tratadas.
- Reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos.

Para determinar el caudal máximo del vertimiento que permitirá cumplir los ECA-Agua se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{vert,admisible} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})}$$

Y el caudal que debería ser reusado se calcula con:

$$Q_{reuso} = Q_{AR,total} - Q_{vert,admisible}$$

Este análisis fue realizado para los diferentes meses del año 2014 y 2024, considerando el crecimiento del caudal del vertimiento. El caudal mensual crítico del río, disponible para la dilución, es determinado con base en los caudales mensuales históricos indicados en la tabla 15, correspondiente al caudal mensual mínimo en el periodo 2008-2012.

Gráfico 36. Caudal máximo mensual del vertimiento admisible y caudal de aguas residuales por reusarse en el año 2014

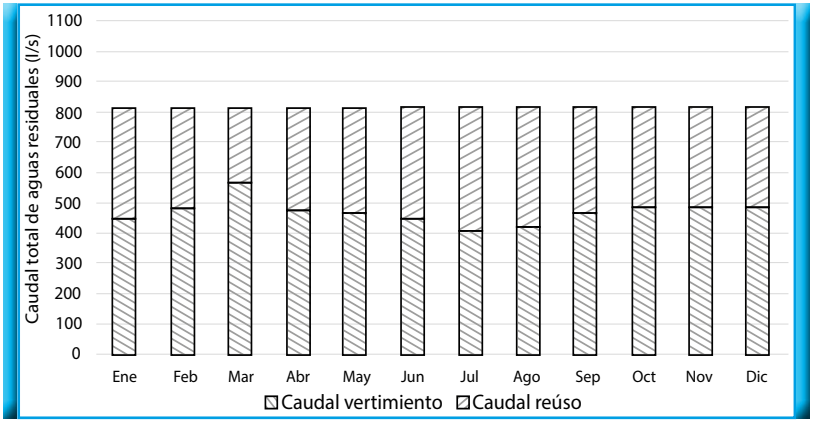
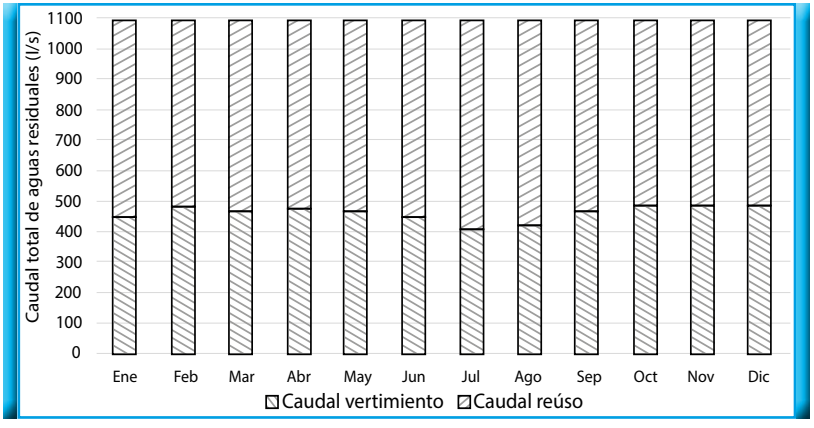


Gráfico 37. Caudal máximo mensual del vertimiento admisible y caudal de aguas residuales por reusarse en el año 2024



Como se evidencia en los gráficos antecedentes, en la época seca (desde abril hasta septiembre) el caudal de aguas residuales destinadas al reuso es mayor, lo que corresponde a las exigencias variables de la agricultura. Además, se observa que el caudal que deberá ser reusado crece de aproximadamente 400 L/s en el año 2014 a casi 700 L/s en 2024.

Posteriormente, se analiza la segunda opción, el mayor nivel de tratamiento de aguas residuales. Para este fin, se calculan las concentraciones máximas de aceites y grasas y coliformes termotolerantes en las aguas residuales, que permiten el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_{vert,admis} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

Este análisis es realizado para el periodo 2014-2024, considerando las condiciones más críticas en materia de capacidad de asimilación del cuerpo receptor, es decir, las condiciones de la época de estiaje. Asimismo, se calcula la eficiencia de remoción de los parámetros críticos requerida.

Tabla 18. Concentraciones máximas admisibles de aceites y grasas y coliformes termotolerantes en las aguas residuales vertidas en el periodo 2014-2024

VARIABLE	UNIDAD	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Q_{vert}	L/s	814	838	863	889	916	943	972	1001	1031	1062	1093
$C_{AR\ crudas}$ de A y g	mg/l	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04	67,04
$C_{AR\ crudas}$ de C. term	NMP/	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10	2,3E10
$C_{vert,admis}$ de A y g	mg/l 100mL	10,6	10,3	10,0	9,7	9,5	9,2	9,0	8,8	8,5	8,3	8,1
Eficiencia de remoción de A y g requerida	%	84%	85%	85%	85%	86%	86%	87%	87%	87%	88%	88%
$C_{vert,admis}$ de C. term	NMP/ 100mL	10093	9828	9571	9321	9079	8843	8615	8393	8178	7969	7772
Eficiencia de remoción de C. term requerida	Unidades logarit.	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10	2,30 E+10

Del cálculo de las concentraciones máximas admisibles en el vertimiento que permiten el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor, se puede concluir:

- La concentración máxima admisible de aceites y grasas en el efluente es 10,6 mg/L en el año 2014 y se reduce hasta 8,1 mg/L en el año 2024, lo que corresponde a una eficiencia de remoción requerida del 84% y 88%, respectivamente. Esta eficiencia de remoción podrá ser lograda solamente con la modificación del sistema de tratamiento inicialmente

propuesto, incluyendo un separador de aceites y grasas en la etapa de tratamiento primario.

- La densidad máxima admisible de coliformes termotolerantes en el efluente es de 10 093 NMP/100 mL en el año 2014 y 7772 NMP/100 mL en el año 2024. Dado que estos valores están muy próximos al LMP de 10 000 NMP/100 mL, no será necesario modificar el sistema de tratamiento y su cumplimiento podrá ser garantizado mediante el sistema de desinfección con UV propuesto.

8 EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE OXÍGENO DISUELTO AGUAS ABAJO DE LA ZONA DE MEZCLA

El oxígeno disuelto llega a la concentración mínima aguas abajo y distante de la zona de mezcla debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de materia orgánica y la nitrificación del nitrógeno amoniacal, para luego recuperarse a través de la reaeración y la producción de oxígeno de las algas.

Para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua, a continuación se desarrolla la evaluación simplificada para oxígeno disuelto con la metodología propuesta por Hydroscience (1971), aplicando las condiciones más críticas (época de estiaje), debido a los bajos caudales disponibles para la dilución y las temperaturas del agua relativamente altas. Asimismo, se aplica el caudal de aguas residuales máximo horario del año 2024.

El método simplificado corresponde a la siguiente inecuación:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

Donde:

$ECAO_2$: ECA-Agua de oxígeno disuelto en la categoría 3:5,0 mg O_2/L.

CO_2,RH : concentración de oxígeno disuelto medida en el cuerpo receptor en el periodo de estiaje: 8,67 mg O_2/L.

D_C : déficit máximo de oxígeno disuelto, que se calcula con Hydroscience (1971):

$$DC = LO \times \phi^{\frac{\phi}{1-\phi}} = 39{,}4 \times 6{,}1^{\frac{6{,}1}{1-6{,}1}} = 4.53 mg/l$$

L_0 : demanda de oxígeno disuelto debido al consumo de materia orgánica (mg O_2/L), que se calcula con:

$$L_0 = \frac{DBO_{U,vert} \times Q_{vert} + DBO_{U,RH} \times Q_{RH,crit}}{(Q_{vert} + Q_{RH,crit})} = \frac{320 \times 1093 + 0 \times 7780}{(1093 + 7780)} = 39{,}4 \text{ mg/l}$$

$DBO_{U,vert}$: demanda bioquímica de oxígeno última del vertimiento, que para aguas residuales doméstico-municipales, luego de un tratamiento secundario, puede ser determinada con la siguiente relación empírica con la DBO del ensayo de cinco días:

$$DBO_{U,vert} = DBO_{5,vert} \times 3{,}20 = 100 \times 3{,}20 = 320 \text{ mg/l}$$

$DBO_{U,RH}$: demanda bioquímica de oxígeno última del cuerpo de agua, determinada en un ensayo de laboratorio de veinte días. En el caso específico, en el que el análisis de DBO_5 ha demostrado la ausencia de carga orgánica en el cuerpo receptor (véase el acápite VI.2.6), la $DBO_{U,RH}$ es supuesta 0 mg/L.

$Q_{RH,crit}$: caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, determinado en el acápite VI.2.5.: 7780 L/s.

Q_{vert} : caudal máximo del vertimiento, determinado en el acápite VI.2.2.3. para el año 2024: 1093 L/s.

Φ : tasa de asimilación definida con Ka/Kd (tasa de reaeración entre tasa de desoxigenación carbonácea), que se determina en función de la profundidad media del cuerpo natural aplicando el siguiente gráfico y considerando las condiciones: curso de agua de flujo rápido y fondo rocoso, y aguas residuales con tratamiento secundario que contienen nitrógeno amoniacal.

(Corresponde a gráfico 38)

Con estos datos de ingreso se obtiene:

$$ECA_{02} \leq C_{02RH} - D_C$$
$$5{,}0 \leq 8{,}67 - 4{,}53$$
$$5{,}0 \leq 4{,}14$$

Esto indica que la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla ocasionada por la oxidación de la materia orgánica contenida en el efluente será menor que el ECA-Agua. Por lo tanto, se deberá reducir la carga orgánica del vertimiento.

La máxima demanda admisible de oxígeno disuelto debido a consumo de materia orgánica ($L_{0,max}$) después de la mezcla completa se calcula con:

$$L_{o,max} = \frac{(C_{O2,RH} - ECA_{O2})}{\frac{\varphi}{\varphi^{1-\varphi}}}$$

$$L_{o,max} = \frac{(8{,}67 - 5)}{\frac{6{,}1}{6{,}1^{1-6{,}1}}} = \frac{3{,}67}{0{,}115} = 31{,}91 \text{mg/l}$$

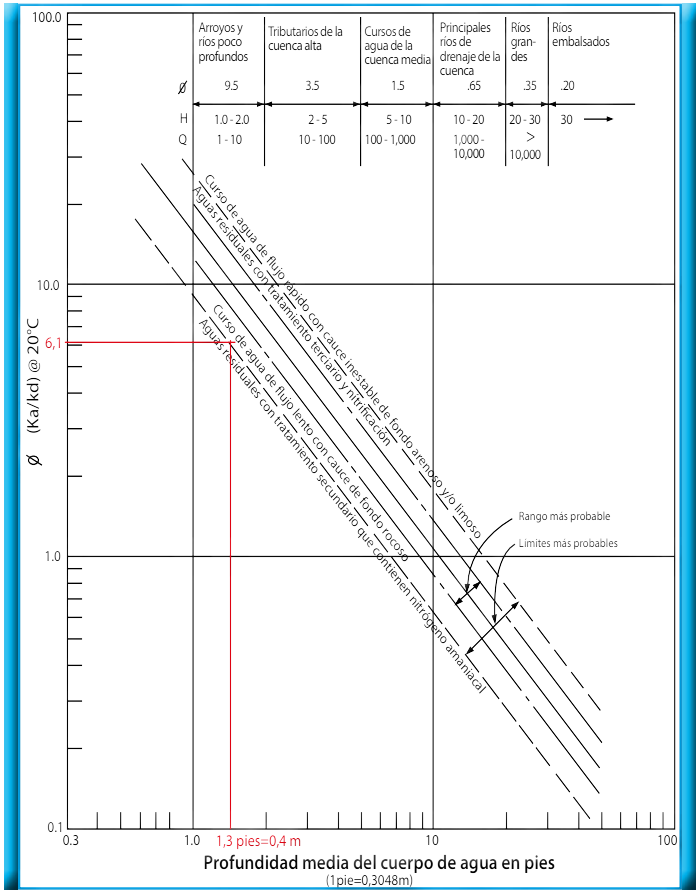
Para lograr esta demanda máxima de oxígeno disuelto se puede reducir el caudal del vertimiento mediante el reuso de parte de las aguas residuales, o la concentración de la DBO a través de un mayor nivel de tratamiento.

Dejando invariada la carga orgánica del vertimiento, el caudal máximo admisible para el cumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, se calcula con:

$$Q_{vert} = \frac{(L_{o,max} - DBO_{U,RH}) \times Q_{RH,crit}}{DBO_{U,vert} - L_{o,max}} = \frac{(31{,}91 - 0).7780}{320 - 31{,}91} = 862 \text{ L/S}$$

Lo que significa que, a partir del año 2014, una parte de las aguas residuales deberán ser reusadas, llegando a 20% de reuso en el año 2024.

Gráfico 38. Tasa de asimilación de oxígeno disuelto – Φ (Salas & Martino, 1990)



Por el otro lado, dejando invariado el caudal del vertimiento, la concentración máxima admisible de la demanda bioquímica de oxígeno última del vertimiento se calcula con:

$$DBO_{U,vert} = \frac{L_{0,mas} \text{ x } (Q_{vert} + Q_{RH,crit}) - DBO_{U,RH} \text{ x } Q_{RH,crit}}{Q_{vert}} = \frac{31{,}91x(1093+7780)-0 \text{ x}7780}{1093} = 259{,}0 \text{ mg/l}$$

La concentración máxima admisible de la DBO_5 del vertimiento se calcula con:

$$DBO_{5,vert} = \frac{DBO_{U,vert}}{3,2} = 81,0 \text{ mg/l}$$

Para lograr esta concentración de la DBO_5 en las aguas residuales tratadas, se deberá rediseñar el sistema de tratamiento, previendo mayores tiempos de aireación y, en consecuencia, tanques de lodos activados más grandes; así se lograrían concentraciones de DBO_5 en el efluente menores de 81 mg/L.

9. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LA DISPOSICIÓN FINALDE AGUAS RESIDUALES TRATADAS

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, coliformes termotolerantes y oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla.

Por lo tanto, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables, como se describe a continuación.

Reducción del caudal de vertimiento mediante reuso parcial de las aguas residuales tratadas

La evaluación realizada indicó los siguientes caudales de vertimiento admisibles que permitirán el cumplimiento de los ECA-Agua:

PARÁMETRO CRÍTICO	ACEITES Y GRASAS	COLIFORMES TERMOTOLERANTES	OXÍGENO DISUELTO
Caudal máximo admisible para cumplimiento del ECA-Agua	409 L/s	822 L/s	862 L/s
Caudal máximo de aguas residuales en el año 2014	814 L/s		
Caudal máximo de aguas residuales en el año 2024	1093 L/s		
Caudal a ser reusado 2014	405 L/s	0 L/s	0 L/s
Caudal a ser reusado 2014	684 L/s	271 L/s	231 L/s

El parámetro más crítico para el cumplimiento de los ECA-Agua son los aceites y grasas, resultando en un caudal admisible de vertimiento de 409 L/s, lo que resulta en un caudal de 405 L/s por reusarse en el año 2014, que se incrementa a 684 L/s en el año 2024.

Considerando que la calidad del agua residual tratada a nivel de los LMP permite un reuso en el riego de cultivos industriales (agricultura altamente mecánica) o en el riego de cultivos de tallo alto con sistemas de goteo,[50] esta alternativa no generaría mayores costos de tratamiento de las aguas residuales. Al contrario, la alternativa podría mejorar la viabilidad económica del proyecto, dado que la EPS podría cobrar a los agricultores el servicio de tratamiento de aguas residuales con fines de reuso.[51] Sin embargo, será necesario desarrollar un proyecto de reuso de aguas residuales en cooperación con la junta de los agricultores locales o una empresa agrícola.

Reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos

La evaluación realizada indicó que el vertimiento con un caudal máximo de 1093 L/s en el año 2024 no debería superar las siguientes concentraciones para poder cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor:

PARÁMETRO CRÍTICO	ACEITES Y GRASAS	COLIFORMES TERMOTOLERANTES	DBO_5
Concentración máxima en las aguas residuales crudas	67,0 mg/l	2,3E+10 NMP/100mL	664,4 mg/l
Concentración máxima admisible para cumplimiento del ECA-Agua	8,1 mg/l	7772 NMP/100mL	81,0 mg/l

Para lograr estas concentraciones máximas en el efluente, el sistema de tratamiento de aguas residuales debería ser modificado según el siguiente detalle:

- Etapa primaria: Separadores de aceites y grasas.
- Etapa secundaria: aireación prolongada para lograr un mayor grado de oxidación de la materia orgánica.

El análisis de la viabilidad económica de estas modificaciones del sistema de tratamiento inicialmente propuesto indicó un incremento significativo del costo de construcción y operación. Por lo tanto, se descarta la alternativa de un mayor grado de tratamiento y se implementará el reuso parcial de las aguas residuales tratadas.

10. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL

Se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

50 Guías OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises, 3.ª edición, volúmenes 1-4, 2006.
51 Ley N° 30045, Ley de Modernización de los Servicios de Saneamiento y su reglamento (D.S. N° 015-2013-VIVIENDA).

Tabla 19. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ARÁMETROS DE CONTROL DEL PUNTO DEL PUNTO	FRECUENCIA DE CONTROL[3]	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida de la PTAR antes de la descarga y reuso	Caudal, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, aceites y grasas (MEH), coliformes termotolerantes (44,5 °C), huevos de helminto1, DBO_5, DQO, sólidos suspendidos totales, sulfatos, metales2, cromo hexavalente, fenoles	Mensual	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 20. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL[3]	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
	NOMBRE	CAT. ECA DEL PUNTO				ZONA	NORTE	ESTE
RH-1	Río XXXXX	3	50 m aguas arriba del vertimiento	pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura,	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-2	Río XXXXX	3	500 m aguas abajo del vertimiento en el centro del río	aceites y grasas (MEH), coliformes termotolerantes (44,5 °C), DBO_5, DQO, sulfatos, metales2, cromo hexavalente, fenoles	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-3[5]	Río XXXXX	3	2 km aguas abajo del vertimiento	Oxígeno disuelto	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-4[5]	Río XXXXX	3	4 km aguas abajo del vertimiento	Oxígeno disuelto	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-5[5]	Río XXXXX	3	6 km aguas abajo del vertimiento	Oxígeno disuelto	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-6[5]	Río XXXXX	3	8 km aguas abajo del vertimiento	Oxígeno disuelto	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-7[5]	Río XXXXX	3	10 km aguas abajo del vertimiento	Oxígeno disuelto	Mensual en la época de estiaje[4]	XX	XXXXXXX	XXXXXX

1 En el efluente serán controlados también los huevos de helminto, dado que parte de las aguas residuales será reusada.

2 Los metales considerados en la categoría ECA-Agua 3 y determinados con ICP son: aluminio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, calcio, cobalto, cobre, hierro, litio, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, sodio y zinc.

3 La frecuencia de control ha sido establecida en función del volumen anual de aguas residuales vertidas: Vanual = Caudal medio en el año 2024 x 365 días = 607 L/s x 3600s x 24h x 365 días / 1000L = 19,15 M m^3. Valor que está en el rango >9 M m^3 y resulta en una frecuencia mensual, lo que está conforme con la frecuencia mínima establecida en la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

4 Dado que el caudal medio del vertimiento es constante a lo largo del año, el periodo crítico para el cumplimiento de los ECA-Agua es la época de estiaje. Por lo tanto, el control en el cuerpo receptor será realizado solo en junio, julio y agosto.

5 Dado que la evaluación indicó un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, se establecen varios puntos adicionales aguas abajo del vertimiento para el control de las concentraciones mínimas de oxígeno disuelto.

La toma de muestra del efluente y en el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y en conformidad con la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

11. CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, coliformes termotolerantes y oxígeno disuelto aguas debajo de la zona de mezcla. Por lo tanto, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables: la reducción del caudal del vertimiento mediante el reuso parcial de las aguas residuales tratadas, y la reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos.
- El análisis técnico-económico indicó que un mayor nivel de tratamiento obligaría a la modificación del sistema de tratamiento inicialmente propuesto, lo que resultaría en un incremento significativo de los costos de construcción y operación. Por lo tanto, se descarta esta posibilidad y se prevé el reuso parcial de las aguas residuales tratadas.
- La calidad del efluente cumplirá los LMP, lo que permitirá el riego de cultivos industriales o de cultivos de tallo alto con riego a goteo.
- El caudal máximo de aguas residuales vertidas al río no excederá 409 L/s, lo que permitirá cumplir con los ECA-Agua también en las condiciones más críticas de un caudal del cuerpo natural de agua mínimo.
- El volumen medio de aguas residuales reusado será de 4,0 Hm^3 en el año 2014, incrementándose gradualmente hasta 7,2 Hm^3 en el año 2024, lo que permitirá regar un área de 400 hectáreas en el primero y 720 hectáreas en el segundo, aproximadamente.
- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en dos puntos de control establecidos a 50 m aguas arriba y a 500 m aguas abajo del vertimiento. Adicionalmente, se establecen varios puntos para el control del oxígeno disuelto a una distancia de 2, 4, 6, 8 y 10 km aguas abajo del vertimiento. El control del efluente será realizado con una frecuencia mensual, mientras que el control en el cuerpo natural de agua en la época de estiaje solo en los meses junio, julio y agosto.


3

Vertimiento de aguas residuales municipales urbanas tratadas a una laguna

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- PTAR de una población urbana de 55 000 habitantes. El crecimiento proyectado de la población es 2%.
- En la ciudad servida existen actividades industriales, como mataderos, industria textil de lana e industria alimenticia (panaderías, bebidas alcohólicas y no alcohólicas y productos lácteos).
- La ciudad es un importante destino turístico, y dispone de 7500 camas para turistas. El crecimiento local del sector turismo es 5%.
- En la actualidad, el vertimiento de aguas residuales es realizado sin tratamiento.
- El tratamiento proyectado abarca tratamiento primario con criba media y desarenador, y tratamiento secundario mediante lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración con los siguientes detalles:
  - Una laguna anaeróbica con una superficie de 2 ha y un tiempo de detención total de 3 días.
  - Dos lagunas facultativas con una superficie total de 18 ha y un tiempo de detención total de 15 días.
  - Una laguna de maduración con una superficie de 7 ha y un tiempo de detención total de cinco días.
- El sistema de tratamiento es diseñado para cumplir con los LMP (D.S. Nº 003-2010-MINAM), y el caudal de diseño es determinado para el probable número de habitantes en el año 2024, calculado con una tasa de crecimiento de la población de 3% y de las camas turísticas de 5%.
- Las aguas residuales tratadas serán descargadas a una laguna de Categoría ECA-Agua 4, Conservación del ambiente acuático, ubicada en una altitud de más de 3000 msnm.
- El vertimiento será realizado mediante emisor subacuático para evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

En la tabla 21 se listan los parámetros por evaluarse en función de las características de las aguas residuales municipales y de las actividades industriales presentes en el área servida por el servicio de alcantarillado.

Tabla 21. Lista de parámetros por evaluarse

AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES[1]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE MATADEROS[2]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA INDUSTRIA TEXTIL DE LANA[3]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA[4]	PARÁMETRO REGLAMENTADO CON UN ECA-AGUA?	LISTA DE PARÁMETROS POR EVALUARSE
	A y g	A y g	A y g	Ausencia película visible	A y g (evaluación cualitativa)
C. term.				Si	
DBO_5	DBO_5	DBO_5	DBO_5	Si	DBO_5
	DQO	DQO	DQO	No	
SST	SST	SST	SST	Si	
$P\text{-}PO_4$	P		P	Si	
N_{total}	N_{total}	N_{total}	N_{total}	Si	
$N\text{-}NH_3$				Si	
Metales		Metales (Cr,Zn)		Si	
		Piretroides sintéticos		No	
		Pesticidas		No	
		Tricloroetileno		No	

Leyenda: (A y g) aceites y grasas, (C. term.) coliformes termotolerantes, (DBO_5) demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, (DQO) demanda química de oxígeno, (metales) todos los metales y metaloides determinados con ICP e indicados en la categoría ECA-Agua 4: arsénico, ario, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc, ($N\text{-}NH_3$) amoniaco, (N_{total}) nitrógeno total, (P) fósforo, ($P\text{-}PO_4$) fosfatos como fósforo, (SST) sólidos suspendidos totales.

1 Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2013). Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, acápite I.2, tabla 2.

2 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana de Santiago de Chile (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Industria procesadora de la carne.

3 Fuente: Ministerio del Ambiente de España (2004). Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector textil.

4 Fuente: Comisión Europea (2005). Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en las industrias de alimentación, bebida y leche.

2.2 Determinación de las concentraciones máximas

Para los parámetros considerados en el D.S. N° 003-2010-MINAM, se puede suponer que las concentraciones máximas correspondan a los LMP.

Tabla 22. Concentraciones máximas de los parámetros considerados en el D.S. N° 003-2010-MINAM

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP (D.S. N.º 003-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PROYECTADA
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200	200
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150	150
Aceites y grasas	mg/L	20	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000	10 000

Para determinar las concentraciones máximas de los parámetros no reglamentados con un LMP, se ha caracterizado la calidad de las aguas residuales crudas, que en la actualidad son vertidas al cuerpo receptor, y se ha estimado la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento proyectado con base en valores referenciales indicados en la literatura especializada. Se han tomado muestras singulares con una frecuencia trimestral en el horario de caudal máximo, con el propósito de evaluar la variabilidad mensual de los caudales y de la calidad de las aguas residuales vertidas.

Tabla 23. Concentraciones y caudales máximos de las aguas residuales vertidas y estimación de la concentración máxima en el efluente tratado

		RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	RESULTADOS MUESTREO 4	VALOR MÁXIMO	EFICIENCIA DE REMOCIÓN PTAR	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE TRATADO
Fecha de muestreo		6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013	---	---	---
Hora de muestreo		08:30	08:30	08:30	08:30	---	---	---
Caudal	L/s	168	187	194	179	194	---	---
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	---	---	---
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	---	---	---
OD	mg O_2 /L	2,46	2,02	4,15	3,44	2,02	0%	2,02
Temperatura	°C	17,80	17,42	16,45	18,42	18,42	0%	18,42
Conductividad	μS/cm	1684	1267	1358	1523	1684	0%	1684
pH	---	7,45	7,29	7,70	7,56	7,70	Variable	6,5-8,51
A y g	mg/L	24,34	19,42	13,56	35,21	35,21	43% 2	20[1]
DBO_5	mg/L	459,40	426,58	389,74	301,70	459,40	78% 2	100[1]
DQO	mg/L	793,50	812,49	753,28	647,98	812,49	75% 2	200[1]
SST	mg/L	735	698	726	687	735	80% 2	150[1]
C. term.	NMP/ 100 ml	4,60E+08	2,40E+07	9,80E+06	7,20E+07	4,60E+08	99,9978% [2]	10000 [1]
$P\text{-}PO_4$	mg/L	28,54	26,29	35,85	25,68	35,85	5%	34,1
Ntotal	mg/L	72,9	53,4	74,7	63,6	74,73	20%	59,8
$N\text{-}NH_4$	mg/L	68,23	49,53	61,65	53,99	68,23	15%	58,0
$N\text{-}NH_3$ [3]	mg/L	0,64	0,32	0,93	0,68	0,93	0%	0,93
Arsénico	mg/L	0,0200	0,0169	0,0368	0,0274	0,0368	0%	0,0368
Bario	mg/L	0,2002	0,2492	0,5027	0,2436	0,5027	0%	0,5027
Cadmio	mg/L	0,0005	0,0005	0,0008	0,0003	0,0008	0%	0,0008
Cobre	mg/L	0,0814	0,0670	0,0649	0,0664	0,0814	0%	0,0814
Mercurio	mg/L	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0%	0,0010
Níquel	mg/L	0,0038	0,0035	0,0052	0,0146	0,0146	0%	0,0146
Plomo	mg/L	0,0237	0,0143	0,0192	0,0104	0,0237	0%	0,0237
Zinc	mg/L	0,3426	0,2965	0,3002	0,1510	0,3426	0%	0,3426

1 Concentración máxima en el efluente = Límite Máximo Permisible (D.S. N.º 003-2010-MINAM).

2 Eficiencia de remoción calculada con LMP/Valor máximo.

(1) La fracción de NH_3 no ionizada fue determinada según la siguiente ecuación (Wood, 1993; Emerson et al., 1975):

$$N\text{–}NH_3 = N\text{–}NH_4 \times \left(1 - \frac{1}{1+10^{(ph.0.09018-(2729.92/(273.2+T)))}}\right)$$

2.3 Determinación del caudal medio y máximo de aguas residuales tratadas vertidas

Para la estimación del caudal medio y máximo del vertimiento se aplican los criterios propuestos en la Norma OS.100, Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria, y en la Norma IS.010, Instalaciones sanitarias para edificaciones:

- Dotación de agua: 180 L/hab/d (en clima frío).
- Dotación de agua para los establecimientos de hospedaje: 300 L/huésped/d.
- Variación máxima anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5.
- Caudal de contribución de alcantarillado: 80% del caudal de agua potable consumida.

Con estas variables, el caudal medio anual y máximo horario se calcula con:

$$Q_{vert,medio} = \frac{(180 \times 55\,000 + 300 \times 7\,500) \times 0{,}80}{24 \times 60 \times 60} = 112{,}5 \text{ L/s}$$

$$Q_{vert,max} = 112{,}5 \times (1{,}8 \text{ a } 2{,}5) = 202{,}5 - 281{,}3 \text{ L/s}$$

Para corroborar el caudal medio y máximo estimado, el día 15 de octubre de 2013 se realizó la medición continua del caudal actualmente vertido mediante el uso de un correntómetro acústico. Se seleccionó el mes de octubre, dado que corresponde a la temporada turística alta. (ver gráfico 39)

Tabla 24. Caudales horarios medios y máximos medidos el día 15/10/2013

Caudal medio	L/s	105
Caudal máximo	L/s	213
Relación	---	1 : 2,0

Como demuestra la tabla anterior, los resultados de la medición continua del caudal actualmente vertido confirmaron las estimaciones del caudal medio. Asimismo, se encontró una relación del caudal máximo horario con el caudal medio de 1:2,0.

Para determinar el caudal máximo futuro se debe considerar el crecimiento proyectado de la población y del sector turismo:

Con el número de habitantes de 55 000 en el año 2013, un crecimiento de la población proyectado de 2%, la población en el año 2024 se calcula con:

$$Hab_{2024} = Hab_{2013} \times (1+0{,}02)^{11 \text{ años}} = 68\,386 \text{ habitantes}$$

Con 7500 camas turísticas en el año 2013, un crecimiento del sector turismo proyectado de 5%, las camas turísticas en el año 2024 se calculan con:

$$CT_{2024} = CT_{2013} \text{ x } (1+0{,}05)^{11 \text{ años}} = 12\,828 \text{ camas turísticas}$$

Con esta proyección de la población y de las camas turísticas, el caudal medio anual se calcula con:

$$Qvert = \frac{(180 \text{ x } 68\,386 + 300 \text{ x } 12\,828) \text{ x } 0{,}8}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60} = 150 \text{ L/s}$$

Esto corresponde a un incremento del caudal medio de 33% en diez años.

Para determinar el caudal máximo horario del vertimiento se deberá considerar el gran volumen de las lagunas de estabilización, lo que resultará en la ecualización del caudal. Tomando en cuenta los caudales horarios medidos, el incremento promedio de 33% para el año 2024 y una descarga de la PTAR diseñada para un caudal continuo de 150 L/s, es posible calcular el volumen requerido para la ecualización del caudal.

Gráfico 39. Caudales horarios de aguas residuales medidos el día 15/10/2013

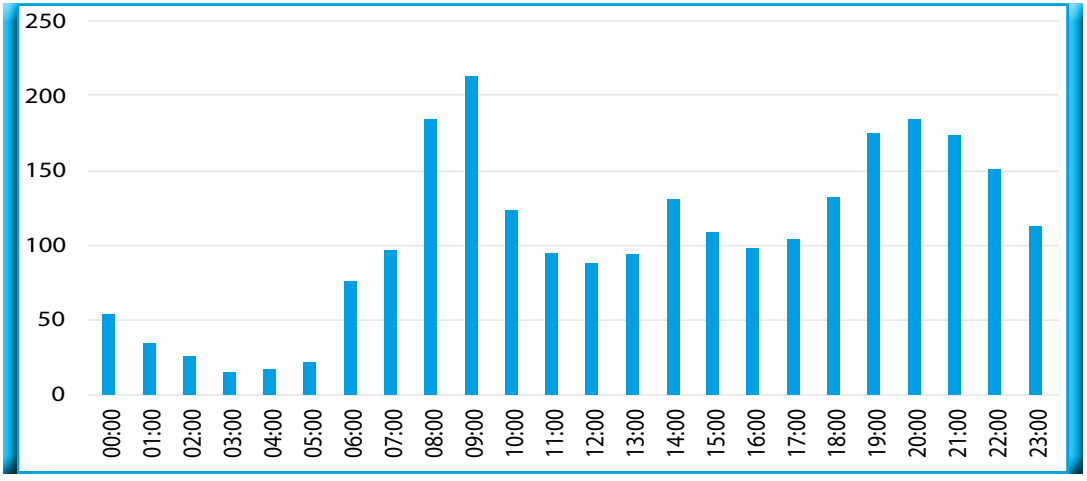
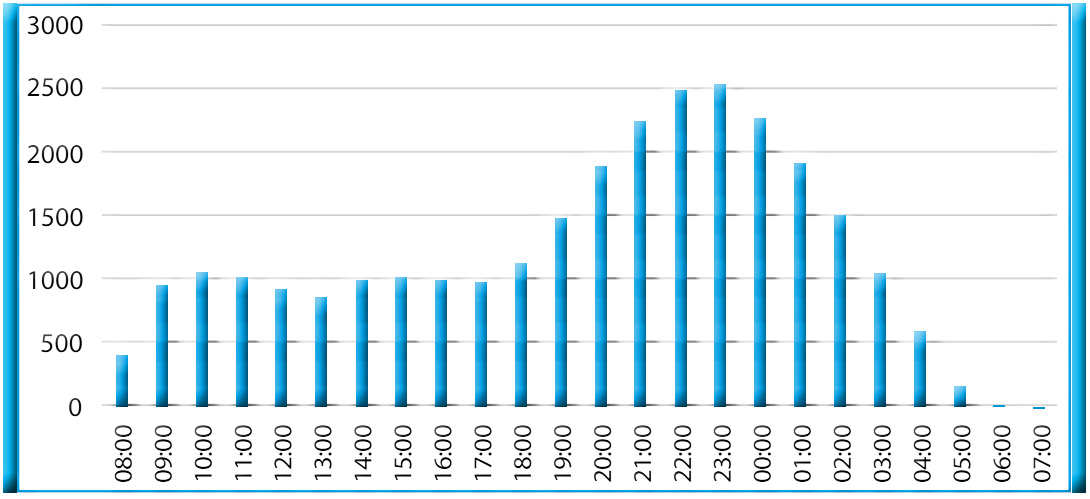


Gráfico 40 Volumen requerido para la ecualización del caudal



El volumen máximo requerido para ecualizar el caudal horario hasta el nivel del caudal medio es de 2531 m^3. Considerando el área total neta de las lagunas de 18 ha, se estima un incremento del nivel del agua máximo de 0,94 cm, lo que demuestra la alta capacidad de ecualización del flujo de las lagunas de estabilización. Por lo tanto, para la evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor se aplica el caudal medio calculado para el año 2024 (150 L/s).

2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento (criba media, desarenador y lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3. CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Seguidamente se presenta un resumen de los resultados del estudio limnológico del cuerpo receptor, que abarca la morfometría, la batimetría, las corrientes, el perfil vertical de la densidad del agua natural en el punto de vertimiento en las diferentes estaciones del año y el índice de intercambio de agua.

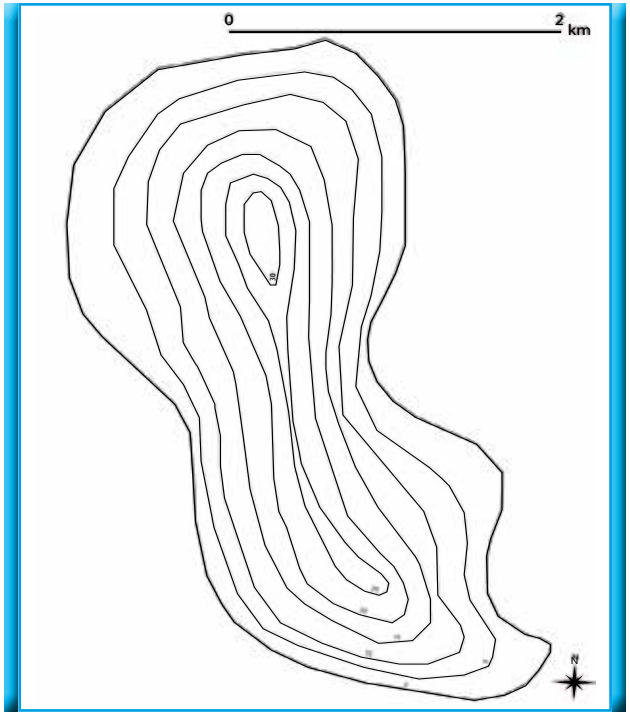
3.1 Morfometría y batimetría

La morfometría de un lago determina, en gran medida, los procesos físicos de la mezcla de un vertimiento de aguas residuales. En este sentido, el estudio morfométrico que se presenta contiene los datos de ingreso de los modelos con los cuales se determina la extensión de la zona de mezcla y el impacto del vertimiento en el cuerpo receptor.

La batimetría de la laguna fue determinada en el mes de agosto, que corresponde a la época de estiaje, y al nivel de agua mínimo. Las medidas de la profundidad se realizaron con una sonda ecográfica tipo XXX, con rango de medición de hasta 200 m de profundidad y GPS integrado. Se realizaron quince transectos transversales y tres transectos longitudinales.

Con base en los datos recopilados, y mediante su georreferenciación en un sistema de información geográfica, se elaboró el mapa batimétrico representado en el gráfico 41.

Gráfico 41. Mapa batimétrico de la laguna XXX



En la tabla 26 se determina el volumen de la laguna según el mapa batimétrico presentado.

Tabla 26. Superficie y volumen acumulado de la laguna XXX

PROFUNDIDAD (M)	SUPERFICIE DEL NIVEL (HA)	ESPESOR DEL NIVEL (M)	VOLUMEN DEL NIVEL (HM^3)	VOLUMEN ACUMULADO (HM^3)
0	764,4	2,5	19,11	19,11
5	559,4	5	27,97	47,08
10	406,9	5	20,345	67,425
15	260	5	13	80,425
20	141,7	5	7,085	87,51
25	48,1	5	2,405	89,915
30	10,2	5	0,51	90,425

En la tabla 27 se indican los valores de los parámetros morfométricos de la laguna según el mapa batimétrico presentado.

Tabla 27. Parámetros morfométricos de la laguna XXX

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Superficie	km^2	7 644
Longitud de la línea de costa	km	12 709
Longitud máxima	km	4 869
Anchura máxima	km	2 344
Profundidad máxima	m	32,4
Volumen	hm^3	90 425
Profundidad media (= volumen / superficie)	m	11,8

3.2 Corrientes

Los vectores de velocidad de las corrientes fueron determinados mediante el empleo de flotadores con vela de arrastre sumergida. Tales medidas se concentraron en la posición estimada del difusor subacuático a una distancia de 100 m y 150 m desde la orilla norte-este de la laguna. Dado que la profundidad del agua en la zona estudiada es de menos de 5 m, se ha medido la velocidad en una profundidad de 2,5 m solamente.

Las mediciones fueron realizadas en cuatro fechas, con una frecuencia trimestral para poder evaluar la variabilidad mensual de las corrientes de flujo. La medición duró tres horas.

Tabla 28. Corrientes de flujo en la laguna XXX

PUNTO DE MEDICIÓN	VELOCIDAD DE FLUJO (CM/S)				DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE			
	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013	6/3/ 2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013
A 100 m de la orilla N-E	1,2	2,1	3,4	2,6	S-N	S-N	S-N	S-N
A 150 m de la orilla N-E	1,4	2,0	3,8	2,9	S-N	S-N	S-N	S-N

La medición de las corrientes demostró que la dirección de flujo es siempre orientada en paralelo a la orilla, principalmente de norte a sur, a excepción de marzo de 2013, cuando se observó una dirección de sur a norte.

3.3 Estratificación térmica y perfil vertical de la densidad del agua

Cuerpos de agua lénticos pueden mostrar una estratificación vertical de la densidad del agua que es causada por un gradiente térmico con mayores temperaturas en la superficie (= menor densidad) y menores temperaturas en el fondo (= mayor densidad).

En los lagos y lagunas altoandinos, localizados entre 2000 y 4000 msnm, tal como la laguna objeto del presente estudio, la dinámica térmica se aparta considerablemente de la que presentan los sistemas en las zonas bajas del trópico, debido a la altitud y a las consecuentes condiciones climáticas imperantes. Investigaciones realizadas en algunos lagos de alta montaña han contribuido al conocimiento del régimen térmico de estos, generalmente clasificados como oligotérmicos con circulaciones frecuentes (es decir, nunca se estratifican), por lo cual han sido llamados polimícticos fríos (Hutchinson & Loefler, 1956; Rodan, 1992).

Sin embargo, para conocer la variabilidad de la densidad con la profundidad de la laguna XXX, se han determinado los perfiles de temperatura en las diferentes estaciones del año. La medición fue realizada con el

equipo multiparamétrico modelo XXX, con un cable de una longitud de 30 m. Como punto de medición se ha seleccionado el centro-norte de la laguna, donde la profundidad del agua es un máximo.

La densidad del agua fue calculada con base en la temperatura determinada con la siguiente ecuación, que es aplicable para temperaturas de entre 0 °C y 40ºC a una presión de 1 atm (Comité International des Poids et Mesures, CIPM).

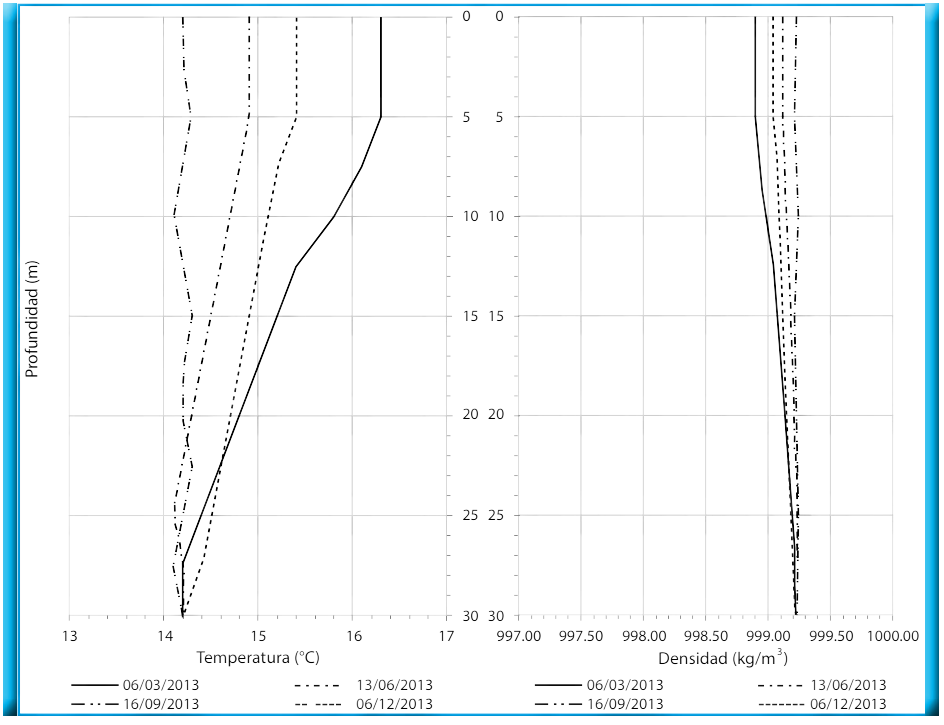
$$\rho\,(t) = 999{,}974950 \times \left(1 - \frac{(T - 3{,}983035)^2 \times (T + 301{,}797)}{522528{,}9 \times (T + 69{,}34881)}\right)$$

Donde:

ρ (t) : densidad del agua en función de la temperatura, en kg/m³.

T : temperatura del agua en ºC.

Gráfico 42. Curvas de la estratificación térmica y de los perfiles de densidad en la laguna XXX



La medición de los perfiles de temperatura demostró que la estratificación térmica, también en los meses de verano, es mínima ($\Delta T < 2$ °C). De igual forma, la estratificación de la densidad es mínima con una diferencia máxima entre superficie y fondo de 0,3 kg/m^3. Por lo tanto, se comprobó que se trata de un cuerpo de agua natural léntico polimíctico.

3.4 Índice de intercambio del agua

El índice de intercambio de agua ($II_{RH,crit}$) corresponde al caudal anual mínimo en la salida de la laguna ($Q_{anual,min}$), determinado con base en el registro histórico de caudales mensuales.

Tabla 29. Caudales mensuales históricos medidos en la estación hidrológica XXXX, ubicada en la salida de la laguna XXX (m^3/s)

CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M³/S)													PROMEDIO ANUAL
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
2009	6,94	12,69	14,41	6,46	6,46	6,17	5,58	5,75	6,34	6,60	6,61	6,60	7,55
2010	6,07	6,55	7,70	7,96	7,66	7,21	7,17	7,83	7,90	8,45	8,52	8,62	7,64
2011	8,52	24,24	24,15	19,59	9,56	9,30	9,36	9,33	9,13	9,97	9,82	10,13	12,76
2012	29,61	28,78	28,04	24,08	10,24	10,09	10,43	10,91	9,41	7,81	7,35	8,19	15,41
2013	10,93	18,39	22,18	14,08	8,43	7,83	7,84	8,00	8,10	8,24	8,37	8,52	10,91
												Caudal anual mínimo	7,55

$$II_{RH,crit} = Q_{anual,min} = 7{,}55 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.5 Calidad del agua en el cuerpo natural

Para determinar la calidad del cuerpo receptor del vertimiento, se tomaron muestras de agua y se analizaron sus características químico-físicas en un laboratorio cuyos parámetros están acreditados ante INACAL.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua natural léntico, se realizaron cuatro tomas de muestra con una frecuencia trimestral en la ubicación del vertimiento proyectado. La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor fue efectuada en las mismas fechas en las cuales se determinaron las corrientes y la estratificación térmica en el marco del estudio limnológico.

Tabla 30. Concentraciones en el cuerpo natural de agua

		RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	RESULTADOS MUESTREO 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA	ECA-AGUA CATEGORÍA 4: CONSERVACIÓN DEL AMBIENTE ACUÁTICO - LAGUNAS Y LAGOS
Fecha de muestreo		6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013		
Hora de muestreo		09:30	10:30	09:00	09:30		
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC		
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Coordenada norte (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
Coordenada este (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX		
OD	mg O_2 /L	6,86	6,78	6,98	6,68	6,68	5,0
Temperatura	°C	16,32	14,95	14,23	15,47	16,32	---
Conductividad	μS/cm	532	551	550	542	551	---
pH	---	7,91	7,69	7,78	7,96	7,96	6,5-8,5
A y g	mg/L	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	0	Ausencia película
DBO_5	mg/L	<2	<2	<2	<2	0	5
C. term.	NMP/100ml	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	0	1000
$P\text{-}PO_4$	mg/L	0,049	0,053	<0,030	<0,030	0,053	0,40
Ntotal	mg/L	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	0	1,6
$N\text{-}NH_4$	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	---
$N\text{-}NH_3$ *	mg/L	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,02
Arsénico	mg/L	0,0071	0,0065	0,0066	0,0079	0,0079	0,01
Bario	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0	0,7
Cadmio	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0	0,004
Cobre	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0	0,02
Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0	0,0001
Níquel	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0	0,025
Plomo	mg/L	0,0004	0,0001	<0,0004	<0,0004	0,0004	0,001
Zinc	mg/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0	0,03

Las muestras fueron tomadas en una distancia de aproximadamente 200 m al sur de la desembocadura del principal tributario de la laguna, a una distancia de aproximadamente 1 km de la descarga actual, lo que permite excluir la influencia del vertimiento en curso sobre la calidad del agua en el punto de control. Dado que la laguna XXX es un cuerpo de agua polimíctico –es decir, sin estratificación térmica significativa–, se tomaron las muestras solo en la superficie.

Se analizaron los parámetros que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, que son aquellos definidos en el acápite VI.3.2.1.

* La fracción de NH_3 no ionizada es determinada según la siguiente ecuación (Wood, 1993; Emerson et al., 1975):

$$N\text{-}NH_3\text{-} = N\text{-}NH_4 \text{ x}\left(1\text{-} \frac{1}{1 + 10^{(pH - 0.09018 - (2729.92/(273.2 + T)))}} \right)$$

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que ninguno de los parámetros evaluados excede los ECA-Agua de la categoría 4.

3.6 Usos del agua en el cuerpo receptor

En la proximidad del punto de descarga proyectado no existen usos del agua, como tomas de agua para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario o áreas de acuicultura.

4 EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL A LARGO PLAZO

Para la evaluación del impacto ambiental del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural léntico a largo plazo, a continuación se calcula el balance de masas de todos los parámetros potencialmente contenidos en las aguas residuales tratadas.

$$C_o = \frac{(C_{RH} \text{ x } II_{RH,crit}) + (C_{vert} \text{ x } Q_{vert})}{(II_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Donde:

C_o : concentración en el cuerpo receptor en el largo plazo.

C_{RH} : concentración máxima en el cuerpo receptor, indicada en el acápite VI.3.3.5.

C_{vert} : Concentración máxima proyectada en las aguas residuales tratadas, indicada en el acápite VI.3.2.2.

$II_{RH,crit}$: índice de intercambio de agua crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicado en el acápite VI.3.3.4.

Q_{vert} : caudal medio anual del vertimiento en el año 2024, indicado en el acápite VI.3.2.3.

Para la evaluación de todos los parámetros contenidos potencialmente en el efluente, se elaboró la tabla 31, que contiene la lista completa de los parámetros

característicos de las aguas residuales tratadas, la concentración calculada para cada parámetro en el cuerpo receptor en el largo plazo y el ECA-Agua correspondiente.

Tabla 31. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el largo plazo

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$II_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
A y g	150 L/s	20 mg/L	7550 L/s	0,00 mg/L	0,39 mg/L	Ausencia película	No hay ECA-Agua
DBO_5	150 L/s	100 mg/L	7550 L/s	0 mg/L	2 mg/L	5	Cumple ECA-Agua
DQO	150 L/s	200 mg/L	7550 L/s	0 mg/L O_2	4 mg/L O_2	---	No hay ECA-Agua
SST	150 L/s	150 mg/L	7550 L/s	0 mg/L O_2	3 mg/L O_2	25	Cumple ECA-Agua
C. term.	150 L/s	10 000 NMP/ 100mL	7550 L/s	0 NMP/ 100mL	195 NMP/ 100mL	1000	Cumple ECA-Agua
P-PO_4	150 L/s	34,06 mg/L	7550 L/s	0,05 mg/L	**0,72 mg/L**	0,4	**Excede ECA-Agua**
Ntotal	150 L/s	59,78 mg/L	7550 L/s	0,00 mg/L	1,16 mg/L	1,6	Cumple ECA-Agua
N-NH_4	150 L/s	58,00 mg/L	7550 L/s	0,00 mg/L	1,13 mg/L	---	No hay ECA-Agua
N-NH_3	150 L/s	0,93 mg/L	7550 L/s	0,00 mg/L	0,02 mg/L	0,02	Cumple ECA-Agua
Arsénico	150 L/s	0,0368 mg/L	7550 L/s	0,0079 mg/L	0,0084 mg/L	0,01	Cumple ECA-Agua
Bario	150 L/s	0,5027 mg/L	7550 L/s	0,0000 mg/L	0,0098 mg/L	0,7	Cumple ECA-Agua
Cadmio	150 L/s	0,0008 mg/L	7550 L/s	0,0000 mg/L	0,0000 mg/L	0,004	Cumple ECA-Agua
Cobre	150 L/s	0,081 mg/L	7550 L/s	0,000 mg/L	0,002 mg/L	0,02	Cumple ECA-Agua
Mercurio	150 L/s	0,0010 mg/L	7550 L/s	0,0000 mg/L	0,0000 mg/L	0,0001	Cumple ECA-Agua
Níquel	150 L/s	0,0146 mg/L	7550 L/s	0,0000 mg/L	0,0003 mg/L	0,025	Cumple ECA-Agua
Plomo	150 L/s	0,0237 mg/L	7550 L/s	0,0004 mg/L	0,0008 mg/L	0,001	Cumple ECA-Agua

Como evidencia la tabla anterior, la mayoría de los parámetros cumplirá el ECA-Agua en el largo plazo; sin embargo, la concentración de fosfatos (P-PO_4) excede el ECA-Agua. Para poder cumplir con el ECA-Agua, la carga de fosfatos debe ser reducida hasta el nivel de la carga admisible disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones del parámetro crítico, o ambos.

El caudal máximo admisible, manteniendo las concentraciones invariadas, se calcula con:

$$Q_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{(C_{vert} - C_{ECA})} = \frac{7550 \times (0,4 - 0,05)}{(34,06 - 0,4)} = 78 \text{ L/s}$$

En el caso de que no sea posible reducir el caudal del vertimiento, será necesario aminorar las concentraciones del agua residual. La concentración máxima de fosfatos que permite el cumplimiento de los ECA-Agua en el cuerpo receptor se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{vert} \leq \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA} = \frac{7550 \times (0,4 - 0,05)}{150} = +0,4 = 18 \text{ mg/l}$$

4.1 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de los fosfatos en el largo plazo. Por lo tanto, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables, que se describen a continuación.

Reducción del caudal de vertimiento mediante el reuso parcial de las aguas residuales tratadas

La evaluación realizada indicó que un caudal de vertimiento no mayor de 78 L/s permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua. Esto significa que en el año 2014 un promedio de 35 L/s de aguas residuales deberán ser reusadas, lo que se incrementará hasta 72 L/s en el 2024.

La calidad del agua residual tratada al nivel de los LMP permite un reuso en el riego de cultivos industriales (agricultura altamente mecánica) o en el riego de cultivos de tallo alto con sistemas de goteo.[52] Por lo tanto, esta alternativa no generaría mayores costos de tratamiento de las aguas residuales; al contrario, podría mejorar la viabilidad económica del proyecto, dado que la EPS podría cobrar a los agricultores el servicio de tratamiento de aguas residuales con fines de reuso.[53] El volumen anual por reusarse en el año 2024 son 2,3 hm^3, y el módulo de riego en la zona de proyecto tiene un promedio de 4000 m^3/año/ha, lo que resulta en un área agrícola bajo riego de 568 ha. Asimismo, el riego es realizado en la época seca solamente (junio-noviembre), lo que obligaría a la construcción de un reservorio de almacenamiento de las aguas residuales tratadas de aproximadamente 1,1 Hm^3.

Sin embargo, una encuesta realizada entre los agricultores locales reveló que no existe interés en el uso de las aguas residuales tratadas y en la inversión en la infraestructura de almacenamiento y de riego tecnificado, dado que ellos disponen de fuentes naturales de agua que permiten el riego a gravedad y a bajo costo. Asimismo, el clima altoandino de la región no es propicio para los cultivos industriales o de tallo alto, y la agricultura es realizada de forma manual. En estas condiciones, el uso de aguas residuales tratadas constituye un riesgo para la salud de los agricultores y los consumidores de los productos

52 Guías OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises, 3.ª edición, volúmenes 1-4, 2006.
53 Ley N° 30045, Ley de Modernización de los Servicios de Saneamiento y su reglamento (D.S. N° 015-2013-VIVIENDA).

agrícolas. Por lo tanto, la alternativa de reuso parcial de las aguas residuales tratadas debe ser descartada.

Reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos

La evaluación realizada indicó que el vertimiento con un caudal máximo de 150 L/s en el año 2024 no debería superar una concentración máxima de fosfatos de 18 mg/l, lo que corresponde a una eficiencia de tratamiento de 47%.

Para lograr esta eficiencia, el sistema de tratamiento de aguas residuales debería ser modificado. La lagunas de estabilización por lo general logran concentraciones de fósforo total en el efluente entre 4 mg/L y 25 mg/L;[54] sin embargo, no es posible determinar a priori la eficiencia de remoción. Por lo tanto, se debería prever la dosificación de sales de hierro o de aluminio a las aguas residuales antes de la laguna anaeróbica. Estas sales reaccionan con el fósforo y forman complejos de baja solubilidad que se sedimentarán. Mediante esta tecnología de tratamiento terciario, se puede lograr concentraciones de fósforo en el efluente de hasta 3 mg/L. Además, la dosificación de sales de hierro mejora la sedimentabilidad del material en suspensión, mejorando la eficiencia de la laguna. La dosificación podrá optimizarse en función de las concentraciones de fosfatos en el efluente, determinadas con base en el monitoreo regular, siendo también posible que la PTAR logre la concentración máxima admisible de los fosfatos, sin la dosificación continua de estos compuestos.

Las modificaciones del sistema de tratamiento inicialmente propuesto corresponden a un incremento del costo de operación. No obstante, es la única alternativa viable que permitirá cumplir con los ECA-Agua de fosfatos en el largo plazo.

5 EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL ECA-AGUA EN EL LÍMITE DE LA ZONA DE MEZCLA

La evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas en un cuerpo de agua léntico debe comprobar que el diseño del emisor subacuático proporcione una dilución inicial mínima –S_a– que es mayor que la dilución requerida –S_{max}–:

$$S_a > S_{max}$$

Si esta inecuación expresa un resultado verdadero, las concentraciones de los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas en el límite de la zona de mezcla serán inferiores a los ECA-Agua.

54 ANESAPA (2010). Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. www.proapac.org / publicaciones

5.1 Evaluación de la dilución requerida

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (Smax) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(S_i , S_{(i+1)} , S_{(i+2)} , S_{(i+n)}) \quad y$$

$$S_i = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C^{RH,i})}$$

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$:dilución necesaria para respetar los ECA del parámetro i o i+n, respectivamente.

i, i+n : parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, indicados en el acápite VI.3.2.1.

$C_{vert,i}$: concentración del parámetro i en el efluente, indicado en el acápite VI.3.2.2.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: concentración del parámetro i en el cuerpo de agua natural, indicado en el acápite VI.3.3.5.

S_{max} : dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla, definida como el valor máximo de los factores de dilución calculados para los diferentes parámetros relevantes para el tipo de efluente.

En la tabla 32 se calcula la dilución requerida para cada uno de los parámetros característicos del vertimiento.

Tabla 32. Dilución requerida para el cumplimiento del ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA-AGUA CAT. 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
DBO_5	mg/L	100	5	0	19
SST	mg/L	150	25	0	5
C. term.	NMP/ 100 ml	10000	1000	0	9
$P\text{-}PO_4$	mg/L	18	0,40	0,053	50
N_{total}	mg/L	59,8	1,6	0	36
$N\text{-}NH_3$	mg/L	0,93	0,02	0	45
Arsénico	mg/L	0,04	0,01	0,0079	13
Bario	mg/L	0,5	0,7	0,0	0
Cadmio	mg/L	0,000	0,004	0,0000	0
Cobre	mg/L	0,08	0,02	0,00	4

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA-AGUA CAT. 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
Mercurio	mg/L	0,0000	0,0001	0,0000	9
Níquel	mg/L	0,010	0,025	0,000	0
Plomo	mg/L	0,020	0,001	0,0004	35
Zinc	mg/L	0,34	0,03	0,00	11
				S_{max}	**50**

De la tabla anterior se puede concluir que el parámetro más crítico en lo que concierne a la dilución requerida son los fosfatos (1:50), seguidos por el amoniaco (1:45), el nitrógeno total (1:36) y el plomo (1:35).

5.2 La evaluación de la dilución inicial mínima – S_a

La dilución inicial mínima (S_a), proporcionada por la profundidad y longitud del difusor subacuático, fue evaluada mediante el uso del modelo de simulación numérico XXX, auspiciado por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la US-EPA.

La evaluación es realizada considerando las condiciones más críticas, lo que permitirá diseñar un dispositivo de descarga que garantice el cumplimiento de los ECA-Agua en todo momento:

- Gradiente máximo de la temperatura del cuerpo receptor, indicado en el numeral VI.3.3.3.
- Corriente horizontal mínima (1,20 cm/s) con dirección de flujo del sur al norte (ángulo horizontal de 90°).
- Caudal máximo de vertimiento de 150 L/s.
- Densidad del agua residual igual a la densidad del agua natural.

En un primer paso se evaluó la factibilidad de un emisor subacuático con un orificio único, considerando su menor costo en comparación con un difusor de orificios múltiples. Con la finalidad de lograr la dilución requerida (S_{max}), se ha realizado un gran número de corridas del modelo, variando iterativamente la longitud del emisor y la orientación del orificio de descarga. Sin embargo, no era posible diseñar un emisor que permitiera lograr la dilución requerida.

Por consiguiente, se evaluó un emisor con un difusor de orificios múltiples. Para determinar su diseño se han llevado a cabo diferentes corridas del modelo, variando iterativamente las variables de diseño del difusor subacuático (ángulo vertical de descarga, longitud del emisor y difusor).

El modelo numérico demostró que un emisor subacuático con las siguientes características brinda una dilución inicial de 56, que es mayor que la dilución requerida de 50 para el cumplimiento del ECA-Agua.

- Diámetro interno del emisor: 375 mm (permite mantener una velocidad de flujo entre 1 y 2 m/s).
- Profundidad media de descarga: 3,7 m (determinada con base en el mapa batimétrico).
- Diámetro del orificio singular: 7,5 cm (seleccionado para evitar su obstrucción y facilitar su limpieza).
- Número de orificios: 22 (calculado con la condición de que el área total de los orificios sea aproximadamente 90% del área de la tubería, para evitar que algunos orificios no descarguen a su capacidad máxima: con un área de la tubería de 1104,5 cm^2, el área total de los orificios no debería superar los 994,0 cm^2; considerando el diámetro del orificio singular de 7,5 cm, el número total de orificios se calcula en 22).
- Distancia entre los orificios: 1,5 m (calculada iterativamente: inicialmente se seleccionó una distancia grande igual a la profundidad de descarga, que posteriormente fue reducida hasta obtener la dilución requerida).
- Longitud del difusor: 32 m (calculada del número de orificios [n] y la distancia entre ellos [b]: L= [n - 1]xb).
- Longitud del emisor: 132 m (100 m de tubería más 32 m de difusor).
- La altura de descarga sobre el fondo se seleccionó con 0,4 m, dado que no existen riesgos de que los orificios sean cubiertos con sedimentos, tal como puede ocurrir en el mar o en proximidad de la desembocadura de ríos.
- Ángulo vertical de descarga: 5° (determinado de forma iterativa hasta obtener la máxima dilución inicial).
- La orientación del eje central de los orificios –es decir, el ángulo de orientación horizontal– fue seleccionada igual que la dirección predominante de las corrientes de norte a sur (ángulo de orientación horizontal de 270°).
- Asimismo, para lograr una dilución inicial máxima reduciendo la extensión de la zona de mezcla a un mínimo, el eje del difusor será colocado en perpendicular a la dirección de corriente predominante, que es paralela a la línea de orilla.

6 DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN MÁXIMA DE LA ZONA DE MEZCLA

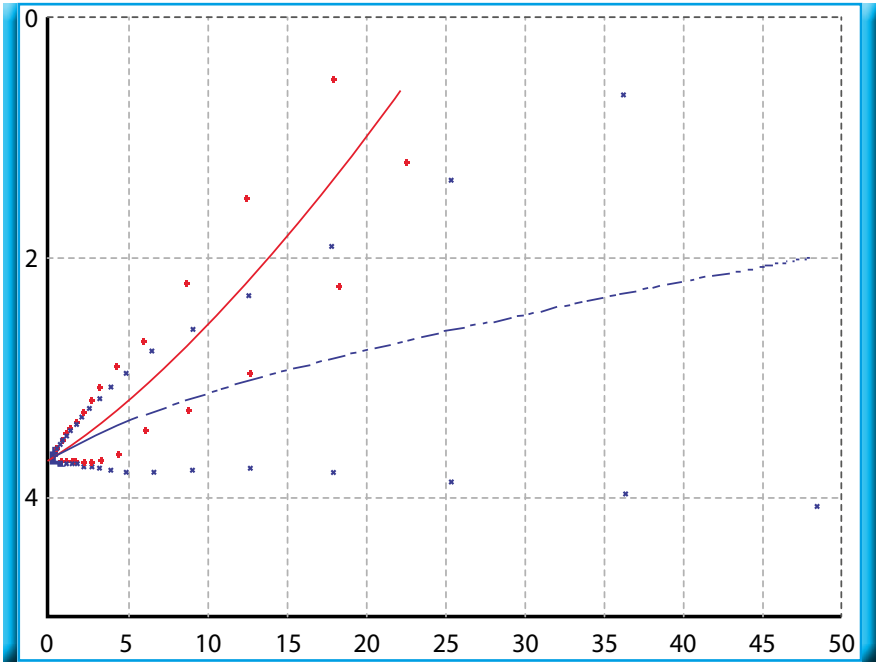
La extensión máxima de la zona de mezcla fue calculada mediante el modelo de simulación de la zona de mezcla, aplicando el diseño del emisor subacuático indicado en el acápite antecedente, y las corrientes horizontales en el cuerpo natural máximas en las diferentes direcciones.

Tabla 33. Corrientes horizontales máximas

VELOCIDAD DE FLUJO (CM/S)	DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE
3,8	N-S
1,4	S-N

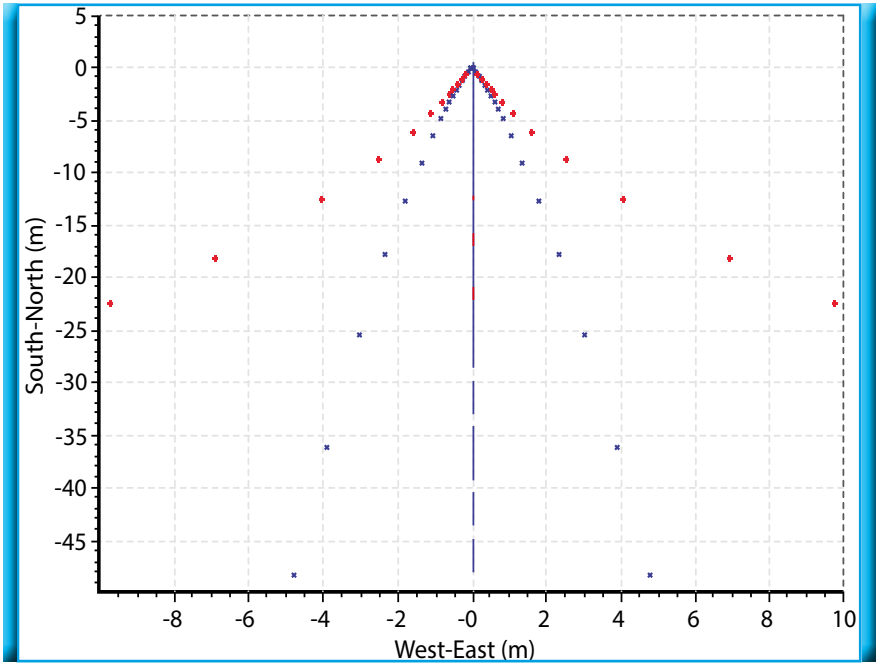
En los siguientes gráficos se representan los resultados de la simulación en las condiciones de corriente máxima.

Gráfico 43. Eje central y límites de la pluma de aguas residuales (profundidad vs. distancia en m) con corriente en dirección N-S (línea azul) y S-N (línea roja)



La simulación en las condiciones de corriente máxima demuestra que las aguas residuales descargadas en un ángulo horizontal se mezclan con el agua natural formando una pluma que cubre casi todo el perfil vertical del cuerpo de agua. En una distancia de 20 m y 50 m respectivamente, la pluma toca la superficie del cuerpo de agua, punto que corresponde a la extensión máxima de la zona de mezcla.

Gráfico 44. Vista plana de la pluma de aguas residuales



La vista plana demuestra que la pluma se expande lateralmente, mientras que el agua residual se mueve en dirección sur. En la distancia de la extensión máxima de la zona de mezcla la pluma alcanza un ancho de 10 m aproximadamente. En condiciones de corriente de sur a norte, la expansión de la pluma es más fuerte, llegando a un ancho de 20 m. Por lo tanto, la zona de mezcla se extiende por una superficie de 52 m (32 m de difusor + 20 m ancho de la pluma) de largo y 50 m de ancho al sur del emisor.

Hasta una distancia de 50 m desde el límite de la zona no existen usos del agua, como tomas de agua para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario o áreas de acuicultura. Asimismo, la zona de mezcla no se acercará más que 50 m a la orilla, lo que garantiza evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla. De tal modo, no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla.

7 PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 34. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL[2]	COORDENADAS - UTM (WGS84)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida de la PTAR antes de la descarga	Caudal, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, aceites y grasas (MEH), coliformes termotolerantes (44,5 °C), DBO_5, DQO, sólidos suspendidos totales, fosfatos, nitrógeno total, amoniaco, metales1	Trimestral	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 35. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua.

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PROFUNDIDAD	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL[3]	COORDENADAS - UTM (WGS84)		
	NOMBRE	CAT. ECA					ZONA	NORTE	ESTE
LAGO-1a	Laguna XXXXX	4	50 m a sur del difusor subacuático	Superficie	pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, aceites y grasas 1, coliformes termotolerantes (44,5 °C), DBO_5, sólidos suspendidos totales, fosfatos, nitrógeno total, amoniaco, metales 2	Trimestral	XX	XXXXX	XXXX
LAGO-2a	Laguna XXXXX	4	10 m a este del difusor subacuático	Superficie		Trimestral	XX	XXXXX	XXXX
LAGO-3a	Laguna XXXXX	4	10 m a oeste del difusor subacuático Superficie	Superficie		Trimestral	XX	XXXXX	XXXX
LAGO-4a	Laguna XXXXX	4	10 m a norte del difusor subacuático Superficie	Superficie		Trimestral	XX	XXXXX	XXXX

1 Control visual de la ausencia de película visible solamente, sin análisis de laboratorio.

2 Los metales considerados en la categoría ECA-Agua 4-Lagunas y Lagos determinados con ICP son: arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc.

3 La frecuencia de control ha sido establecida en función del volumen anual de aguas residuales vertidas: Vanual = caudal promedio en el año 2024 x 365 días = 150 L/s x 3600s x 24h x 365 días / 1000L = 4,73 M m^3. Valor que está en el rango 3-9 M m^3 y resulta en una frecuencia trimestral, lo que está conforme con la frecuencia mínima establecida en la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

La toma de muestra del efluente y en el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y en conformidad con la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

8. CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de fosfatos en el largo plazo.

- Consecuentemente, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables: la reducción del caudal de vertimiento mediante el reuso parcial de las aguas residuales tratadas, y la reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento del parámetro crítico. Dado que un reuso de las aguas residuales bajo las condiciones ambientales y socioeconómicas de la zona no es viable, se tiene que optar por la alternativa de un mayor nivel de tratamiento.

- Consecuentemente, se deberá reducir la concentración del parámetro crítico a través de la mejora del sistema de tratamiento. La evaluación realizada indicó que el vertimiento con un caudal máximo de 150 L/s no debería superar una concentración máxima de fosfatos de 18 mg/L, correspondiente a una eficiencia de tratamiento requerida de 47%. En el sistema de tratamiento de aguas residuales se incluirá la remoción de fosfatos a través de la dosificación de sales de hierro o de aluminio a las aguas residuales, antes de la laguna anaeróbica. Estas sales reaccionan con el fósforo y forman complejos de baja solubilidad que se sedimentan. Mediante esta tecnología se puede lograr concentraciones de fósforo en el efluente de hasta 3 mg/L. La dosificación de sales de hierro o de aluminio será optimizada en función de las concentraciones de fosfatos en el efluente, determinadas con base en el monitoreo regular, siendo también posible que la PTAR logre las concentraciones admisibles, sin la dosificación continua de estos compuestos.

- La descarga será realizada a través de un emisor subacuático de una longitud de 132 m, con un difusor de 22 orificios y una longitud de 32 m. Los orificios descargan en un ángulo de 5° sobre el plano horizontal, y están orientados hacia el sur. Este

emisor brinda una dilución inicial mínima de 54, lo que permite cumplir con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla.

- La zona de mezcla tiene una extensión máxima de 50 m al sur del emisor y 52 m en dirección este-oeste, y no se acerca más que 50 m a la orilla o a otros usos del agua, por lo que no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla.
- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en cuatro puntos de control establecidos a 50 m al sur del difusor, 10 m al norte, al este y al oeste. Las muestras serán tomadas en la superficie solamente, ya que el modelo comprobó que la pluma de aguas residuales alcanza la superficie antes del límite de la zona de mezcla. El control del efluente y en el cuerpo receptor será realizado con una frecuencia trimestral.


4

Vertimiento de aguas residuales municipales al mar

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- Planta de tratamiento de las aguas residuales de una ciudad costera de 526 840 habitantes.
- En la ciudad servida existen actividades industriales como el procesamiento de productos hidrobiológicos para consumo humano directo, procesamiento y empaque de frutas y verduras y la fabricación de azúcar y de productos lácteos.
- Para efectos de la evaluación, el vertimiento de aguas residuales se encontraba inscrito en el Programa de Adecuación de Vertimientos y Reúso de Agua Residual (PAVER) y se realizaba a orilla de playa.
- Las aguas residuales tratadas serán descargadas mediante emisor submarino a un cuerpo de agua marino costero de Categoría ECA-Agua 4, Conservación del Ambiente Acuático, Ecosistemas Marino-Costeros, Columna Marinos.
- Dado que el vertimiento será realizado mediante emisor submarino, se sugiere a futuro el cumplimiento de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua),[55] de modo que no aplican los Límites Máximos Permisibles.
- El tratamiento de las aguas residuales abarca el tratamiento previo definido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en la Norma OS.090, Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales,[56] que consiste en el tratamiento preliminar avanzado con criba gruesa y fina, desarenador y separador de aceites y grasas aireado y militamizaje con abertura de 0,5 mm.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

En la tabla 36 se establecen los parámetros por evaluarse en función de las características de las aguas residuales municipales y de las actividades industriales presentes en el área servida por el servicio de alcantarillado.

55 Véase la sexta disposición complementaria final del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos aprobado con D.S. N.° 001-2010-AG.
56 Aprobada con D.S. N.° 011-2006-VIVIENDA, Reglamento Nacional de Edificaciones, y modificada con D.S. N.° 022-2009-VIVIENDA.

Tabla 36. Lista de parámetros por evaluarse

AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES[1]	AGUAS RESIDUALES AGRO INDUSTRIALES[1]	AGUAS RESIDUALES DE PROCESAMIENTO DE PESCADO Y MARISCOS[1]	AGUAS RESIDUALES DE LA PRODUCCIÓN DE AZUCAR[2]	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES GENERADAS EN LA PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS[3]	PARÁMETROS POR EVALUARSE
A y g	A y g	A y g		A y g	A y g
C. term.	C. term.				C. term.
DBO_5	DBO_5	DBO_5	DBO_5	DBO_5	DBO_5
			DQO	DQO	--- (No ECA)
SST	SST	SST	SST	SST	SST
$N\text{-}NH_3$	$N\text{-}NH_3$		N	N	$N\text{-}NH_3$
Metales					Metales

Leyenda: (A y g) aceites y grasas, (c. term.) coliformes termotolerantes, (DBO_5) demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, (DQO) demanda química de oxígeno, (Metales) todos los metales y metaloides determinados con ICP e indicados en la categoría ECA-Agua 4: arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc, ($N\text{-}NH_3$) nitrógeno en amoniaco, (N) nitrógeno, (SST) sólidos suspendidos totales.

1 Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2014). Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, capítulo I.2, tabla 2: Aguas residuales municipales urbanas vertidas a un cuerpo de agua marino-costero.

2 Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (2005). Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector azucarero.

3 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana de Santiago de Chile (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Fabricación de productos lácteos.

2.2 Determinación de las concentraciones máximas

Para determinar las concentraciones máximas se ha caracterizado la calidad de las aguas residuales crudas, que en la actualidad son vertidas al cuerpo receptor, y se ha estimado la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento proyectado con base en valores referenciales indicados en la literatura especializada. Con tal propósito, se han tomado muestras singulares en tres fechas diferentes y en distintos horarios.

Tabla 37. Concentraciones máximas en las aguas residuales crudas y tratadas

		Resultados muestreo 1	Resultados muestreo 2	Resultados muestreo 3	Valor máximo	Eficiencia de remoción de TAR	Concentración máxima en el efluente tratado
Fecha de muestreo		6/5/2013	9/5/2013	13/5/2013	---	---	---
Hora de muestreo		10:00	08:00	14:30	---	---	---
Caudal	L/s	1679	1785	1289	1785	---	---
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	---	---	---
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	---	---	---
Temperatura	°C	24,6	25,1	24,9	25,1	0%	25,1
Conductividad	μS/cm	1684	1453	2248	2248	0%	2248
pH	---	7,45	8,28	7,69	8,28	0%	8,28
A y g	mg/L	41	75	67	75	30%	53
DBO_5	mg/L	426	517	369	517	15%	439
SST	mg/L	187	235	169	235	20%	188
C. term.	NMP/ 100 ml	2,30E+10	8,60E+08	1,20E+09	2,30E+10	0%	2,30E+10
$N\text{-}NH_4$	mg/L	63,8	46,5	54,2	63,8	0%	63,8
$N\text{-}NH_3$	mg/L	0,98	4,58	1,46	4,58	0%	4,58
Arsénico	mg/L	0,0200	0,0526	0,0243	0,0526	0%	0,0526
Cadmio	mg/L	0,0005	0,0026	0,0006	0,0026	0%	0,0026
Cobre	mg/L	0,0814	0,0843	0,0846	0,0846	0%	0,0846
Mercurio	mg/L	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0%	0,0010
Níquel	mg/L	0,0038	0,0056	0,0119	0,0119	0%	0,0119
Plomo	mg/L	0,0237	0,0480	0,1953	0,1953	0%	0,1953
Zinc	mg/L	0,343	0,320	0,198	0,343	0%	0,343

* La fracción de NH_3 no ionizada es determinada según la siguiente ecuación (Wood, 1993; Emerson et al., 1975):

$$N\text{–}NH_3\text{–} = N\text{–}NH_4 \text{ x } \left(1 - \frac{1}{1 + 10^{(pH - 0.09018 - (2729.92/(273.2 + T)))}}\right)$$

2.3 Determinación del caudal máximo de las aguas residuales tratadas vertidas

Para la estimación del caudal máximo del vertimiento se aplican los criterios propuestos en la Norma OS.100, Consideraciones Básicas de Diseño de Infraestructura Sanitaria:

- Dotación de agua: 220 L/hab/d
- Variación máxima anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5
- Caudal de contribución al alcantarillado: 80% del caudal de agua potable consumida.

Con estas variables, el caudal medio y máximo horario se calcula con:

$$Q_{vert,medio} = \frac{220 \text{ x } 526\,840 \text{ x } 0{,}80}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60} = 1073 \text{ L/s}$$

$$Q_{vert,max} = Q_{vert,medio} \text{ x } 1{,}8 = 1932 \text{ L/s}$$

Para corroborar el caudal medio y máximo horario estimado, el día 25 de julio de 2013 se realizó la medición continua del caudal actualmente vertido mediante el uso de un correntómetro acústico.

Gráfico 45. Caudales horarios de aguas residuales del día 25/7/2013

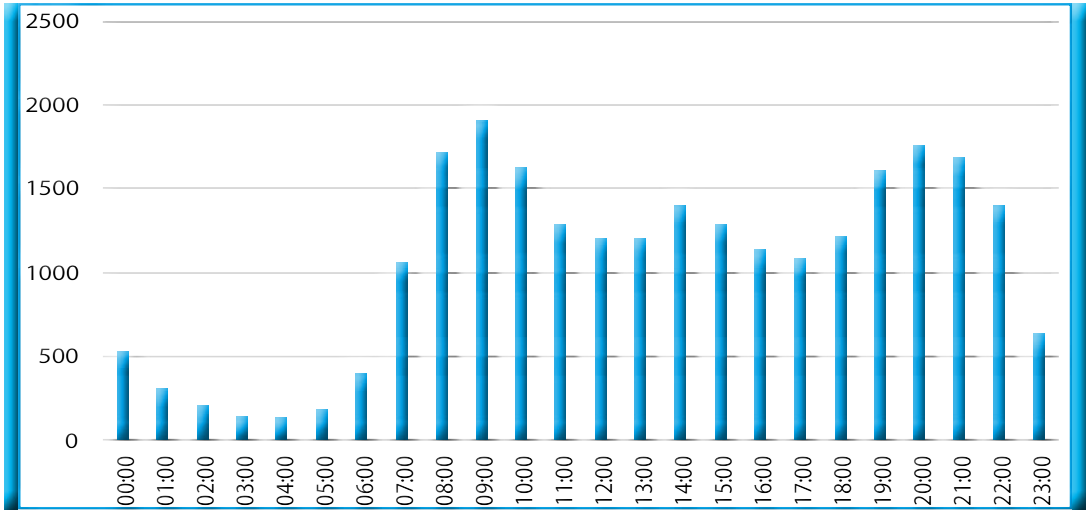


Tabla 38. Caudal horario medio y máximo del día 25/7/2013

Caudal medio	L/s	1066
Caudal máximo	L/s	918
Relación	---	1 : 1,8

Como demuestra la tabla anterior, los resultados de la medición continua del caudal actualmente vertido confirmaron las estimaciones del caudal medio y máximo horario.

Para determinar el caudal máximo futuro se debe considerar el crecimiento proyectado de la población. Con el número de habitantes de 526 840 en el año 2013 y un crecimiento de la población proyectado de 3%, la población futura se calcula con:

$$Hab_{añoX} = Hab_{2013} \text{ x } (1+0{,}03)_{años}$$

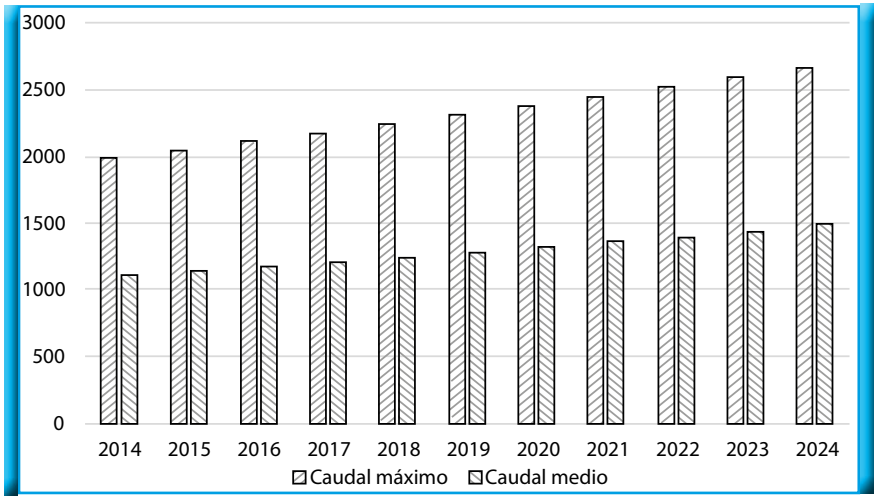
Con esta proyección de la población, el caudal medio y máximo horario se calcula con:

$$Q_{vert,med} = \frac{220 \text{ x } Hab_{añoX} \text{ x } 0{,}80}{24 \text{ x } 60 \text{ x } 60}$$

$$Q_{vert,max} = Q_{vert,medio} \text{ x } 1{,}8$$

Como se muestra en el siguiente gráfico, el caudal máximo del vertimiento muestra un crecimiento continuo correspondiente el crecimiento poblacional, llegando a un caudal medio de 1468 L/s y máximo horario de 2674 L/s en el año 2024.

Gráfico 46. Caudal medio y máximo horario de aguas residuales vertidas en el periodo 2014-2024



2.4 ELIMINACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS CONTENIDOS EN EL EFLUENTE

Los sistemas de tratamiento primario (criba gruesa y fina, desarenador, separador de aceites y grasas y microtamizaje a 0,5 mm) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3. CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR

A continuación se presenta un resumen de los resultados del estudio oceanográfico del cuerpo receptor que abarca la batimetría, las corrientes, la estratificación térmica y el perfil vertical de la densidad del agua natural.

3.1 Batimetría

En el gráfico 47 se muestra el mapa náutico más reciente del área marino-costera, que contiene los datos batimétricos y la ubicación del emisor submarino proyectado.

(Ver Gráfico 47)

Como muestra el mapa náutico, la batimetría local es característica de la zona centro-norte del Perú, con una pendiente del fondo marino muy baja, debido a que la plataforma continental se extiende a algunos kilómetros mar adentro. En la zona de rompiente de olas la pendiente del fondo marino es de 2%, y luego se reduce a aproximadamente 0,2%, quedando a este nivel bajo hasta el borde del zócalo continental que se encuentra a una distancia de más de 100 kilómetros.

La profundidad al final del emisor submarino es de 13,3 metros.

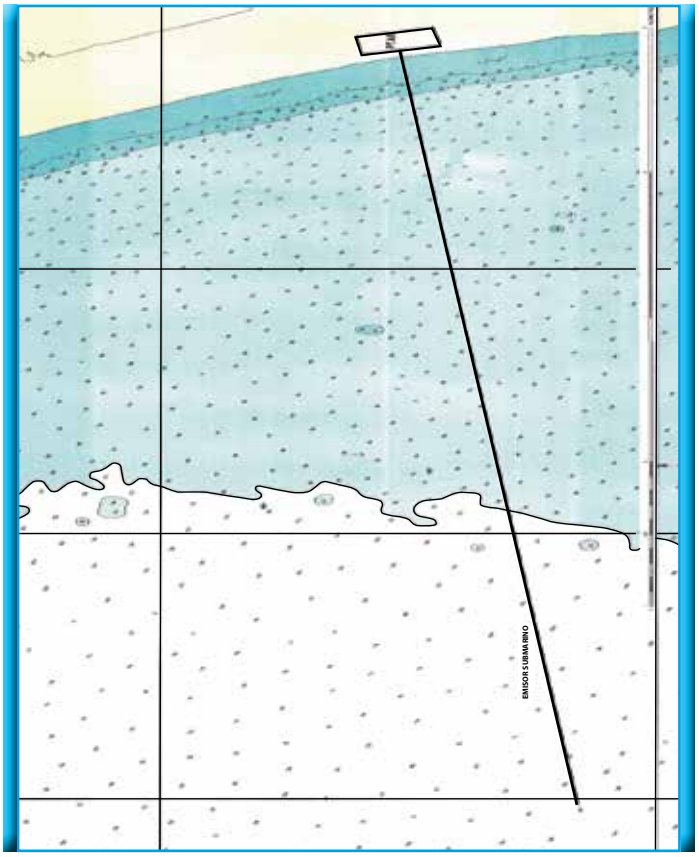
3.2 Densidad del agua natural marina

El vertimiento evaluado está ubicado en proximidad de 7° de latitud, donde el cuerpo marino está influenciado por la corriente fría de Humboldt; por tanto, no existe una estratificación térmica significativa. Asimismo, en proximidad del vertimiento no se encuentran desembocaduras de ríos o canales de agua dulce. Por consiguiente, se puede suponer una densidad del agua constante en la columna de agua, la cual es determinada con base en la salinidad y temperatura del cuerpo receptor medido en la superficie: salinidad media de 35 psu y temperatura de 18,1 °C (correspondiente a la temperatura máxima medida en el cuerpo receptor). Con estos datos el software de simulación calcula una densidad del agua de mar de 1025,3 kg/m^3.

3.3 Corrientes marinas

Un factor muy importante para la evaluación de la dilución inicial de la extensión de la zona de mezcla y del riesgo de impactos de la carga microbiológica del vertimiento son las corrientes marinas. El conocimiento de las velocidades y direcciones de las corrientes permite hacer estimaciones adecuadas sobre los posibles impactos del vertimiento de aguas residuales municipales en zonas sensibles a la contaminación microbiológica.

Gráfico 47. Mapa náutico del área del proyecto



Los vectores de velocidad de las corrientes marinas fueron determinados mediante seis (6) flotadores con vela de arrastre sumergida y GPS integrado. La profundidad de la vela seleccionada fue de 2 m, dado que las aguas residuales rápidamente emergerán a la superficie debido a su menor densidad que el agua natural, y, por lo tanto, su movimiento horizontal será determinado por la corriente superficial.

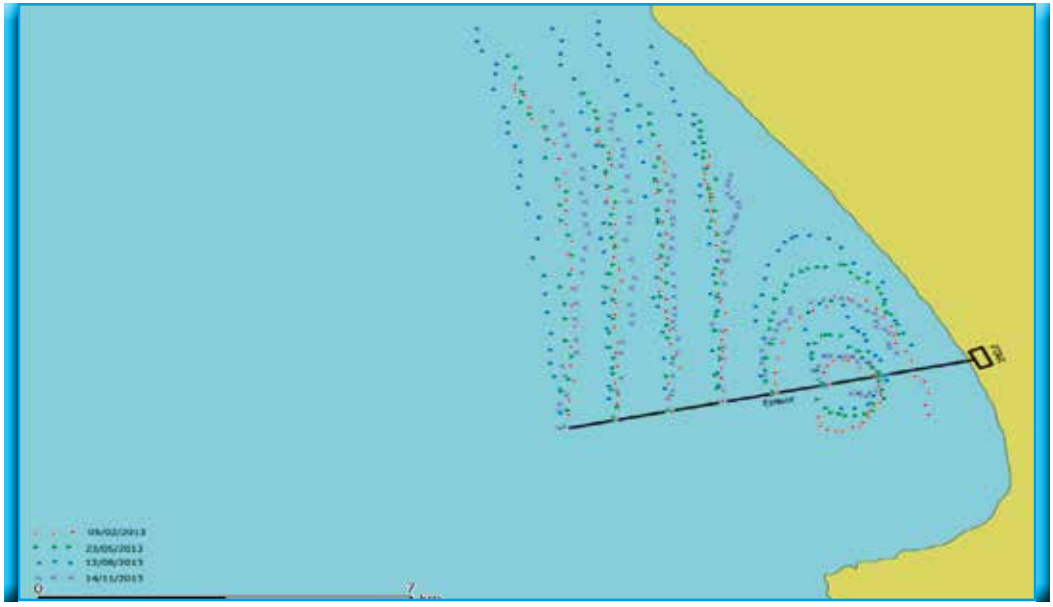
La medición comenzó en seis puntos ubicados en el eje del futuro emisor a una distancia de 2,5, 3,5, 4,5, 5,5, 6,5 y 7,5 km de la costa. La duración de cada campaña de medición era de veinticuatro horas, y el instrumento

GPS integrado registró la posición del flotador con una frecuencia horaria.

Se ha realizado un total de cuatro campañas de medición, distribuidas uniformemente en las diferentes estaciones del año en las fechas 5/2, 23/5, 12/8 y 14/11/2013.

Los datos recopilados fueron analizados mediante un sistema de información geográfica que permitió determinar los vectores de las corrientes marinas y las velocidades de flujo. En el siguiente gráfico se representa el resultado del estudio de las corrientes marinas.

Gráfico 48. Posiciones de los flotadores con vela de arrastre sumergida a 2 m, determinadas con una frecuencia horaria en las fechas 5/2, 23/5, 12/8 y 14/11/2013



El gráfico anterior demuestra que la corriente marina en todo el año está orientada al norte. Debido a la morfometría de la costa local con una punta terrestre en el sur del área de estudio, se forma un remolino que circula en sentido horario en la proximidad de la costa hasta una distancia de aproximadamente 3,5 km.

Las velocidades de la corriente superficial varían entre 3 cm/s y 12 cm/s, mostrando los valores medios que aparecen en la tabla 39 a lo largo de los trayectos recorridos por los flotadores.

Tabla 39. Velocidades medias y direcciones de las corrientes marinas en varias distancias de la costa

FECHA	DISTANCIA DE LA COSTA EN EL INICIO DE LA MEDICIÓN	DIRECCIÓN DE CORRIENTE PREDOMINANTE	VELOCIDAD MEDIA EN 24 HORAS
5/2/2013	2,5 km	Remolino circulando en sentido horario	2 cm/s
23/5/2013	2,5 km		2 cm/s
12/8/2013	2,5 km		3 cm/s
14/11/2013	2,5 km		1 cm/s
5/2/2013	3,5 km	Remolino circulando en sentido horario	5 cm/s
23/5/2013	3,5 km		6 cm/s
12/8/2013	3,5 km		8 cm/s
14/11/2013	3,5 km		4 cm/s
5/2/2013	4,5 km	Norte	7 cm/s
23/5/2013	4,5 km	Norte	8 cm/s
12/8/2013	4,5 km	Norte	11 cm/s
14/11/2013	4,5 km	Norte	9 cm/s
5/2/2013	5,5 km	Norte	8 cm/s
23/5/2013	5,5 km	Norte	9 cm/s
12/8/2013	5,5 km	Norte	12 cm/s
14/11/2013	5,5 km	Norte	8 cm/s
5/2/2013	6,5 km	Norte	9 cm/s
23/5/2013	6,5 km	Norte	10 cm/s
12/8/2013	6,5 km	Norte	12 cm/s
14/11/2013	6,5 km	Norte	10 cm/s
5/2/2013	7,5 km	Norte	10 cm/s
23/5/2013	7,5 km	Norte	11 cm/s
12/8/2013	7,5 km	Norte	12 cm/s
14/11/2013	7,5 km	Norte	10 cm/s

La máxima velocidad de corriente fue observada en el mes de agosto, con valores entre 11 cm/s a 4,5 km de la costa hasta 12 cm/s a 7,5 km. En la época de verano la velocidad de la corriente era de 7 cm/s a 4,5 km de la costa y 10 cm/s a 7,5 km. Al interior del remolino, en proximidad de la costa, se ha observado velocidades entre 1 cm/s y 8 cm/s.

3.4 Calidad del cuerpo natural de agua

Para la caracterización de la calidad del cuerpo natural de agua se han tomado muestras de agua que fueron analizadas en un laboratorio acreditado por INACAL.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua marino, se han realizado cuatro tomas de muestra en la ubicación del vertimiento proyectado a una distancia de 4,5 km de la costa, con una frecuencia trimestral en las mismas fechas en las cuales se han determinado las corrientes y la estratificación térmica en el marco del estudio oceanográfico. Las muestras fueron tomadas en la superficie solamente, dado que el cuerpo receptor no tiene una estratificación térmica significativa.

Se puede excluir la influencia del vertimiento actual sobre la calidad determinada en el punto de monitoreo, ya que la distancia entre el vertimiento en orilla de playa y el punto de monitoreo es de 4,5 km en dirección perpendicular a la dirección de las corrientes predominantes.

Tabla 40. Resultados analíticos del monitoreo del cuerpo receptor

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/AÑO	5/2/2013	23/5/2013	12/8/2013	14/11/2013	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (MÍNIMA PARA OXÍGENO)	ECA-AGUA CATEGORÍA 4: ECOSISTEMAS MARINOS
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	14:00	11:00	09:00		
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	Laboratorio	Laboratorio	Laboratorio		
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC		
N.° del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Coordenada norte (UTM-WGS84)		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Coordenada este (UTM-WGS84)		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
Temperatura	°C	18,1	18,0	17,0	17,2	18,1	delta 3 °C
Conductividad	μS/cm	44200	44500	44000	43800	44500	---
pH	--	8,22	8,31	8,13	8,11	8,31	6,8-8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	5,26	6,51	8,01	7,08	5,26	4
g	mg/L	<1	<1	<1	<1	0	1
DBO_5	mg/L	<2	<2	<2	<2	0	10
SST	mg/L	6,26	4,50	3,35	3,22	6,26	30
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	0	30
$N\text{-}NH_4$	mg/L	0,06	0,04	0,07	0,06	0,07	---
$N\text{-}NH_3$*	mg/L	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,08
Arsénico	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0,05
Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0	0,01
Cobre	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0,05
Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0	<0,0001
Níquel	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0	<0,0082
Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0	<0,0081
Zinc	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	<0,081

* La fracción de NH_3 no ionizada es determinada según la siguiente ecuación (Hampson, 1977):

$$N\text{–}NH_3^- = \frac{N - NH_4}{1 + 10^{\left(9{,}245 + \frac{2{,}31157 - S}{(1000 - 1{,}005109 \times S)} + 0{,}0324 \times (24{,}85 - r) + \frac{0{,}0415}{(r - 273{,}15)} - pH\right)}}$$

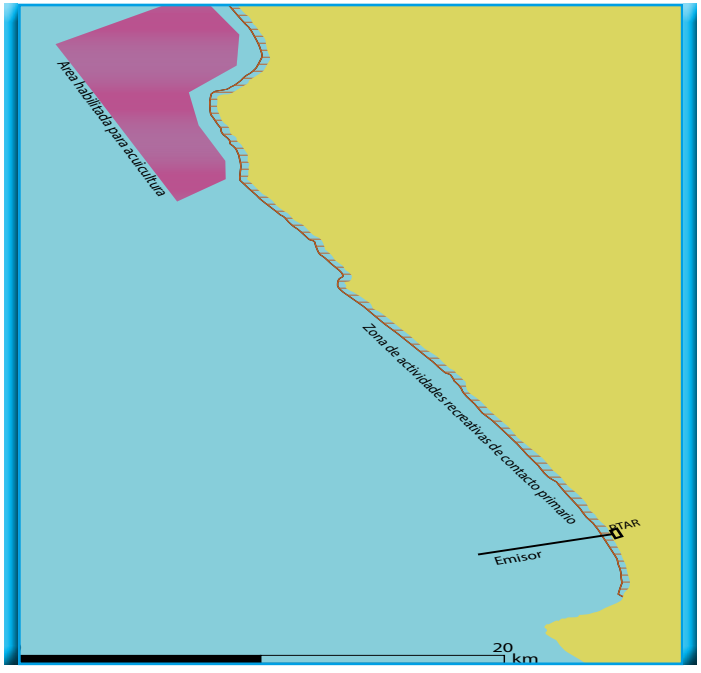
Los monitoreos realizados en el año 2013 evidenciaron que la calidad del cuerpo receptor no presenta indicios de contaminación, ya que todas las concentraciones cumplen con los ECA-Agua.

3.5 Zonas sensibles a la contaminación microbiológica

Se evaluó si en la proximidad del vertimiento proyectado existen las siguientes zonas sensibles a la contaminación microbiológica:

- Aguas superficiales destinadas al uso recreativo de contacto primario, incluyendo actividades como natación, esquí acuático, buceo libre, surf, canotaje, navegación en tabla a vela, moto acuática, pesca submarina y similares. La zona sensible corresponde a una franja de 300 m desde la orilla de las playas de la zona.[57]
- Área habilitada por la Dirección General de Acuicultura

Gráfico 49. Zonas sensibles a la contaminación microbiológica



57 La distancia de 300 m de la orilla de playa es aplicada para la definición de las zonas de actividades recreativas de contacto primario por varios países, entre ellos Brasil, y por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1988).

Ministerio de la Producción, para desarrollar actividades de acuicultura, ubicada en una distancia de 27 km al norte del emisor proyectado.

4. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ECA-AGUA EN EL LÍMITE DE LA ZONA DE MEZCLA

La evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo de agua marino, efectuado a través de un emisor submarino, debe comprobar que el diseño del difusor submarino proporciona una dilución inicial mínima –S_a– que es mayor que la dilución requerida –S_{max}–.

$$S_a > S_{max}$$

Si esta inecuación da un resultado correcto, las concentraciones de los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas en el límite de la zona de mezcla serán inferiores a los ECA-Agua.

4.1 Determinación de la dilución inicial requerida (S_{max})

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (S_{max}) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(S_i , S_{(i+1)} , S_{(i+2)} , S_{(i+n)})$$

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$: Dilución necesaria para respetar los ECA del parámetro i o i+n respectivamente, calculada con:

$$Si = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C_{RH,i})}$$

i, i+n : Parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente (véase numeral VI.4.2.1).

$C_{vert,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el efluente (véase numeral VI.4.2.2).

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural (véase el numeral VI.4.3.4).

Tabla 41. Dilución inicial requerida (S_{max})

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA-AGUA CAT. 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
Aceites y grasas	mg/L	52,5	1,0	0,0	52
DBO_5	mg/L	439	10	0	43

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA-AGUA CAT. 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
SST	mg/L	188	30	6,26	7
Coliformes termotolerantes	NMP/ 100 ml	2,30E+10	30	0	Evaluado en el numeral VI.4.5
Nitrógeno amoniacal	mg/L	63,80	---	0,07	No ECA
Amoniaco (NH_3)	mg/L	4,584	0,080	0,003	58
Arsénico	mg/L	0,053	0,050	0,000	0
Cadmio	mg/L	0,0026	0,0050	0,0000	0
Cobre	mg/L	0,085	0,050	0,000	1
Mercurio	mg/L	0,0010	0,0001	0,0000	9
Níquel	mg/L	0,0119	0,0082	0,0000	0
Plomo	mg/L	0,1953	0,0081	0,0000	23
Zinc	mg/L	0,343	0,081	0,000	3
				Smax	58

La dilución requerida para poder cumplir los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla es 58, siendo el parámetro crítico el amoniaco, seguido por los aceites y grasas y la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO_5).

4.2 Determinación de la dilución inicial mínima (S_a)

Con la finalidad de determinar el diseño del emisor submarino que permite alcanzar una dilución inicial mínima que es mayor que la dilución inicial requerida, se ha realizado un gran número de simulaciones de la descarga de aguas residuales mediante el software XXX, variando de forma iterativa los siguientes parámetros de diseño, hasta obtener un emisor que proporcione la dilución requerida y que tenga una longitud y costo mínimos:

- La longitud del emisor fue optimizada para garantizar la protección de las zonas sensibles de impactos de la carga microbiológica (véase el numeral VI.4.5).
- El diámetro de los orificios fue optimizado para obtener un número de orificios mínimo y garantizar al mismo tiempo la dilución requerida.
- La orientación vertical del eje de los orificios fue optimizada para maximizar la dilución inicial.
- La distancia entre los orificios fue optimizada para minimizar la longitud del difusor, seleccionando

inicialmente una distancia grande y posteriormente reduciéndola, hasta que se alcance la dilución requerida.

Los otros parámetros de ingreso del modelo fueron determinados según el siguiente detalle:

- Características de las aguas residuales:
  - Caudal máximo: 2674 L/s (correspondiente al caudal horario máximo calculado para el año 2024).
  - Densidad: 999,5 kg/m^3 (valor normal de la densidad de aguas residuales tratadas doméstico-municipales).
- Características del cuerpo receptor en la ubicación de la descarga:
  - Profundidad de descarga: 11,8 m (profundidad media del cuerpo receptor en la ubicación del difusor de 13,3 m, menos 1,5 m correspondientes a la altura de descarga sobre el fondo).
  - Densidad: 1025,3 kg/m^3 (calculada por el software en función de la temperatura y salinidad).
  - Corrientes marinas nulas (suposición conservadora aplicada por no contar con una medición continua de las velocidades de corriente en un periodo mayor de 30 días).

Con estos datos de ingreso, y después de la optimización iterativa, se ha diseñado el siguiente emisor submarino, que logra, en las condiciones más críticas (corriente nula), una dilución inicial de 63, que es mayor que la dilución de 58 requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla:

- Tipo tubería: HDPE-DN800.
- Diámetro interno: 735 mm (seleccionado para mantener la velocidad de flujo en el emisor en el rango de 0,6 m/s hasta 6,0 m/s, que resulta en una carga de bombeo mínima y, al mismo tiempo, impide la sedimentación de materia suspendida al interior del difusor).
- Longitud: 5500 m.
- Diámetro de los orificios: 15,0 cm.
- Número de orificios: 21 (calculado con la condición de que la relación entre el área total de los orificios y el área de la tubería debe ser aproximadamente 1 a 0,9 [Brooks, 1970], para garantizar el funcionamiento hidráulico del difusor).
- Orientación vertical del eje de los orificios: 0° (descarga horizontal).
- Orientación horizontal del eje de los orificios: 100° medido desde el este en sentido contrario de las manecillas del reloj (difusor orientado perpendicular a la orilla de playa).

- Altura de descarga sobre el fondo: 1,5 m (seleccionado para evitar la cobertura de los orificios con sedimentos).
- Distancia entre los orificios: 6,0 m.
- Longitud del difusor: 120 m (= número de orificios – 1 x distancia).

4.3 Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla

La extensión máxima de la zona de mezcla fue calculada mediante el modelo de simulación XXX, considerando la velocidad de corrientes máxima de 0,12 m/s en dirección norte (véase el numeral VI.4.3.3).

En los siguientes gráficos se representan los resultados de la simulación en las condiciones de corriente máxima.

Gráfico 50. Eje central y límites de la pluma de aguas residuales (profundidad vs. distancia, en metros)

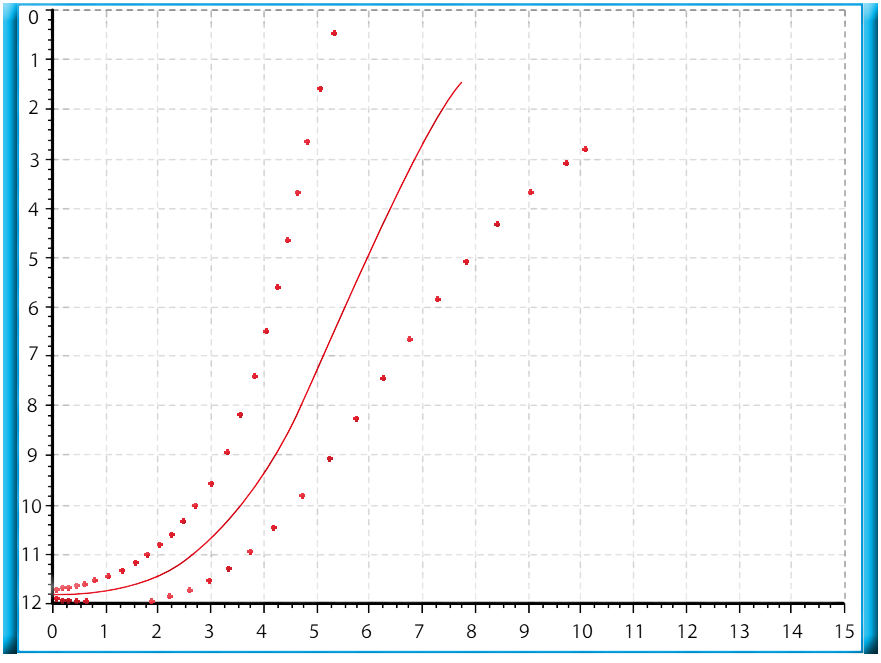
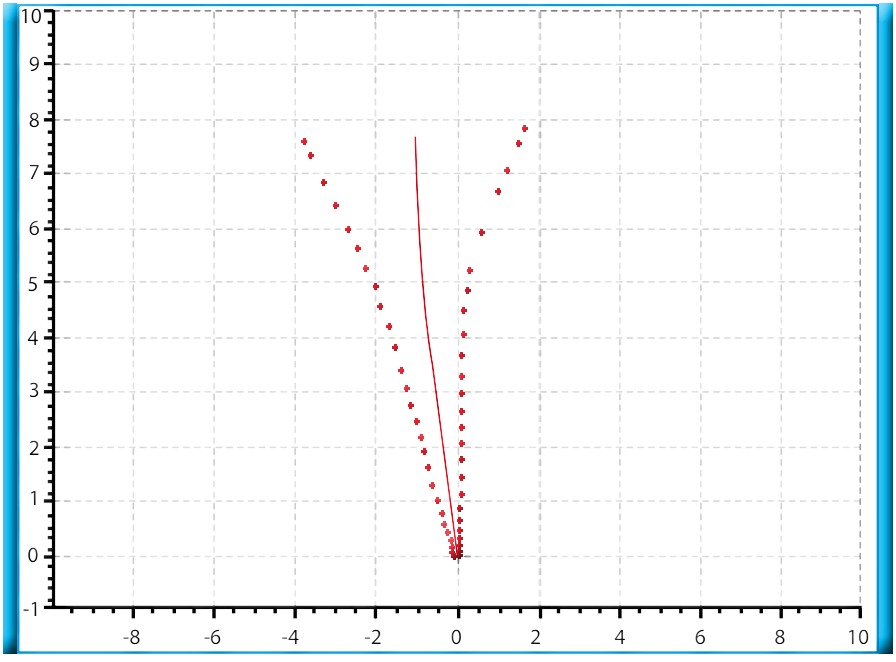


Gráfico 51. Vista plana de la pluma de aguas residuales (en metros)



La simulación en las condiciones de corriente máxima demuestra que la zona de mezcla no excede una distancia de 10 m medidos desde el emisor submarino, dado que el agua residual, debido a su menor densidad, sube rápidamente a la superficie. La extensión en dirección este-oeste de la pluma singular es de aproximadamente 6 m; a esto se suma la longitud del difusor de 120 m. Por lo tanto, la zona de mezcla se extiende por una superficie de 126 m (120 + 6) de largo y 10 m de ancho al norte del emisor. En esta zona no se encuentran áreas habilitadas para desarrollar actividades de acuicultura o donde se haya otorgado un derecho de uso acuícola, áreas donde se realizan actividades recreativas de contacto primario, áreas naturales protegidas o ecosistemas frágiles reconocidos por las autoridades ambientales o sectoriales. Asimismo, el emisor submarino no está ubicado en proximidad de una bahía, así que no existe un riesgo de acumulación de contaminantes y de incumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo. Por lo tanto, no hay impedimento alguno para establecer la zona de mezcla.

Considerando la reducida extensión de la zona de mezcla, se propone fijar los puntos de control de los ECA-Agua a una distancia de 100 m del emisor en las cuatro direcciones.

5. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA

Dado que el vertimiento contiene una alta carga microbiológica, a continuación se comprueba que no haya impacto negativo en las zonas sensibles en proximidad del vertimiento, verificando que el tiempo de transporte desde el emisor hasta el límite de la zona sensible sea mayor que el tiempo de residencia mínimamente requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes, a los niveles del Estándar de Calidad Ambiental.

Esta evaluación fue realizada para las áreas donde se realizan actividades recreativas de contacto primario (franja de 300 m desde la orilla de las playas de la zona) y en el área habilitada para desarrollar actividades de acuicultura, ubicada a 27 km al norte del emisor proyectado. Para el primer caso se han considerado las condiciones ambientales (corriente y temperatura del agua) de verano, mientras que para el segundo, las condiciones de invierno.

Con el objetivo de determinar la longitud mínima del emisor que resulta en un tiempo de transporte mayor que el tiempo de residencia requerido, se han evaluado diferentes longitudes del emisor de 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0 y 5,5 km. Para cada alternativa se ha determinado la dilución inicial, la longitud del emisor óptima, el tiempo de transporte desde el emisor hasta el límite de las dos zonas sensibles en las diferentes estaciones del año, y el tiempo de residencia mínimamente requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes a los niveles del Estándar de Calidad Ambiental. La evaluación de las alternativas demostró que un emisor con una longitud menor de 5,0 km no puede garantizar el cumplimiento de los ECA-Agua en el área de actividades recreativas; por lo tanto, se seleccionó una longitud de 5,5 km (tubería de 5380 m y difusor de 120 m).

Seguidamente se desarrolla la evaluación del impacto de la carga microbiológica en las zonas sensibles para el diseño del emisor seleccionado.

5.1 Tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de zona sensible

El tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de zona sensible –Tt– se calcula con:

$$Tt = \frac{D}{U \times 3600}$$

Para el verano y la evaluación del impacto en el área de actividades recreativas de contacto primario:

$$Tt = \frac{D}{U \times 3600} = \frac{5600}{0{,}08 \times 3600} = 19{,}4 \text{ horas}$$

Para el invierno y la evaluación del impacto en el área habilitada para la acuicultura:

$$Tt = \frac{D}{U \times 3600} = \frac{26700}{0{,}12 \times 3600} = 61{,}8 \text{ horas}$$

Donde:

U: Vector de velocidad de corriente máxima: en verano, 0,08 m/s, y en invierno, 0,12 m/s a 5,5 km de la costa (véase numeral VI.4.3.3).

D: Distancia desde la zona de vertimiento hasta el límite de la zona sensible, expresada en metros. Dado que el área de estudio presenta situaciones de flujo complejas con vectores de corriente que describen curvas, la distancia mínima fue determinada siguiendo las curvas de los vectores, desde la zona de mezcla hasta el límite de las zonas de impacto. Asimismo, se ha considerado la dispersión horizontal de la pluma de aguas residuales que ocurre en el transporte horizontal por la corriente marina, calculando el ancho de la pluma –L– en varias distancias del emisor, con la ecuación de mezcla turbulenta de Brooks (1960):

$$L = b \times \left(1 + \frac{8 \times \alpha \times D}{U \times b^{2/3}} \right)^{3/2}$$

Donde:

α: Coeficiente de dispersión horizontal en $m^{2/3}/s$, que en zonas costeras de alta disipación de energía (como las costas del Perú) llega a valores de hasta 0,0005 $m^{2/3}/s$.

b: Ancho de la pluma emergiendo a la superficie, el cual se calculó con la siguiente fórmula:

$$b = L_d \times \cos(90 - \gamma) + 0{,}5 \times H_{med} = 124 \text{ m}$$

L_d : es la longitud del difusor: 120 m (véase el numeral VI.4.4.2).

γ : es el ángulo en el plano horizontal entre el vector de la corriente marina -U- y el eje central del difusor: $190° - 90° = 100°$ (véase los numerales VI.4.3.3 y VI.4.4.2).

H_{med}: es la profundidad media de la descarga: 11,8 m (véase el numeral VI.4.4.2).

Tabla 42. Ancho de la pluma en varias distancias del emisor para las condiciones de corriente de verano

DISTANCIA DESDE EL EMISOR D	ANCHO DE LA PLUMA L
km	m
2	1395
4	3372
6	5856

Tabla 43. Ancho de la pluma en varias distancias del emisor para las condiciones de corriente de invierno

DISTANCIA DESDE EL EMISOR D	ANCHO DE LA PLUMA L
km	m
5	2651
15	12025
25	25141

En los siguientes gráficos se representa la pluma de aguas residuales y la distancia desde el emisor submarino hasta el límite de las zonas sensibles.

Gráfico 52. Pluma de aguas residuales y distancia desde el emisor submarino hasta el límite de la zona de actividades recreativas de contacto primario en las condiciones de corriente de verano

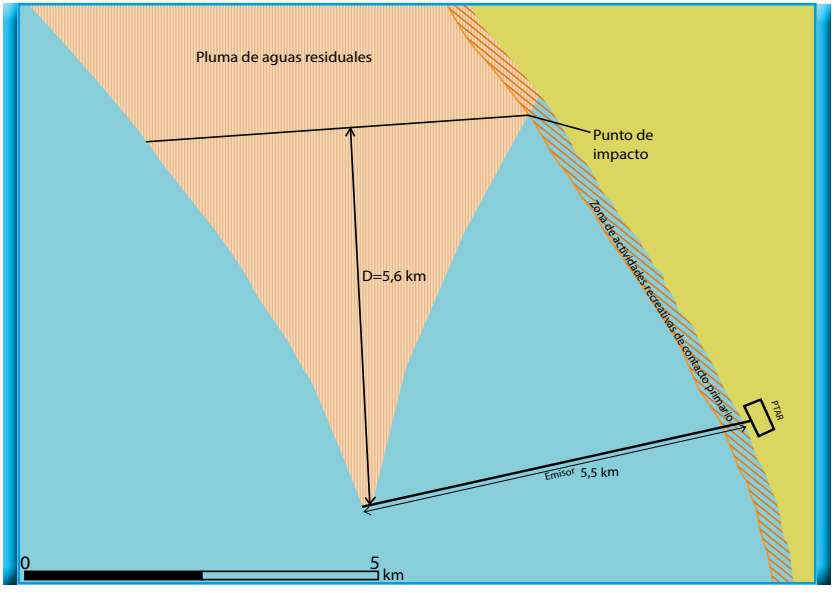
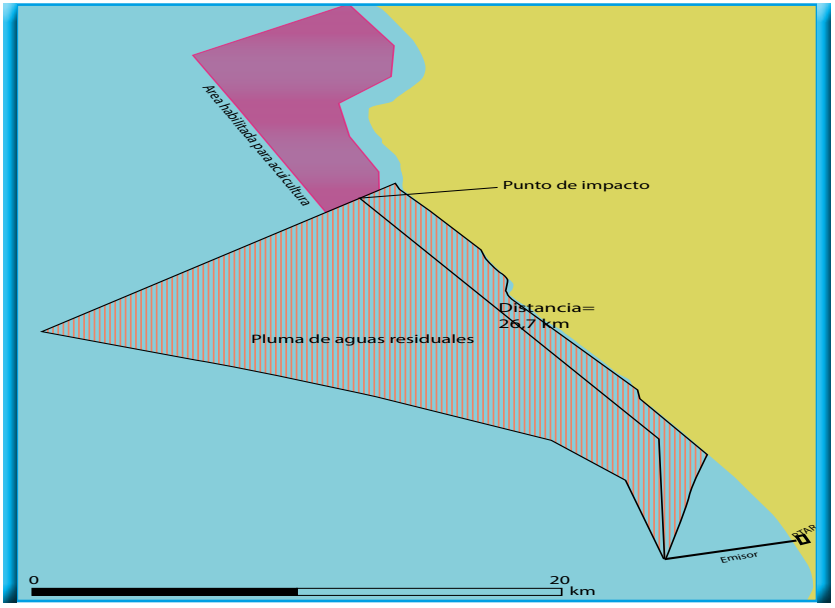


Gráfico 53. Pluma de aguas residuales y distancia desde el emisor submarino hasta el límite del área habilitada para acuicultura en las condiciones de corriente de invierno



5.2 Tiempo de residencia mínimamente requerido

El tiempo de residencia mínimamente requerido –$T_{residencia,min}$– para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes a los niveles del Estándar de Calidad Ambiental se calcula con:

$$T_{residencia,min} = T_{90} \text{ x } LOG_{10}(C_{Mezcla} / C_{ECA})$$

Para el verano y un tiempo de transporte de 19,4 horas:

$$T_{residencia,min} = T_{90} \text{ x } LOG_{10}(C_{Mezcla} / C_{ECA}) = 3,4 \text{ x } LOG_{10}(1,2x10^{7} / 200) = 16,4 \text{ horas}$$

Para el invierno y un tiempo de transporte de 61,8 horas:

$$T_{residencia,min} = T_{90} \text{ x } LOG_{10}(C_{Mezcla} / C_{ECA}) = 8,4 \text{ x } LOG_{10}(2,3x106 / 14) = 44,1 \text{ horas}$$

Donde:

C_{ECA} : ECA-Agua de los coliformes termotolerantes según la categoría correspondiente a la zona sensible: para el área de actividades recreativas de contacto primario (categoría 1, subcategoría B1): 200 NMP/100mL y para el área habilitada para acuicultura (categoría 2, subcategoría C1): 14 NMP/100mL.

T_{90} : Tasa de desaparición de coliformes termotolerantes, definida como el intervalo de tiempo requerido para la desaparición de 90% de los organismos remanentes. Para la determinación del T_{90} de coliformes termotolerantes se aplica la siguiente ecuación propuesta por Mancini (1978) y adaptada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de España:[58]

$$T_{90} = \frac{1}{\xi /60 \times (1\text{-}0{,}65 \times C^2) \times (1 - SST/800) + 0{,}02 \times 10^{(T-20)/35}}$$

Donde:

ξ : Ángulo del sol sobre el horizonte, en grados sexagesimales (noche: 0º; mediodía: 90º).

C : Fracción del cielo cubierto por nubes, en tantos por uno: para la evaluación del impacto en la zona de actividades recreativas de contacto primario se suponen condiciones soleadas con un valor mínimo de C = 0, y para la evaluación del impacto en el área habilitada para acuicultura se supone un cielo cubierto con un valor máximo de C = 1.

SST : Concentración promedio de sólidos en suspensión, calculada con el balance de masas para la situación futura de vertimiento:

$$SST = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH} + Q_{vert})} = \frac{(C_{RH} \times Q_{vert} \times S_a) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{vert} \times S_a + Q_{vert})} = \frac{Q_{vert} \times (C_{RH} \times S_a + C_{vert})}{Q_{vert} \times (1 + S_a)} = \frac{(C_{RH} \times S_a + C_{vert})}{(1 + S_a)} = \frac{(6{,}26 \times 61 + 188)}{(1 + 61)} = 9{,}2 \text{ mg/L}$$

T : Temperatura del agua: 18,1 ºC en verano y 17 °C en invierno.

Para la evaluación de un potencial impacto en la zona de actividades recreativas de contacto primario, se consideran las características del cuerpo marino y de radiación solar de la temporada de playa (verano).

58 Orden del 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar.

Se desarrolla el cálculo del T90 para las condiciones ambientales de verano.

Tabla 44. T_{90} variable en los diferentes horarios calculado para las condiciones ambientales de verano

HORA	ξ	T_{90}	$1/T_{90}$
18:00	0	56,7	0,018
19:00	0	56,7	0,018
20:00	0	56,7	0,018
21:00	0	56,7	0,018
22:00	0	56,7	0,018
23:00	0	56,7	0,018
00:00	0	56,7	0,018
01:00	0	56,7	0,018
02:00	0	56,7	0,018
03:00	0	56,7	0,018
04:00	0	56,7	0,018
05:00	0	56,7	0,018

HORA	ξ	T_{90}	$1/T_{90}$
06:00	0	56,7	0,018
07:00	15	3,8	0,265
08:00	30	2,0	0,512
09:00	45	1,3	0,759
10:00	60	1,0	1,007
11:00	75	0,8	1,254
12:00	90	0,7	1,501
13:00	75	0,8	1,254
14:00	60	1,0	1,007
15:00	45	1,3	0,759
16:00	30	2,0	0,512
17:00	15	3,8	0,265

En esta tabla se puede observar la gran influencia de la radiación solar sobre la tasa de desaparición de coliformes termotolerantes, resultando en un T_{90} de 56,7 horas en la noche y 0,7 horas a mediodía. Considerando esta variabilidad horaria de la tasa de desaparición, se calcula el T_{90} medio para un periodo que corresponde al tiempo de transporte desde la zona de vertimiento hasta el límite de la zona sensible (T_t), iniciando con la hora de puesta del sol (18:00 h) mediante la siguiente ecuación:

$$T_{90,promedio} = \frac{T_t}{1/T_{90,18h} + 1/T_{90,18h+1} + \ldots + 1/T_{90,18h+Tt}}$$

Donde:

$T_{90,18h}$: Tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00 horas.

$T_{90,18h+1}$: Tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00 + 1 horas.

.... : Representa todos los recíprocos de los T_{90} entre las 18:00 + 1 y 18:00 + Tt horas.

$T_{90,18h+Tt}$: Tasa de desaparición de coliformes termotolerantes a las 18:00 + Tt horas.

T_t : Tiempo de transporte (o permanencia), en horas.

Esta metodología de cálculo del T_{90} supone las condiciones más críticas, considerando que las aguas residuales

tratadas son vertidas en la noche y transportadas por la corriente marina hacia la zona de impacto en las condiciones ambientales menos favorables en lo que concierne a la desaparición de coliformes (13 horas sin radiación solar). Sin embargo, superadas las trece horas de permanencia en el cuerpo receptor, el T_{90} baja rápidamente, dado que se puede considerar la radiación en las horas de día. En tales condiciones y un tiempo de transporte de 19,4 horas, se obtiene un T_{90} de 3,8 horas (calculado para la evaluación del impacto en el área de actividades recreativas y condiciones de corriente de verano).

Para la evaluación del potencial impacto en el área habilitada para acuicultura se consideraron las características del cuerpo marino y de radiación solar de la estación de invierno, dado que son actividades que se realizan durante todo el año y las condiciones ambientales de invierno son las menos favorables en cuanto a la desaparición de coliformes (alto grado de cobertura del cielo por nubes y bajas temperaturas del agua). En esas circunstancias, y aplicando la metodología descrita en lo anterior, se obtiene un T_{90} de 8,4 horas para un tiempo de transporte de 61,8 horas.

C_{Mezcla} : Densidad de coliformes termotolerantes después de la dilución inicial y de la dispersión en el transporte horizontal. Se calcula con:

$$C_{Mezcla} = \frac{C_{coli.term,vert}}{S_a \times C_0/C_T}$$

Para el verano y un tiempo de transporte de 19,4 horas:

$$C_{Mezcla} = \frac{C_{coli.term,vert}}{S_a \times C_0/C_T} = \frac{2{,}3\times10^{10}}{63 \times 30{,}4} = 1{,}2\times10^{7}\ \text{NMP/100 mL}$$

Para el invierno y un tiempo de transporte de 61,8 horas:

$$C_{Mezcla} = \frac{C_{coli.term,vert}}{S_a \times C_0/C_T} = \frac{2{,}3\times10^{10}}{63 \times 156{,}9} = 2{,}3\times10^{6}\ \text{NMP/100 mL}$$

Donde:

$C_{coli.term,vert}$: Densidad máxima de coliformes termotolerantes en las aguas residuales tratadas: 2,3·1010 NMP/100 mL (véase el numeral VI.4.2.2).

S_a : Dilución inicial mínima: 63 (véase el numeral VI.4.4.2).

C_0/C_T : Factor de dispersión horizontal que está en función del régimen de corrientes locales y la dispersión turbulenta (mezcla lateral causada por corrientes turbulentas). Según Brooks (1960), se calcula con:

$$\frac{C_O}{C_T} = \sqrt{\frac{\left(1+\frac{13 \times T_t}{b^{2/2}}\right)^3 - 1}{1.5}}$$

b : Ancho de la pluma emergiendo a la superficie = 124 m (véase el numeral VI.4.5.1)

Para el verano y un tiempo de transporte de 19,4 horas:

$$C_0/C_T = 30,4$$

Para el invierno y un tiempo de transporte de 61,8 horas:

$$C_0/C_T = 156,9$$

5.3 Evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua de los coliformes termotolerantes en el límite de las zonas sensibles

El tiempo de transporte desde el emisor hasta el límite de la zona sensible debería ser mayor que el tiempo de residencia requerido para la reducción de la densidad de los coliformes termotolerantes a los niveles del ECA-Agua:

$$T_t > T_{residencia,min}$$

En el caso de que esta inecuación dé un resultado correcto, no habrá riesgo de incumplimiento del ECA-Agua.

Para la evaluación del impacto en el área de actividades recreativas de contacto primario:

$$19,4 \text{ horas} > 16,4 \text{ horas}$$

Para la evaluación del impacto en el área habilitada para la acuicultura:

$$61,8 \text{ horas} > 44,1 \text{ horas}$$

La probable densidad de coliformes termotolerantes en el límite de la zona sensible se calcula con:

$$C_{T_t} = \frac{C_{Coli.term,vert}}{S_a \text{ x } C_O/C_T \text{x} 10^{(\frac{T_t}{T_{90}})}}$$

Para el límite del área de actividades recreativas de contacto primario:

$$C_{T_t} = 27 \text{ NMP/100 mL} < ECA_{Coli.term.} = 200 \text{ NMP/100 mL}$$

Para la evaluación del impacto en el área habilitada para la acuicultura:

$$C_{T_t} = 0,11 \text{ NMP/100 mL} < ECA_{Coli.term.} = 14 \text{ NMP/100 mL}$$

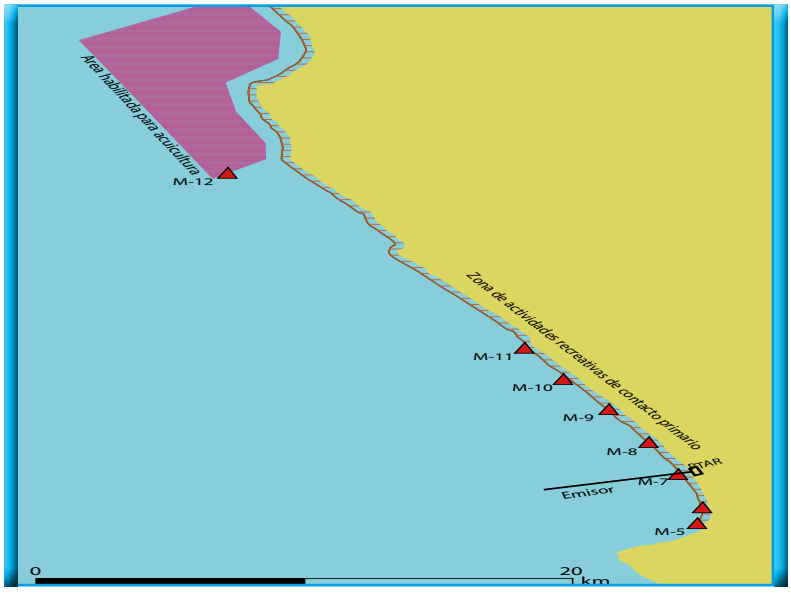
Con lo que queda demostrado que la longitud del emisor propuesto garantiza el cumplimiento de los ECA-Agua en las zonas sensibles a la contaminación microbiológica.

5.4 Puntos de control de la calidad microbiológica del cuerpo receptor

Considerando los resultados de la evaluación anterior, se proponen los siguientes puntos de control de la calidad microbiológica del cuerpo receptor:

- Siete puntos en el límite del área de actividades recreativas a 300 m de la playa: 4 y 2,5 km al sur del emisor, en el eje del emisor, 2,5, 5,0, 7,5 y 10 km al norte del emisor.
- Un punto en el límite del área habilitada para acuicultura, 27 km al norte del emisor.

Gráfico 54. Puntos de control de la calidad microbiológica del cuerpo receptor



6. CRITERIOS PARA EL CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 45. Programa de control del efluente

CÓDIGO	COORDENADAS – UTM (WGS84)			DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	ARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL[2]
	ZONA	NORTE	ESTE			
E-1	XX	XXXXXXX	XXXXXX	Aguas residuales tratadas	Caudal, pH, temperatura, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales, DBO_5, coliformes termotolerantes, amoniaco, metales [1]	Mensual

Nota: la toma de muestra de los efluentes será realizada en la caja de registro antes de su descarga al mar.

Tabla 46. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	COORDENADAS – UTM (WGS84)			DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	CUERPO NATURAL DE AGUA		PROFUNDIDAD	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL [2]
	ZONA	NORTE	ESTE		NOMBRE	CAT ECA			
M-1	XX	XXXXX	XXXXX	100 m al norte del difusor	Mar XXXXX	4	Superficie	pH, Temperatura, Aceites y grasas, Sólidos Suspendidos Totales, DBO_5, Amoniaco, Metales 1	Mensual
M-2	XX	XXXXX	XXXXX	100 m al oeste del difusor	Mar XXXXX	4	Superficie		
M-3	XX	XXXXX	XXXXX	100 m al sur del difusor	Mar XXXXX	4	Superficie		
M-4	XX	XXXXX	XXXXX	100 m al este del difusor	Mar XXXXX	4	Superficie		
M-5	XX	XXXXX	XXXXX	4,0 km al sur del emisor a 300 m de la orilla de playa	Mar XXXXX	1 B1	Superficie	Coliformes termotolerantes, enterococos	mensual, en temporada de baño (Nov-Mayo)
M-6	XX	XXXXX	XXXXX	2,5 km al sur del emisor a 300 m de la orilla de playa	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-7	XX	XXXXX	XXXXX	En el eje del emisor a 300 m de la orilla de playa	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-8	XX	XXXXX	XXXXX	2,5 km al norte del emisor a 300m de la orilla	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-9	XX	XXXXX	XXXXX	5,0 km al norte del emisor a 300 m de la orilla	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-10	XX	XXXXX	XXXXX	7,5 km al norte del emisor a 300 m de la orilla	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-11	XX	XXXXX	XXXXX	10,0 km al norte del emisor a 300 m de la orilla	Mar XXXXX	1 B1	Superficie		
M-12	XX	XXXXX	XXXXX	En el límite del área habilitada para acuicultura, 27 km al norte del emisor	Mar XXXXX	3 C1	Superficie	Coliformes termotolerantes	mensual

1 Metales considerados en la categoría ECA-Agua 4, ecosistemas marinos y determinados con ICP: arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc.

2 La frecuencia de control ha sido establecida en función del volumen anual de aguas residuales vertidas:
Vanual = caudal medio en el año 2024 x 365 días = 1486 L/s x 3600s x 24h x 365 días / 1000L = 46,86 M m^3. Valor que es mayor que 9 M m^3 y resulta en una frecuencia mensual, lo que está conforme con la frecuencia mínima establecida en la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

La toma de muestra del efluente y del cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y en conformidad con la R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha demostrado que un emisor submarino de una longitud de 5500 m garantiza el cumplimiento del ECA-Agua de los coliformes termotolerantes en el límite de las zonas sensibles a la contaminación microbiológica.
- Asimismo, se pudo comprobar que un difusor de una longitud de 120 m, con veintiún orificios ubicados en una profundidad de 11,8 m, también en las condiciones menos favorables de velocidad de corriente nula, logra una dilución inicial de 63, garantizando el cumplimiento de los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla.
- La zona de mezcla tiene una extensión máxima de 126 m en dirección este-oeste y 10 m en el norte del emisor. No ocupa áreas habilitadas para desarrollar actividades de acuicultura o donde se ha otorgado un derecho de uso acuícola, zonas donde se realizan actividades recreativas de contacto primario, áreas naturales protegidas o ecosistemas frágiles reconocidos por las autoridades ambientales o sectoriales. Por lo tanto, no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla.
- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en cuatro puntos de control establecidos al norte, oeste, sur y este, a una distancia de 100 m del difusor. Adicionalmente, se proponen siete puntos de control de la calidad microbiológica del agua natural, ubicados a 300 m de la orilla de playa en varias distancias del emisor, y un punto en el límite del área habilitada para acuicultura a 27 km al norte del emisor. Todas las muestras serán tomadas en la superficie, ya que se ha comprobado que la pluma de aguas residuales rápidamente emerge a ella. El control del efluente y en el cuerpo receptor será realizado con una frecuencia mensual.

5



Vertimiento de aguas residuales de origen minero metalúrgico a una quebrada

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- El proyecto minero prevé la explotación de un yacimiento epitermal de alta sulfuración, polimetálico, y la producción de concentrado de mineral que contiene principalmente cobre y oro.
- El proyecto se localiza en los Andes peruanos, a alturas que van desde los 3600 hasta los 4200 msnm. Las instalaciones del proyecto están ubicadas en la microcuenca del río XXX, que forma parte de la macrocuenca XXX.
- Dado que el yacimiento es superficial, el método de minado es a cielo abierto, en un tajo que tendrá una extensión máxima de 65 ha y una profundidad máxima de 45 m.
- El material de desmonte extraído del tajo se dispondrá en un depósito que ocupará un área máxima de 84 ha.
- La caracterización geoquímica de los minerales indica que el material extraído del tajo, así como las paredes de este, tendrán el potencial de generar drenaje ácido.
- El mineral enviado al procesamiento será almacenado temporalmente un una pila que ocupa una superficie máxima de 2 ha.
- Las vías internas de transporte del mineral y de los desmontes ocupan un área de 1,8 ha y cuentan con un sistema de drenaje que deriva las aguas de lluvia al depósito de relaves.
- La planta concentradora del mineral está diseñada para el procesamiento de 9000 tpd y sus instalaciones incluyen un chancador primario, un molino de bolas y un circuito de flotación para obtener el concentrado de cobre con contenido de oro. La planta concentradora ocupa un área de 0,5 ha y tendrá una demanda de agua continua de 40 L/s, que serán tomados de la quebrada XXX aguas arriba de las operaciones mineras. Los relaves generados serán deshidratados, y el agua recuperada será enviada al proceso de molienda para su reutilización. Los relaves enviados al depósito de relaves contendrán entre 35% y 40% de agua en su masa.
- Todas las aguas residuales industriales del proyecto, que abarcan el agua de bombeo del tajo, el agua contenida en los relaves y el agua de contacto

proveniente del depósito de desmontes, de las vías de tránsito interno, del almacén temporal del mineral y del área de la planta concentradora, serán recolectadas mediante sistemas de drenaje superficial y subsuperficial y dirigidas al depósito de relaves.

- El depósito de relaves tendrá una superficie máxima de 35 ha. Su impermeabilización con geomembranas y el sistema de drenaje de fondo reducirá la infiltración de aguas residuales a un mínimo. Dentro del depósito de relaves se tendrá una piscina de sobrenadantes, que será el resultado de la acumulación de flujos de aguas provenientes de filtraciones, escorrentías y precipitaciones. Desde la piscina de agua sobrenadante, las aguas residuales industriales serán bombeadas a la planta de tratamiento.

- La planta de tratamiento de aguas residuales industriales está compuesta por las siguientes etapas:

  – Etapa 1: remoción de hierro, aluminio y sulfatos:

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 7.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación de floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.

  – Etapa 2: remoción de zinc y cobre:

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 9.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación de floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.

  – Etapa 3: remoción de otros metales:

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 11.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación de floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.

  – Etapa 4: neutralización y clarificación final:

    Estanque de neutralización con dosificación de ácido sulfúrico hasta un pH $<$ 8,5.

    Filtro de arena para la clarificación final.

- El agua residual industrial tratada será descargada a la quebrada XXX, que tiene la categoría ECA-Agua 3, Riego y bebida de animales, dado que tributa al río XXX, que en la R.J. Nº 202-2010-ANA, Clasificación de cuerpos de agua superficiales y marino costeros, fue clasificado con categoría 3.

- El agua residual doméstica generada en el campamento del proyecto minero será tratada en una poza séptica y humedal artificial, para su posterior infiltración en el subsuelo a través de una zanja de infiltración. Por lo tanto, las aguas residuales domésticas no serán vertidas a un cuerpo natural de agua y no serán objeto de la evaluación realizada en los acápites siguientes.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Se resumen las informaciones meteorológicas, hidrológicas y de calidad del agua superficial relevantes para la evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor.

2.1 Meteorología

Las características climatológicas del área de estudio fueron determinadas a partir de la información meteorológica de la estación meteorológica XXX, ubicada a una distancia de 45 km del área de estudio y a una altitud de 3500 msnm. Dado que las características fisiográficas de la localidad donde está ubicada la estación meteorológica son similares a aquellas del área de estudio, y que está ubicada en aproximadamente la misma altitud que el proyecto, los datos meteorológicos pueden ser considerados representativos para el área de estudio.

En la tabla 47 se indican los principales datos meteorológicos medidos en la estación meteorológica XXX en los años 2009 a 2013.

Tabla 47. Precipitaciones mensuales de los años 2009 a 2013, en milímetros

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
2009	104,4	103,6	149,3	109,7	41,9	21,3	0,0	0,0	61,3	57,8	103,2	133,8	886,3
2010	108,8	96,0	179,3	120,9	59,4	10,7	21,8	9,1	65,0	134,1	206,3	222,3	1233,7
2011	151,4	134,9	354,3	83,3	59,7	8,9	10,2	27,7	35,8	260,8	112,0	195,6	1434,6
2012	91,4	205,0	287,8	137,2	18,0	60,4	13,0	13,2	44,5	130,6	179,6	247,4	1428,1
2013	174,0	63,2	237,5	205,5	58,9	3,3	25,9	23,9	49,5	123,1	139,2	188,8	1292,8
Promedio	126,0	168,5	225,8	115,4	49,4	26,6	11,7	11,5	78,9	129,5	139,6	188,8	1271,7
Mínimo	91,4	163,2	237,5	119,6	45,4	28,1	12,9	12,6	83,7	123,1	139,2	188,8	886,3
Máximo	174,0	373,4	354,3	205,5	84,6	109,0	25,9	27,7	218,2	260,8	206,3	247,4	1434,6

El régimen pluviométrico representado en la tabla anterior demuestra un comportamiento característico para la mayor parte de la sierra peruana, con precipitaciones altas entre los meses de octubre y mayo, las cuales tienen su origen en los vientos húmedos provenientes del este, que, elevados por la cordillera de los Andes, ocasionan una gran pluviosidad en la vertiente oriental de la cordillera. Sin embargo, cuando los vientos alcanzan la zona de estudio ya no resta mucha humedad, por lo que la precipitación media anual no es muy alta.

La evaporación potencial fue estimada aplicando el método de Penman-Monteith, que utiliza en sus cálculos datos mensuales de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y porcentaje de nubosidad.

Tabla 48. Evaporación potencial mensual de los años 2009 a 2013, en milímetros

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
2009	85,8	73,5	81,6	67,8	79,7	75,9	80,6	85,0	81,4	86,2	90,2	91,0	978,6
2010	72,2	53,6	71,3	78,7	61,4	80,5	68,7	93,2	76,6	90,6	94,7	86,9	928,5
2011	81,1	68,0	66,9	68,7	54,6	76,7	77,4	82,7	86,1	78,7	103,0	78,5	922,3
2012	61,0	78,6	61,9	71,9	51,7	73,4	68,5	64,9	78,1	88,0	94,1	90,6	882,7
2013	77,8	61,8	71,0	61,8	72,2	69,3	74,6	76,4	73,0	79,8	82,3	83,9	883,7
Promedio	75,6	67,1	70,5	69,8	63,9	75,2	74,0	80,4	79,0	84,6	92,9	86,2	919,2
Mínimo	61,0	53,6	61,9	61,8	51,7	69,3	68,5	64,9	73,0	78,7	82,3	78,5	882,7
Máximo	85,8	78,6	81,6	78,7	79,7	80,5	80,6	93,2	86,1	90,6	103,0	91,0	978,6

2.2 Hidrología

La cuenca de la quebrada XXX nace a los 4300 m de altitud en la línea divisoria con la cuenca del río XXX, y se orienta hacia la dirección este. Hasta el límite inferior del área de influencia directa del proyecto, el curso principal de esta cuenca presenta un área de drenaje de 42 km^2 y una pendiente media de 33%.

La quebrada XXX tiene una longitud de 10,2 km y una pendiente longitudinal media de 4,1%. El factor de forma de la cuenca es de 0,24, y el coeficiente de compacidad es de 1,43; estos valores sugieren que la respuesta de la cuenca frente al escurrimiento es rápida.

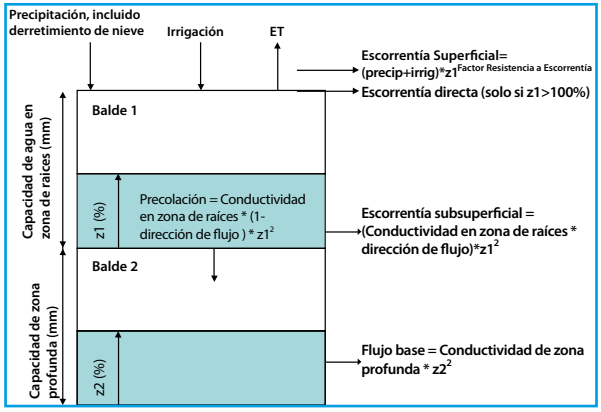
En el marco de la línea de base, se han hecho cuatro mediciones del caudal del cuerpo receptor en proximidad de la ubicación del vertimiento proyectado. Las mediciones fueron realizadas con una frecuencia trimestral y abarcaron todo el año hidrológico.

Tabla 49. Caudal del cuerpo receptor

FECHA	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013
HORA	10:30	11:00	09:30	12:30
CAUDAL	2230 L/s	910 L/s	520 L/s	1690 L/s

Con la finalidad de estudiar con mayor detalle las características hidrológicas de la microcuenca, se ha desarrollado un modelo de escorrentía y flujo, que permite simular el caudal histórico del cuerpo receptor en el punto de vertimiento proyectado. Asimismo, hace posible determinar el caudal mensual histórico mínimo y evaluar con mayor seguridad el impacto del vertimiento, no debiendo aplicar el factor de seguridad de 2, que resulta necesario cuando esta evaluación es realizada con base en una medición específica del caudal en época de estiaje solamente.

El modelo de escorrentía y flujo fue desarrollado con el software WEAP (Stockholm Environment Institute, 2012), que permite simular los componentes del balance hidrológico (evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base). La microcuenca de la quebrada XXX fue modelada como un único catchment de un área de 42 km^2.



El modelo de escorrentía y flujo está compuesto de tres partes desarrolladas para simular los tres componentes principales del flujo:

- Escorrentía superficial
- Escorrentía subsuperficial
- Flujo base

Los parámetros hidrológicos del modelo fueron determinados en la calibración del modelo mediante su variación iterativa, hasta que los caudales calculados tengan una correlación máxima con los caudales medidos en el año 2013. Luego de obtener un buen ajuste entre los caudales simulados y los observados de forma visual, se aplicaron dos índices estadísticos utilizados normalmente en la calibración de modelos hidrológicos, para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias) (Weglarczyk, 1988).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{O,i} - \overline{Q_O})^2}, \text{ y}$$

$$\text{Bias} = 100^* \left[(\overline{Q_S} - \overline{Q_O})/\overline{Q_O}\right]$$

Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ corresponden a caudales simulados y observados para cada paso de tiempo i, y n corresponde al número total de pasos de tiempo.

Tabla 50. Calibración del modelo hidrológico: caudales medios mensuales calculados y caudales medidos en el año 2013 en el punto de interés vertimiento proyectado, en m^3/s.

ORIGEN DATO	MAR.	JUN.	SEP.	DIC.	PROMEDIO
Calculado	2,03	0,83	0,44	1,42	1,18
Medido	2,23	0,91	0,52	1,69	1,34

Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe:	0,91
Sesgo (Bias):	-12%

Con un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,91 se puede constatar que el modelo simula los caudales con una buena correspondencia (entre más cerca de 1, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados). También el Bias de –0,12% indica una buena correspondencia (entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados). Dado que el Bias es negativo, el modelo subestima los caudales del cuerpo receptor, lo que dará un mayor grado de seguridad en la evaluación del impacto del vertimiento, resultando en una menor capacidad de dilución.

Los parámetros hidrológicos del modelo determinados en la etapa de calibración son los siguientes:

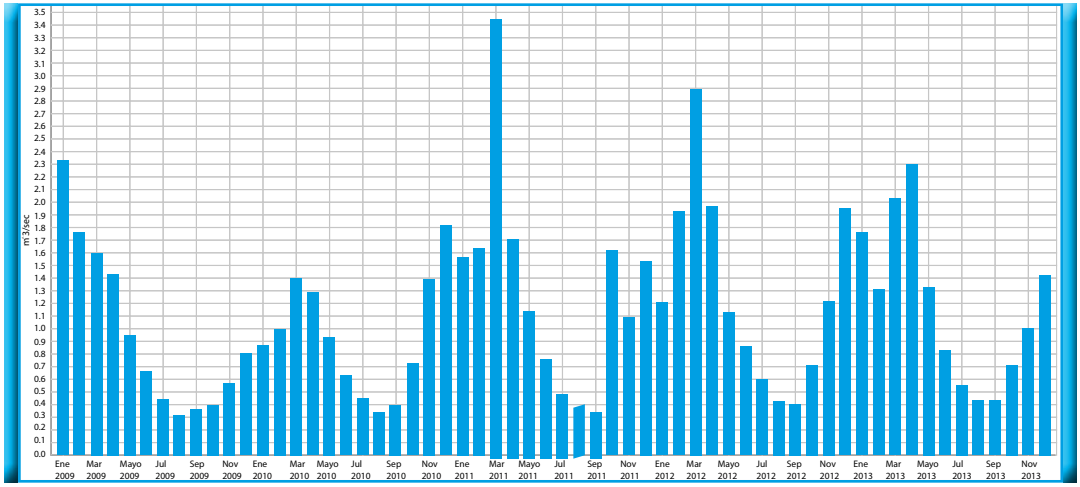
- Área de la cuenca = 42 km^2
- Coeficiente de cultivo: $K_c = 1$
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces: $S_w = 80$ mm
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda: $D_w = 400$ mm
- Factor de resistencia a la escorrentía: $R_{RF} = 4$
- Conductividad de zona de raíces: $K_s = 400$ mm/mes
- Conductividad de zona profunda: $K_d = 150$ mm/mes
- Dirección preferencial de flujo: $f = 0,33$

Una vez concluida la calibración, se calcularon los caudales mensuales medios para los cinco años antecedentes, aplicando los parámetros hidrológicos determinados y las variables meteorológicas indicadas en el acápite VI.5.2.1.

Tabla 51. Caudales medios mensuales en el punto de interés vertimiento proyectado calculados para el periodo 2009-2013, en metros cúbicos por segundo

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio
2009	2,33	1,76	1,59	1,44	0,95	0,66	0,44	0,32	0,36	0,40	0,58	0,81	0,97
2010	0,87	1,00	1,40	1,28	0,94	0,63	0,44	0,34	0,40	0,72	1,39	1,82	0,94
2011	1,56	1,64	3,48	1,74	1,17	0,78	0,51	0,40	0,37	1,62	1,09	1,54	1,32
2012	1,21	1,93	2,90	1,97	1,13	0,86	0,60	0,43	0,41	0,71	1,21	1,95	1,28
2013	1,76	1,31	2,03	2,30	1,34	0,83	0,56	0,44	0,44	0,72	1,00	1,42	1,18
Promedio	1,55	1,53	2,28	1,75	1,10	0,75	0,51	0,39	0,40	0,83	1,06	1,51	1,14
Mínimo	0,87	1,00	1,40	1,28	0,94	0,63	0,44	0,32	0,36	0,40	0,58	0,81	0,94
Máximo	2,33	1,93	3,48	2,30	1,34	0,86	0,60	0,44	0,44	1,62	1,39	1,95	1,32

Gráfico 55. Caudales medios mensuales en el punto de interés vertimiento proyectado calculados para el periodo 2009-2013, en metros cúbicos por segundo



Los caudales calculados demuestran el comportamiento hidrológico característico de los ríos de la región sierra, con una variación significante de los caudales mensuales, flujos máximos en los meses de diciembre hasta marzo, y mínimos entre julio y septiembre. El caudal mínimo fue determinado con 0,32 m^3/s para el mes agosto de 2009.

2.3 Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor

Las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor fueron determinadas en el marco de las investigaciones realizadas para establecer la línea base. En la tabla 52 se representan los principales parámetros hidráulicos y morfológicos del cuerpo receptor en la ubicación del vertimiento proyectado.

Tabla 52. Parámetros hidráulicos y morfológicos del cuerpo receptor

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS CAMPAÑA 1	RESULTADOS CAMPAÑA 2	RESULTADOS CAMPAÑA 3	RESULTADOS CAMPAÑA 4
Fecha	dd/mm/año	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013
Periodo hidrológico	---	Avenida	Transición	Estiaje	Transición
Caudal instantáneo	L/s	2230	910	520	1690
Velocidad de flujo media[1]	m	1,68	1,47	1,16	1,61
Ancho medio[2]	m	7,1	6,4	5,6	6,9
Profundidad media[2]	m	0,55	0,45	0,30	0,50
Factor de irregularidad	---	0,6 [3]	0,6 [3]	0,6 [3]	0,6 [3]
Pendiente del fondo cauce[4]	m/m	0,041	0,041	0,041	0,041

1 Velocidad de flujo medio de todas las mediciones realizadas con el correntómetro en la sección donde se determinó el caudal.
2 Valores medios del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento.
3 Cauce natural de serpentear moderado.
4 Pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento (m/m) determinada con medición con GPS de la altitud del fondo del cauce en dos puntos, el primero en la ubicación del vertimiento y el segundo aguas abajo y a una distancia de 500 m.

2.4 Calidad del agua superficial

Para determinar la calidad del cuerpo natural de agua receptor del vertimiento, se han tomado muestras de agua y se han analizado sus características químico-físicas en un laboratorio cuyos ensayos analíticos están acreditados ante INACAL.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua lótico, se realizaron cuatro tomas de muestra con una frecuencia trimestral en la ubicación del vertimiento proyectado. La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor fue efectuada en las mismas fechas en las cuales se determinaron los caudales y las características hidráulicas, en el marco del estudio de línea base.

Se analizaron los parámetros que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, que son aquellos definidos en el acápite VI.5.3.1.

Tabla 53. Concentraciones en el cuerpo natural de agua

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	RESULTADOS MUESTREO 4	ECA-AGUA CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES
Fecha de muestreo	dd/mm/año	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013	
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	11:00	09:30	12:30	
Caudal	L/s	2230	910	520	1690	
Periodo hidrológico		Avenida	Transición	Estiaje	Transición	
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	
pH	---	5,09	5,07	5,68	5,71	6,5-8,5
Temperatura (T)	°C	9,1	10,1	9,0	9,5	-----
Oxígeno disuelto (O_2)	mg O_2/L	6,62	6,30	6,34	6,59	>=4
Conductividad	μS/cm	169	290	263	199	2000
Aceites y grasas	mg/L	<1,7	<1,7	<1,7	<1,7	1,0
Cianuro WAD	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,1
Sulfatos	mg/L	103	136	175	122	300
Nitratos	mg/L	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	10
Aluminio	mg/L	3,220	4,015	4,850	3,790	5
Arsénico	mg/L	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	0
Bario	mg/L	0,037	0,026	0,032	0,030	0,7
Berilio	mg/L	<0,0003	<0,0006	<0,0003	<0,0003	0,1
Boro	mg/L	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	5
Cadmio	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,01
Calcio	mg/L	19,51	23,44	28,08	23,78	200
Cobalto	mg/L	0,0035	0,0049	0,0048	0,0038	0,05
Cobre	mg/L	0,008	0,007	0,009	0,010	0,2
Cromo hexavalente	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,1
Hierro	mg/L	1,159	1,891	1,802	1,256	1
Litio	mg/L	<0,0027	0,0014	<0,0027	<0,0027	2,5
Magnesio	mg/L	0,569	0,428	0,565	0,577	150
Manganeso	mg/L	0,033	0,041	0,044	0,030	0,2

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	RESULTADOS MUESTREO 4	ECA-AGUA CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES
Fecha de muestreo	dd/mm/año	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013	
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	11:00	09:30	12:30	
Caudal	L/s	2230	910	520	1690	
Periodo hidrológico		Avenida	Transición	Estiaje	Transición	
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	
Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001
Níquel	mg/L	<0,003	0,0032	<0,003	<0,003	0,2
Plata	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,05
Plomo	mg/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,05
Selenio	mg/L	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	0,05
Sodio	mg/L	1,56	1,27	1,57	1,71	200
Zinc	mg/L	0,004	0,043	0,051	0,018	2

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que la mayoría de los parámetros evaluados cumple con los ECA-Agua de la categoría 3. Solamente los parámetros pH y hierro total exceden el ECA-Agua en todas las muestras analizadas. Esto se debe a las características geológicas del área de influencia directa del proyecto, marcadas por la intensa mineralización de la zona, la cual presenta mantos sulfurosos que, en contacto con las aguas subterráneas, producen la reducción del pH. Las aguas ácidas afloran y fluyen por la quebrada XXX que de forma natural tiene características especiales, derivadas de la influencia geológica. Debido a las condiciones ácidas de las aguas naturales, el hierro contenido en los suelos de la cuenca se disuelve, generando concentraciones elevadas.

3. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

3.1 Determinación de la lista de parámetros a evaluarse

En conformidad con la tabla 2, acápite I. los parámetros por evaluarse para el caso de aguas residuales de origen minero metalúrgico vertidas a un cuerpo de agua de categoría ECA-Agua 3 son los siguientes:

- Aceites y grasas
- Cianuro WAD
- Sulfatos
- Cromo hexavalente
- Metales considerados en la categoría ECA-Agua 3 y determinados con ICP: aluminio, arsénico, bario,

berilio, boro, cadmio, calcio, cobalto, cobre, hierro, litio, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, sodio, zinc.

No será necesario evaluar parámetros adicionales, ya que en los procesos minero-metalúrgicos no se utilizan insumos químicos que contengan sustancias reglamentados en el D.S. Nº 004-2017-MINAM (véanse las hojas de seguridad de los insumos químicos usados, anexados al EIA). Tampoco se deberá evaluar los nitratos, ya que la quebrada XXX no tributa a un cuerpo de agua léntico.

3.2 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento para un proyecto minero futuro, las concentraciones máximas son supuestos iguales que los Límites Máximos Permisibles.

Para los parámetros no considerados en los LMP, a continuación se proyectan sus concentraciones en el efluente:

- Cianuro WAD: se supone que la concentración de cianuro WAD corresponde al LMP de cianuro total. Esta suposición es conservadora, dado que el cianuro WAD es una fracción del cianuro total, y las concentraciones reales de cianuro WAD en el efluente serán siempre inferiores a 1 mg/L.
- Sulfatos: las características geológicas del área de influencia directa del proyecto son marcadas por la intensa mineralización de la zona, la cual presenta mantos sulfurosos que, en contacto con el agua, producen la disolución los sulfuros, la formación de ácidos sulfúricos y sales de sulfatos y la reducción del pH. Los test estáticos ABA, realizados sobre las muestras de los minerales, demostraron un alto potencial de generación ácida. Por lo expuesto, se debe presumir que las aguas residuales por tratarse serán ácidas y contendrán concentraciones de sulfuros y sulfatos relativamente altas; sin embargo, no es posible determinar a priori estas concentraciones. Por lo tanto, la concentración máxima de sulfatos en el efluente se calculará mediante balance de masas, lo que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua.
- Metales: los metales no considerados en los LMP (aluminio, bario, berilio, boro, calcio, cobalto, hierro, litio, magnesio, manganeso, níquel, plata, selenio, sodio) pueden originar los minerales que serán explotados, a través de su lixiviación en los desmontes o su solución en los procesos de concentración del mineral. Los test dinámicos (SPLP) de lixiviación, realizados sobre las muestras de los minerales que serán procesados, demostraron que los efluentes posiblemente contendrán Hg, As, Cd, Cu, Pb (considerados en los LMP) y Al, Fe y Mn en concentraciones significativas. No obstante, no es posible determinar a priori las concentraciones de estos metales en las aguas residuales. Por lo tanto, se calcularán sus concentraciones máximas mediante balance de masas en el efluente, que permitirán el cumplimiento de los ECA-Agua.

Tabla 54. Concentraciones máximas del efluente

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE EN CUALQUIER MOMENTO (DS N.º 010-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE TRATADO
Aceites y grasas	mg/L	20	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50	50
Cianuro total	mg/L	1,00	1,00
Cianuro WAD	mg/L	---	1,00
Sulfatos	mg/L	---	B.M.
Aluminio	mg/L	---	B.M.
Arsénico	mg/L	0,10	0,10
Bario	mg/L	---	B.M.
Berilio	mg/L	---	B.M.
Boro	mg/L	---	B.M.
Cadmio	mg/L	0,05	0,05
Calcio	mg/L	---	B.M.
Cobalto	mg/L	---	B.M.
Cobre	mg/L	0,50	0,50
Cromo hexavalente	mg/L	0,10	0,10
Hierro	mg/L	---	B.M.
Hierro disuelto	mg/L	2,00	2,00
Litio	mg/L	---	B.M.
Magnesio	mg/L	---	B.M.
Manganeso	mg/L	---	B.M.
Mercurio	mg/L	---	B.M.
Níquel	mg/L	---	B.M.
Plata	mg/L	---	B.M.
Plomo	mg/L	0,20	0,20
Selenio	mg/L	---	B.M.
Sodio	mg/L	---	B.M.
Zinc	mg/L	1,50	1,50

B.M.: la concentración máxima en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua será determinada mediante balance de masas.

3.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas

Todas las aguas residuales del proyecto serán recolectadas mediante sistemas de drenaje superficial y subsuperficial, y dirigidas al depósito de relaves. Dentro de este se tendrá una piscina de sobrenadantes que será el resultado de la acumulación de flujos de aguas provenientes de filtraciones, escorrentías y precipitaciones. Desde la piscina de agua sobrenadante serán bombeadas a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

Las aguas residuales del proyecto provienen de las siguientes instalaciones:

- Agua subterránea del tajo: la caracterización geoquímica de los minerales de la zona indica que las paredes del tajo tendrán potencial de generar drenaje ácido. Por lo tanto, el agua del tajo será tratada. El modelo hidrogeológico determinó que el aporte de agua subterránea hacia el tajo será de 8,5 y se incrementará hasta 10,3 L/s en función de la profundidad del tajo.
- Agua de lluvia captada en el tajo: las precipitaciones que caen sobre el área del tajo serán recolectadas en el lago del tajo y bombeadas al depósito de relaves.
- Agua de contacto proveniente del depósito de desmontes: dado que los desmontes tienen potencial de generación de drenaje ácido, el agua de contacto será recolectada a través de un sistema de drenaje superficial y subsuperficial y tratada antes de su descarga a la quebrada XXX.
- Agua de contacto proveniente del almacén temporal del mineral, del área de la planta concentradora y de las vías de tránsito interno: dado que las aguas de precipitación que caen sobre estas áreas estarán potencialmente contaminadas, se prevé su captación y tratamiento.
- Agua contenida en los relaves: los relaves contienen 35-40% de agua. Considerando que la planta concentradora procesará 9000 ton/d, se calcula una flujo de relaves de 94,5 kg/s que contiene 33-38 L/s de agua residual.

En la tabla 55 se representa el balance de agua residual mensualizado de las operaciones mineras. Los datos de las precipitaciones y de la evaporación usados corresponden al mes cuando el caudal del cuerpo receptor era mínimo (condiciones más críticas en materia de capacidad de asimilación del cuerpo receptor). De forma conservadora, se supone que 100% de las precipitaciones serán recolectadas, omitiendo eventuales pérdidas por evaporación o infiltración, a excepción de la evaporación del depósito de relaves.

Tabla 55. Balance de agua residual mensualizado

PARÁMETRO	UNIDAD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	PROMEDIO
Año evaluado	Año	2010	2010	2010	2010	2010	2010	2009	2009	2009	2009	2009	2009	
Precipitaciones en el mes y año evaluados	mm	108,8	96,0	179,3	120,9	59,4	10,7	0,0	0,0	61,3	57,8	103,2	133,8	77,6
Evaporación potencial en el mes y año evaluados	mm	72,2	53,6	71,3	78,7	61,4	80,5	80,6	85,0	81,4	86,2	90,2	91,0	77,7
Agua subterránea del tajo	L/s	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Área máxima del tajo	ha	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de lluvia captada en el tajo	L/s	26,4	25,8	43,5	30,3	14,4	2,7	0,0	0,0	15,4	14,0	25,9	32,5	19,2
Área máxima depósito de desmontes	ha	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con desmontes	L/s	34,1	33,3	56,2	39,2	18,6	3,5	0,0	0,0	19,9	18,1	33,4	42,0	24,9
Superficie máxima de almacén de mineral, planta concentradora y vías internas	ha	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con almacén y otras áreas	L/s	1,7	1,7	2,9	2,0	1,0	0,2	0,0	0,0	1,0	0,9	1,7	2,1	1,3
Agua contenida en los relaves	L/s	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Superficie máxima del depósito de relaves	ha	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
Caudal de agua evaporada	L/s	-9,4	-7,8	-9,3	-10,6	-8,0	-10,9	-10,5	-11,1	-11,0	-11,3	-12,2	-11,9	-10,3
Caudal máximo de aguas residuales	L/s	101	101	142	109	74	44	38	37	74	70	97	113	83

3.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento físicos (clarificador y filtro de arena) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

4. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento, se aplica el método simplificado desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.

Dado que el vertimiento será realizado en la orilla del curso de agua, la longitud de la zona de mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \, u}{2 \, \pi \, Dy}$$

Donde:

D_y : Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, que se calcula con:

$$D_y = c \times d \times u^*$$

u^* : Velocidad de corte en m/s, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \times d \times s)}$$

W_{min} : Ancho medio del cuerpo de agua, en m.

u : Velocidad de flujo media del río en la ubicación del vertimiento, en m/s.

c : Factor de irregularidad del cauce.

d : Profundidad media del río aguas abajo del vertimiento, en m.

g : Aceleración por gravedad = 9,80665 m/s^2.

s : Pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento (m/m).

Dado que se determinaron las características del cuerpo receptor en las diferentes épocas del año, se puede calcular la longitud de la zona de mezcla variable en el año.

Tabla 56. Determinación de la longitud de la zona de mezcla variable en el año

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS CAMPAÑA 1	RESULTADOS CAMPAÑA 2	RESULTADOS CAMPAÑA 3	RESULTADOS CAMPAÑA 4
Fecha	dd/mm/año	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013
Periodo hidrológico	---	Avenida	Transición	Estiaje	Transición
Caudal instantáneo	L/s	2230	910	520	1690
Velocidad de flujo media	m	1,38	1,05	0,87	1,27

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS CAMPAÑA 1	RESULTADOS CAMPAÑA 2	RESULTADOS CAMPAÑA 3	RESULTADOS CAMPAÑA 4
Ancho medio	m	5,3	4,4	4,0	5,0
Profundidad media	m	0,35	0,20	0,15	0,30
Factor de irregularidad	---	0,6	0,6	0,6	0,6
Pendiente del fondo cauce	m/m	0,041	0,041	0,041	0,041
Velocidad de corte	m/s	0,38	0,28	0,25	0,35
Coeficiente de dispersión lateral	m^2/s	0,08	0,03	0,02	0,06
Longitud de la zona de mezcla	m	79	96	101	81

La estimación de la longitud de la zona de mezcla indicó que esta no supera los 101 m, y que muestra la extensión máxima en la época de estiaje.

4.1 Restricciones de la zona de mezcla

No es necesario restringir, es decir, limitar la extensión máxima de la zona de mezcla, dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- No existen usos primarios, poblacionales, agrícolas, industriales u otros de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla (igual a 202 m).
- No existe un cuerpo de agua léntico natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (101 m).
- No existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (101 m).
- La longitud de la zona de mezcla no es mayor de 500 m.

5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

El caudal crítico de dilución ha sido determinado para las condiciones más severas, que corresponden a los caudales mensuales mínimos de toda la serie histórica de datos.

Asimismo, se considera la toma de agua proyectada que será realizada aguas arriba del vertimiento y reducirá el caudal disponible para la dilución. Para determinar el caudal crítico disponible para la dilución se restó los 40 L/s de los caudales mensuales mínimos del periodo 2009-2013.

Tabla 57. Caudales críticos disponibles para la dilución en m^3/s

VARIABLE	UNIDAD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Caudal natural mínimo en el periodo 2009-2013	m^3/s	0,87	1,00	1,40	1,28	0,94	0,63	0,44	0,32	0,36	0,40	0,58	0,81
Correspondiente al año	año	2010	2010	2010	2010	2010	2010	2009	2009	2009	2009	2009	2009
Caudal derivado por el proyecto aguas arriba del vertimiento	m^3/s	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caudal crítico disponible para la dilución	m^3/s	0,83	0,96	1,36	1,24	0,90	0,59	0,40	0,28	0,32	0,36	0,54	0,77

Estos caudales críticos no deben ser reducidos, dado que no es necesario restringir la extensión de la zona de mezcla, como se ha demostrado en el acápite VI.5.4.1.

6. BALANCE DE MASA

A continuación se calculan las concentraciones de los parámetros aguas abajo de la zona de mezcla mediante el balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

El cumplimiento de los ECA-Agua se evalúa con:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0 : Concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{RH} : Concentración en el cuerpo receptor, indicada en el acápite VI.5.2.4. Para la evaluación mensualizada se han considerado los resultados de monitoreo de fecha 13/6/2013 representativos para el periodo hidrológico de transición (mayo y junio), y aquellos de fecha 6/12/2013 para los meses de noviembre y diciembre; los resultados de fecha 16/9/2013 representativos para el periodo de estiaje (julio, agosto, septiembre y octubre) y los resultados del 6/3/2013 representativos para el periodo de avenida (enero, febrero, marzo y abril).

C_{vert} : Concentración máxima en las aguas residuales tratadas, indicada en el acápite VI.5.3.2.

$Q_{RH,crit}$: Caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicada en el acápite VI.5.5.

Q_{vert} : Caudal máximo del vertimiento, determinado según el acápite VI.5.3.3.

C_{ECA} : ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

Tabla 58. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla en la época de estiaje (julio, agosto, septiembre y octubre)

PARÁMETRO	UNIDAD	CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS	CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ARRIBA DEL VERTIMIENTO				CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ABAJO DEL VERTIMIENTO				ECA-AGUA	EVALUACIÓN
			JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.		
Caudal del vertimiento	L/s		38	37	74	70						
Caudal del cuerpo receptor	L/s		441	322	363	397	479	359	437	467	-----	-----
Aceites y grasas	mg/L	20	0	0	0	0	1,6	2,1	3,4	3,0	1	Excede ECA-Agua
Cianuro WAD	mg/L	1	0	0	0	0	0,08	0,10	0,17	0,15	0,1	Excede ECA-Agua
Arsénico	mg/L	0,1	0	0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	Cumple ECA-Agua
Cadmio	mg/L	0,05	0	0	0	0	0,004	0,005	0,008	0,008	0,005	Excede ECA-Agua
Cobre	mg/L	0,5	0,009	0,009	0,009	0,009	0,05	0,06	0,09	0,08	0,2	Cumple ECA-Agua
Cromo hexa-valente	mg/L	0,1	0	0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1	Cumple ECA-Agua
Mercurio	mg/L	0,002	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	Cumple ECA-Agua
Plomo	mg/L	0,2	0	0	0	0	0,016	0,021	0,034	0,030	0,05	Cumple ECA-Agua
Zinc	mg/L	1,5	0,051	0,051	0,051	0,051	0,2	0,2	0,3	0,3	2	Cumple ECA-Agua

Tabla 59. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla en las épocas de transición (mayo-junio y noviembre-diciembre)

PARÁMETRO	UNIDAD	CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS	CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ARRIBA DEL VERTIMIENTO				CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ABAJO DEL VERTIMIENTO				ECA-AGUA	EVALUACIÓN
			MAY.	JUN.	NOV.	DIC.	MAY.	JUN.	NOV.	DIC.		
Caudal del vertimiento	L/s		74	44	97	113						
Caudal del cuerpo receptor	L/s		935	632	575	807	1009	676	672	920	-----	-----
Aceites y grasas	mg/L	20	0	0	0	0	1,5	1,3	2,9	2,5	1	Excede ECA-Agua
Cianuro WAD	mg/L	1	0	0	0	0	0,07	0,06	0,14	0,12	0,1	Excede ECA-Agua
Arsénico	mg/L	0,1	0,004	0,004	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	Cumple ECA-Agua
Cadmio	mg/L	0,05	0	0	0	0	0,004	0,003	0,007	0,006	0,005	Excede ECA-Agua
Cobre	mg/L	0,5	0,007	0,007	0,010	0,010	0,04	0,04	0,08	0,07	0,2	Cumple ECA-Agua
Cromo hexavalente	mg/L	0,1	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	Cumple ECA-Agua
Mercurio	mg/L	0,002	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	Cumple ECA-Agua
Plomo	mg/L	0,2	0	0	0	0	0,015	0,013	0,029	0,025	0,05	Cumple ECA-Agua
Zinc	mg/L	1,5	0,043	0,043	0,018	0,018	0,2	0,1	0,2	0,2	2	Cumple ECA-Agua

Tabla 60. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla en la época de avenida (julio, agosto, septiembre y octubre)

PARÁMETRO	UNIDAD	CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS	CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ARRIBA DEL VERTIMIENTO				CUERPO RECEPTOR DE AGUAS ABAJO DEL VERTIMIENTO				ECA-AGUA	EVALUACIÓN
			ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.		
Caudal del vertimiento	L/s		101	101	142	109						
Caudal del cuerpo receptor	L/s		866	1000	1401	1283	967	1101	1543	1392	-----	-----
Aceites y grasas	mg/L	20	0	0	0	0	2,1	1,8	1,8	1,6	1	Excede ECA-Agua
Cianuro WAD	mg/L	1	0	0	0	0	0,10	0,09	0,09	0,08	0,1	Excede ECA-Agua
Arsénico	mg/L	0,1	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	Cumple ECA-Agua
Cadmio	mg/L	0,05	0	0	0	0	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	Excede ECA-Agua
Cobre	mg/L	0,5	0,008	0,008	0,008	0,008	0,06	0,05	0,05	0,05	0,2	Cumple ECA-Agua
Cromo hexavalente	mg/L	0,1	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	Cumple ECA-Agua
Mercurio	mg/L	0,002	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	Cumple ECA-Agua
Plomo	mg/L	0,2	0	0	0	0	0,021	0,018	0,018	0,016	0,05	Cumple ECA-Agua
Zinc	mg/L	1,5	0,004	0,004	0,004	0,004	0,2	0,1	0,1	0,1	2	Cumple ECA-Agua

El balance de masa demuestra que la mayoría de los parámetros cumplirán con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla. Sin embargo, se evidencia un riesgo de incumplimiento del parámetro aceites y grasas en todo el año, y de los parámetros cadmio y cianuro WAD en los meses de enero, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Para los parámetros que no son reglamentados con un Límite Máximo Permisible, se calculan las concentraciones máximas admisibles que permiten cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor mediante el balance de masas y la condición de cumplimiento del ECA-Agua:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

Tabla 61. Concentraciones máximas admisibles en el efluente de los parámetros no reglamentados con un Límite Máximo Permisible que permiten cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor

PARÁMETRO	UNIDAD	ECA-AGUA	CALIDAD DEL CUERPO RECEPTOR											
			ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Caudal	L/s	-----	826	960	1361	1243	895	592	401	282	323	357	535	767
Sulfatos	mg/L	300	103	103	103	103	136	136	175	175	175	175	122	122
Aluminio	mg/L	5	3,22	3,22	3,22	3,22	4,02	4,02	4,85	4,85	4,85	4,85	3,79	3,79
Bario	mg/L	0,7	0,037	0,037	0,037	0,037	0,026	0,026	0,032	0,032	0,032	0,032	0,030	0,030
Berilio	mg/L	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boro	mg/L	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcio	mg/L	200	19,51	19,51	19,51	19,51	23,44	23,44	28,08	28,08	28,08	28,08	23,78	23,78
Cobalto	mg/L	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Litio	mg/L	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Magnesio	mg/L	150	0,569	0,569	0,569	0,569	0,428	0,428	0,565	0,565	0,565	0,565	0,577	0,577
Manganeso	mg/L	0,2	0,033	0,033	0,033	0,033	0,041	0,041	0,044	0,044	0,044	0,044	0,030	0,030
Níquel	mg/L	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plata	mg/L	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Selenio	mg/L	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sodio	mg/L	200	1,560	1,560	1,560	1,560	1,269	1,269	1,570	1,570	1,570	1,570	1,710	1,710

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE PARA EL CUMPLIMIENTO DEL ECA-AGUA											
		ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Caudal	L/s	101	101	142	109	74	44	38	37	74	70	97	113
Sulfatos	mg/L	1909	2166	2193	2543	2276	2519	1627	1248	849	936	1280	1508
Aluminio	mg/L	20	22	22	25	17	18	7	6	6	6	12	13
Bario	mg/L	6	7	7	8	9	10	8	6	4	4	4	5
Berilio	mg/L	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,2	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8
Boro	mg/L	46	52	53	62	65	73	58	43	27	30	33	39
Calcio	mg/L	1674	1909	1935	2255	2327	2589	2025	1503	955	1075	1170	1396
Cobalto	mg/L	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4
Litio	mg/L	23	26	27	31	33	36	29	21	13	15	16	19
Magnesio	mg/L	1370	1565	1586	1851	1952	2174	1737	1283	806	911	973	1164
Manganeso	mg/L	1,6	1,8	1,8	2,1	2,1	2,4	1,9	1,4	0,9	1,0	1,1	1,4
Níquel	mg/L	1,8	2,1	2,1	2,5	2,6	2,9	2,3	1,7	1,1	1,2	1,3	1,6
Plata	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4
Selenio	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4
Sodio	mg/L	1821	2079	2107	2459	2595	2889	2307	1704	1071	1210	1292	1546

Los resultados de las concentraciones máximas admisibles que permiten cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor para los parámetros que no son reglamentados con un Límite Máximo Permisible, demostraron que posiblemente ninguno de los parámetros evaluados supere las concentraciones que se puede lograr con un sistema de tratamiento convencional de aguas residuales mineras. Sin embargo, la concentración máxima admisible de los sulfatos en los meses de septiembre y octubre debería ser menor que 849 y 939 mg/L, lo que podría constituir un problema con el tratamiento convencional que puede lograr una calidad del efluente de aproximadamente 1200 mg/L de sulfatos.

La concentración en el efluente de hierro total, que ya excede el ECA-Agua en el cuerpo receptor, no debería ser mayor que la concentración en el cuerpo receptor, así que el vertimiento no causará un incremento de la concentración en el cuerpo natural de agua y no creará un impacto adicional en el cuerpo natural de agua: $C_{vert,Fe} \leq C_{RH,Fe}$

Tabla 62. Concentraciones máximas admisibles en el efluente de hierro total

PARÁMETRO	UNIDAD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Concentración de hierro en el cuerpo receptor	mg/L	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26
Concentración máxima admisible de hierro en el efluente	mg/L	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26

7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, cadmio y cianuro WAD. Asimismo, se evidenció que la concentración de hierro total en el efluente debería ser reducida a valores inferiores al Límite Máximo Permisible del hierro disuelto.

Por lo tanto, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables, que se describen a continuación.

Reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos

Para determinar las concentraciones máximas en el efluente de los parámetros críticos, que permiten el cumplimiento de los ECA-Agua, se ha aplicado el balance de masas:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

Para el hierro, que ya incumple el ECA-Agua en el cuerpo receptor, se aplicó la condición de que su concentración en el efluente no deberá ser mayor que la concentración en el cuerpo receptor:

$$C_{vert,Fe} \leq C_{RH,Fe}$$

Tabla 63. Concentraciones máximas admisibles en el efluente de los parámetros aceites y grasas, cadmio, cianuro WAD, sulfatos y hierro total

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE PARA EL CUMPLIMIENTO DEL ECA-AGUA												MIN
			ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	
Caudal	L/s	---	101	101	142	109	74	44	38	37	74	70	97	113	37
Sulfatos	mg/L	---	1909	2166	2193	2543	2276	2519	1627	1248	849	936	1280	1508	**849**
Hierro	mg/L	---	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26	**1,16**
Aceites y grasas	mg/L	20,0	9,2	10,5	10,6	12,4	13,0	14,5	11,6	8,6	5,4	6,1	6,5	7,8	**5,4**
Cianuro WAD	mg/L	1,0	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,2	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	**0,5**
Cadmio	mg/L	0,05	0,046	0,052	0,053	0,062	0,065	0,073	0,058	0,043	0,027	0,030	0,033	0,039	**0,027**

El análisis de las concentraciones máximas admisibles en el efluente para cumplir los ECA-Agua demuestra lo siguiente:

- La concentración máxima admisible de los sulfatos en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre debería ser menor de 1248, 849, 936 y 1280 mg/L, lo que constituye un problema con tratamiento convencional, que por lo general logra una calidad del efluente de 1500 mg/L de sulfatos. Por lo tanto, se debería prever un sistema de tratamiento más eficiente en la eliminación de sulfatos, como procesos químico-físicos avanzados (por ejemplo, la adición de sales solubles o semisolubles de bario, sistemas de filtración por membranas, sistemas de intercambio iónico o sistemas biológicos).
- La concentración máxima admisible de hierro debería ser menor de 1,16 mg/L, lo que no debería constituir un problema para el sistema de tratamiento convencional propuesto.
- La concentración máxima admisible de aceites y grasas debería ser menor de 5,4 mg/L. Dado que en ninguna parte del proceso productivo se utilizan aceites o grasas que podrían entrar en contacto con las aguas residuales, no habrá mayores problemas para cumplir esta concentración máxima, y no se deberá prever sistemas de tratamiento específicos.
- La concentración máxima admisible de cianuro WAD de 0,5 mg/L podría constituir un problema con el tratamiento convencional. Por lo tanto, se debería prever una etapa de tratamiento adicional, en la cual

se oxida el cianuro WAD mediante la dosificación de un fuerte oxidante como, por ejemplo, peróxido de hidrógeno.

- La concentración máxima admisible de cadmio de 0,027 mg/L podría constituir un problema con el tratamiento convencional, dependiendo de su concentración en las aguas residuales crudas.

Reducción del caudal de vertimiento mediante reúso parcial de las aguas residuales tratadas

A seguir se evalúa la alternativa de un reúso parcial de las aguas residuales tratadas, considerando que en los meses críticos para el cumplimiento de los ECA-Agua se utilice el agua residual tratada en la planta concentradora de mineral, sustituyendo el agua natural.

Esta medida también incrementaría el agua natural disponible para la dilución, dado que en los meses críticos no será necesario tomar agua natural del cuerpo receptor.

En la tabla 64 se evalúan las concentraciones de los parámetros críticos aguas abajo del vertimiento en los meses críticos.

Tabla 64. Concentraciones de los parámetros críticos aguas abajo del vertimiento en los meses críticos con reúso parcial de las aguas residuales en la planta concentradora

PARÁMETRO		UNIDAD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ECA
Aguas residuales	Caudal total	L/s	101	101	142	109	74	44	38	37	74	70	97	113	
	Caudal reúso	L/s	40	0	0	0	0	0	0	37	40	40	40	40	
	Caudal menos reúso	L/s	61	101	142	109	74	44	38	0	34	30	57	73	
	Aceites y grasas	mg/L	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
	Cianuro WAD	mg/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Cadmio	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	Hierro	mg/L	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26	
	Sulfatos	mg/L	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	

PARÁMETRO		UNIDAD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ECA
Cuerpo receptor aguas arriba del vertimiento	Caudal natural	L/s	866	1000	1401	1283	935	632	441	322	363	397	575	807	
	Toma de agua para uso	L/s	0	40	40	40	40	40	40	3	0	0	0	0	
	Caudal natural menos uso	L/s	866	960	1361	1243	895	592	401	319	363	397	575	807	
	Aceites y grasas	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Cianuro WAD	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	Cadmio	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
	Hierro	mg/L	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26	1
	Sulfatos	mg/L	103	103	103	103	136	136	175	175	175	175	122	122	300
Cuerpo receptor aguas abajo	Aceites y grasas	mg/L	0,7	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,0	0,8	0,7	0,9	0,8	1
	Cianuro WAD	mg/L	0,07	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,00	0,08	0,07	0,09	0,08	0,1
	Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,000	0,004	0,004	0,005	0,004	0,01
	Hierro	mg/L	1,16	1,16	1,16	1,16	1,89	1,89	1,80	1,80	1,80	1,80	1,26	1,26	1
	Sulfatos	mg/L	195	236	235	216	241	230	289	176	287	268	247	236	300

Del análisis anterior de las concentraciones de los parámetros críticos aguas abajo del vertimiento se puede concluir lo siguiente:

- El reúso de las aguas residuales tratadas en las operaciones de la planta concentradora con un caudal de 40 L/s en los meses de enero, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, elimina el riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua aguas abajo del vertimiento.
- Las concentraciones de aceites y grasas en el cuerpo receptor serán menores que el ECA-Agua correspondiente, si las aguas residuales no contienen

este parámetro en concentraciones mayores de 10 mg/L. Dado que en ninguna parte del proceso productivo se utilizan aceites o grasas que podrían entrar en contacto con las aguas residuales, se puede suponer que no habrá mayores problemas para cumplir esta concentración máxima y no se deberá prever sistemas de tratamiento específicos.

- Las concentraciones de cianuro WAD en el cuerpo receptor serán menores del ECA-Agua correspondiente, siempre y cuando las concentraciones en el efluente no superen 1 mg/L. Dado que la concentración de cianuro total no supera 1 mg/L (LMP en cualquier momento), no existirá un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua.

- Las concentraciones de cadmio en el cuerpo receptor serán menores que el ECA-Agua correspondiente, siempre y cuando las concentraciones en el efluente no superen el LMP de 0,05 mg/L.

- Las concentraciones de hierro en el cuerpo receptor ya superan el ECA-Agua correspondiente aguas arriba del vertimiento. Sin embargo, si las concentraciones en el efluente serán iguales a la calidad del cuerpo receptor, el vertimiento no causará un incremento adicional de las concentraciones aguas abajo y no ocasionará un impacto adicional en la calidad del agua.

- Las concentraciones de sulfatos en el cuerpo receptor serán menores que el ECA-Agua, siempre y cuando su concentración en el efluente no supere los 1500 mg/L, valor alcanzable con el sistema de tratamiento convencional propuesto.

Anteriormente, se han evaluado dos alternativas técnicamente viables, que permitirán cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor. La decisión final sobre la que será implementada depende de los costos de construcción y operación de los sistemas necesarios.

En este caso específico, el análisis de los costos de las dos alternativas ha evidenciado una clara ventaja del reúso parcial del efluente tratado en la planta concentradora. Por lo tanto, se implementará esta alternativa para poder cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor.

8. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL

A continuación se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 65. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida del dispositivo de descarga	Caudal, pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas (MEH), cianuro total, hierro disuelto, cromo hexavalente, metales[1], sulfatos	Semanal[2]: pH,SST Quincenal[2]: CN Mensual[2]: A y g, Metales semestral 3:SO_4	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 66. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
	NOMBRE	CAT. ECA				ZONA	NORTE	ESTE
RH-1	Quebrada XXXXX	3	20 m aguas arriba del vertimiento	pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, aceites y grasas (MEH), cianuro WAD, sulfatos, cromo hexavalente, metales[1].	Semestral [3]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-2	Quebrada XXXXX	3	110 m aguas abajo del vertimiento en la misma orilla donde se realiza el vertimiento		Semestral [3]	XX	XXXXXXX	XXXXXX

1 Metales considerados en la categoría ECA-Agua 3 y determinados con ICP: aluminio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, calcio, cobalto, cobre, hierro, litio, magnesio, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, sodio, zinc.

2 La frecuencia de control del efluente ha sido establecida en conformidad con el D.S. Nº 010-2010-MINAM, que dispone que, hasta la entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos, se deberá aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en el artículo 7° de la R.M. Nº 011-96-EM/VMM publicada por el Ministerio de Energía y Minas, que establece la frecuencia en función del volumen diario de aguas residuales vertidas por día: $V_{diario,\ medio}$ = Caudal medio x 3600 segundos x 24 horas / 1000 L/m^3 = 64 x 3600 x 24 / 1000 = 5 530 m^3. Valor que está en el rango > 300 m^3/día y resulta en una frecuencia semanal para pH y SST, quincenal para CN y mensual para aceites y grasas y los metales.

3 La frecuencia de control en el cuerpo receptor ha sido establecida en conformidad con los Lineamientos para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas, prepublicado por la Autoridad Nacional del Agua, que establece la frecuencia en función del volumen anual de aguas residuales vertidas: V_{anual} = Caudal medio x 3600 segundos x 24 horas x 365 días / 1000 L/m^3 = 64 x 3600 x 24 x 365 / 1000 = 2 018 304 m^3,valor que está en el rango de 300 000 – 3 000 000 m^3 y resulta en una frecuencia semestral.

La toma de muestra del efluente y en el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales en las Actividades Minero-Metalúrgicas, publicado por el Ministerio de Energía y Minas, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

Además, considerando que la eficiencia del sistema de tratamiento depende altamente de la regulación del pH, se prevé la instalación de un sistema de monitoreo automático del pH y de la turbiedad. Este sistema abarca los siguientes elementos:

- Sensores de pH instalados en las entradas de los tres clarificadores y en la salida de la PTAR antes de la descarga al cuerpo receptor.
- Sensor de la turbiedad instalado en la salida de la PTAR antes de la descarga al cuerpo receptor.
- Panel de control, que permite:
  - Registro y representación de los datos medidos.
  - Control y optimización automática de la dosificación de los reactivos (lechada de cal y ácido sulfúrico) en función de los valores de pH registrados.
  - Desactivación automática del bombeo de aguas residuales crudas desde el depósito de relaves, cuando el pH o la turbiedad superen el rango de tratamiento óptimo, lo que indica una falla del sistema o el agotamiento de los reactivos.

El sistema de monitoreo automático, además de garantizar la eficiencia del tratamiento y el cumplimiento de las normas ambientales, permitirá reducir los costos de tratamiento mediante la optimización de la dosificación de los reactivos.

9. CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, sulfatos, cianuro WAD y cadmio, lo que obliga a la reducción de la carga contaminante vertida mediante el tratamiento de las aguas residuales más eficiente o la reducción del volumen de aguas residuales a través de la recirculación parcial.
- El análisis técnico económico indicó que una mayor eficiencia de tratamiento obligaría a la modificación de sistema de tratamiento inicialmente propuesto, lo que resultaría en un incremento significativo de los costos de construcción y de operación. Por lo tanto, se descartó esta posibilidad y se prevé el reúso

parcial de las aguas residuales tratadas en los meses críticos en la planta concentradora de mineral.

- El reúso de las aguas residuales tratadas en las operaciones de la planta concentradora con un caudal de 40 L/s en los meses de enero, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, elimina el riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua aguas abajo del vertimiento para los parámetros cianuro WAD y cadmio, siempre y cuando las concentraciones en el efluente no superen los LMP.

- Las concentraciones de aceites y grasas en el efluente no deberán exceder 10 mg/L para no causar un incumplimiento del ECA-Agua correspondiente. Dado que en ninguna parte del proceso productivo se utilizan aceites o grasas que podrían entrar en contacto con las aguas residuales, se puede suponer que no habrá problemas para cumplir esta concentración máxima y no será necesario prever sistemas de tratamiento específicos.

- Las concentraciones de hierro en el cuerpo receptor ya superan el ECA-Agua correspondiente. Sin embargo, si las concentraciones en el efluente serán iguales a la calidad del cuerpo receptor, el vertimiento no causará un incremento adicional de las concentraciones aguas abajo y no ocasionará un impacto adicional en la calidad del agua. El sistema de tratamiento convencional propuesto logrará concentraciones de hierro inferiores a 1,16 mg/L, correspondientes a la concentración mínima de hierro en el cuerpo receptor.

- Las concentraciones de sulfatos en el cuerpo receptor serán menores que el ECA-Agua, siempre y cuando su concentración en el efluente no supere los 1500 mg/L, valor alcanzable con el sistema de tratamiento convencional propuesto.

- El programa de control sugerido comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en dos puntos de control establecidos a 20 m aguas arriba y a 110 m aguas abajo del vertimiento. El control del efluente será realizado con una frecuencia semanal, y en el cuerpo receptor, semestral. Adicionalmente, se prevé la instalación de un sistema de monitoreo automático del pH y la turbiedad que, además de garantizar la eficiencia del tratamiento y el cumplimiento de las normas ambientales, permitirá reducir los costos del tratamiento mediante la optimización de la dosificación de los reactivos.


6
EF-4
COORDENADAS UTM
NORTE : 8317093
ESTE : 192217
ALTITUD : 4446

Vertimiento de aguas residuales de origen minero-metalúrgico a una laguna

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- El proyecto minero prevé la explotación de un yacimiento epitermal de alta sulfuración, polimetálico, y la producción de concentrado de mineral, que contiene principalmente cobre y oro.
- El proyecto se localiza en los Andes peruanos, a alturas que van desde los 3600 hasta los 4200 msnm. Las instalaciones del proyecto están ubicadas en la microcuenca del río XXX, que forma parte de la macrocuenca XXX.
- Dado que el yacimiento es superficial, el método de minado es a cielo abierto en un tajo que tendrá una extensión máxima de 65 ha y una profundidad máxima de 45 m.
- El material de desmonte extraído del tajo se dispondrá en un depósito que ocupará un área máxima de 84 ha.
- La caracterización geoquímica de los minerales indica que el material extraído del tajo, así como las paredes de este, tendrán el potencial de generar drenaje ácido.
- El mineral enviado al procesamiento será almacenado temporalmente un una pila que ocupa una superficie máxima de 2 ha.
- Las vías internas de transporte del mineral y de los desmontes ocupan un área de 1,8 ha y cuentan con un sistema de drenaje que deriva las aguas de lluvia al depósito de relaves.
- La planta concentradora del mineral está diseñada para el procesamiento de 9000 tpd y sus instalaciones incluyen un chancador primario, un molino de bolas y un circuito de flotación para obtener el concentrado de cobre con contenido de oro. La planta concentradora ocupa un área de 0,5 ha y tendrá una demanda de agua continua de 40 L/s, que será tomada de la quebrada XXX aguas arriba de las operaciones mineras. Los relaves generados serán deshidratados y el agua recuperada será enviada al proceso de molienda para su reutilización. Los relaves enviados al depósito de relaves contendrán entre 35% y 40% de agua en su masa.
- Todas las aguas residuales industriales del proyecto, que abarcan el agua de bombeo del tajo, el agua

contenida en los relaves y el agua de contacto proveniente del depósito de desmontes, de las vías de tránsito interno, del almacén temporal del mineral y del área de la planta concentradora, serán recolectadas mediante sistemas de drenaje superficial y subsuperficial y dirigidos al depósito de relaves.

- El depósito de relaves tendrá una superficie máxima de 35 ha. Su impermeabilización con geomembranas y el sistema de drenaje de fondo reducirá la infiltración de aguas residuales a un mínimo. Dentro del depósito de relaves se tendrá una piscina de sobrenadantes que será el resultado de la acumulación de flujos de aguas provenientes de filtraciones, escorrentías y precipitaciones. Desde la piscina de agua sobrenadante, las aguas residuales industriales serán bombeadas a la planta de tratamiento.
- La planta de tratamiento de aguas residuales industriales está compuesta por las siguientes etapas:
  - **Etapa 1:** remoción de hierro, aluminio y sulfatos

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 7.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación del floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.
  - **Etapa 2:** remoción de zinc y cobre

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 9.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación del floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.
  - **Etapa 3:** remoción de otros metales

    Estanque agitado de alcalinización con dosificación de cal hasta un pH de 11.

    Estanque agitado de estabilización del pH y dosificación del floculante.

    Clarificador para la remoción de lodo.
  - **Etapa 4**: neutralización y clarificación final

    Estanque de neutralización con dosificación de ácido sulfúrico hasta un pH $< 8{,}5$.

    Filtro de arena para la clarificación final.
- El agua residual industrial tratada será descargada a la laguna XXX, que tiene la categoría ECA-Agua 4, Conservación del ambiente acuático.
- El agua residual doméstica generada en el campamento del proyecto minero será tratada en una poza séptica y humedal artificial, para su posterior infiltración en el subsuelo, a través de una zanja de infiltración. Por lo tanto, las aguas residuales domésticas no serán vertidas a un cuerpo natural de agua ni serán objeto de la evaluación realizada en los acápites siguientes.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR

A continuación, se resumen las informaciones meteorológicas, hidrológicas y de calidad del agua superficial, relevantes para la evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor. Asimismo, se presenta un resumen de los resultados del estudio limnológico del cuerpo receptor que abarca la morfometría, la batimetría, las corrientes, la estratificación térmica y el perfil vertical de la densidad del agua natural en el punto de vertimiento en las diferentes estaciones del año y el índice de intercambio de agua.

2.1 Meteorología

Las características climatológicas del área de estudio fueron determinadas a partir de la información meteorológica de la estación meteorológica XXX, ubicada a una distancia de 45 km del área de estudio y a una altitud de 3500 msnm. Dado que las características fisiográficas de la localidad donde está ubicada la estación meteorológica son similares a las del área de estudio, y que está ubicada en aproximadamente la misma altitud que el proyecto, los datos meteorológicos pueden ser considerados representativos para el área de estudio.

En las siguientes tablas se indican los principales datos meteorológicos medidos en la estación meteorológica XXX en los años 2009 a 2013.

Tabla 67. Precipitaciones mensuales de los años 2009 a 2013, en milímetros

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
2009	104,4	103,6	149,3	109,7	41,9	21,3	0,0	0,0	61,3	57,8	103,2	133,8	886,3
2010	108,8	96,0	179,3	120,9	59,4	10,7	21,8	9,1	65,0	134,1	206,3	222,3	1233,7
2011	151,4	134,9	354,3	83,3	59,7	8,9	10,2	27,7	35,8	260,8	112,0	195,6	1434,6
2012	91,4	205,0	287,8	137,2	18,0	60,4	13,0	13,2	44,5	130,6	179,6	247,4	1428,1
2013	174,0	63,2	237,5	205,5	58,9	3,3	25,9	23,9	49,5	123,1	139,2	188,8	1292,8
Promedio	126,0	168,5	225,8	115,4	49,4	26,6	11,7	11,5	78,9	129,5	139,6	188,8	1255,1
Mínimo	91,4	163,2	237,5	119,6	45,4	28,1	12,9	12,6	83,7	123,1	139,2	188,8	886,3
Máximo	174,0	373,4	354,3	205,5	84,6	109,0	25,9	27,7	218,2	260,8	206,3	247,4	1434,6

El régimen pluviométrico representado en la tabla anterior demuestra un comportamiento característico para la mayor parte de la sierra peruana, con precipitaciones altas entre los meses de octubre hasta mayo, las cuales tienen su origen en los vientos húmedos provenientes del este que, elevados por la cordillera de los Andes, ocasionan una gran pluviosidad en la vertiente oriental de la cordillera. Sin embargo, cuando los vientos alcanzan la zona de estudio ya no resta mucha humedad, por lo que la precipitación media anual no es muy alta.

La evaporación potencial fue estimada aplicando el método de Penman-Monteith, que utiliza en sus cálculos datos mensuales de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y porcentaje de nubosidad.

Tabla 68. Evaporación potencial mensual de los años 2009 a 2013, en milímetros

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
2009	85,8	73,5	81,6	67,8	79,7	75,9	80,6	85,0	81,4	86,2	90,2	91,0	978,6
2010	72,2	53,6	71,3	78,7	61,4	80,5	68,7	93,2	76,6	90,6	94,7	86,9	928,5
2011	81,1	68,0	66,9	68,7	54,6	76,7	77,4	82,7	86,1	78,7	103,0	78,5	922,3
2012	61,0	78,6	61,9	71,9	51,7	73,4	68,5	64,9	78,1	88,0	94,1	90,6	882,7
2013	77,8	61,8	71,0	61,8	72,2	69,3	74,6	76,4	73,0	79,8	82,3	83,9	883,7
Promedio	75,6	67,1	70,5	69,8	63,9	75,2	74,0	80,4	79,0	84,6	92,9	86,2	919,2
Mínimo	61,0	53,6	61,9	61,8	51,7	69,3	68,5	64,9	73,0	78,7	82,3	78,5	882,7
Máximo	85,8	78,6	81,6	78,7	79,7	80,5	80,6	93,2	86,1	90,6	103,0	91,0	978,6

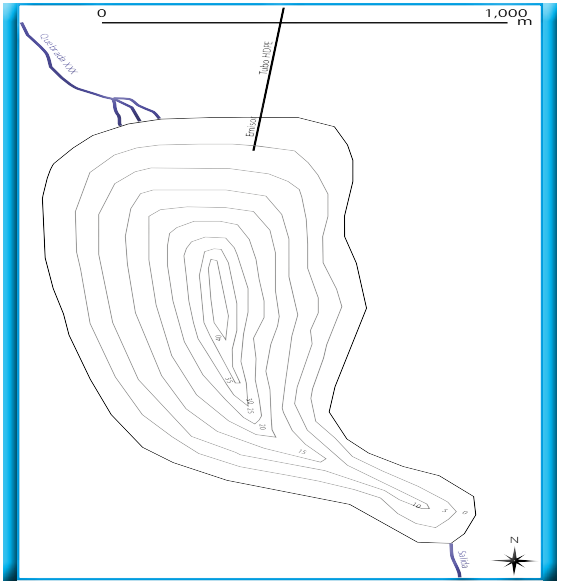
2.2 Morfometría y batimetría

La morfometría de un lago determina, en gran medida, los procesos físicos de la mezcla de un vertimiento de aguas residuales. En este sentido, el estudio morfométrico que se presenta contiene los datos de ingreso de los modelos con los cuales se determina la extensión de la zona de mezcla y el impacto del vertimiento en el cuerpo receptor.

La batimetría de la laguna fue establecida en el mes de agosto, que corresponde a la época de estiaje y al nivel de agua mínimo. Las medidas de profundidad en la lámina de agua libre se realizaron con una sonda ecográfica tipo XXX, con rango de medición hasta 200 m de profundidad y GPS integrado. Se llevaron a cabo ocho transectos transversales y tres longitudinales.

Con base en los datos recopilados mediante su georreferenciación en un sistema de información geográfica, se elaboró el mapa batimétrico representado en el gráfico 54.

Gráfico 56. Mapa batimétrico de la laguna XXX



En la tabla 69 se determina el volumen de la laguna según el mapa batimétrico presentado.

Tabla 69. Superficie y volumen acumulado de la laguna XXX

PROFUNDIDAD (M)	SUPERFICIE DEL NIVEL (HA)	ESPESOR DEL NIVEL (M)	VOLUMEN DEL NIVEL (HM^3)	VOLUMEN ACUMULADO (HM^3)
0	110,96	2,5	2,77	2,77
5	77,77	5,0	3,89	6,66
10	55,35	5,0	2,77	9,43
15	36,92	5,0	1,85	11,28
20	23,77	5,0	1,19	12,46
25	14,22	5,0	0,71	13,18
30	7,38	5,0	0,37	13,54
35	3,33	5,0	0,17	13,71
40	0,95	5,0	0,05	13,76

La tabla 70, a su vez, indica los valores de los parámetros morfométricos de la laguna según el mapa batimétrico presentado.

Tabla 70. Parámetros morfométricos de la laguna XXX

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Superficie	km^2	1,110
Longitud de la línea de costa	km	4,906
Longitud máxima	km	1,952
Anchura máxima	km	0,793
Profundidad máxima	m	43
Volumen	Hm^3	13,76
Profundidad media (= volumen / superficie)	m	12,4

2.3 Corrientes

Un factor muy importante para la evaluación de la dilución inicial y de la extensión de la zona de mezcla son las corrientes, pues el conocimiento de sus direcciones y su velocidad en varias profundidades y ubicaciones para todas las épocas del año permite hacer estimaciones adecuadas sobre los efectos de dilución, dispersión y transporte de campo, y es indispensable para una estimación adecuada en el análisis de riesgos.

Los vectores de velocidad de las corrientes fueron determinados mediante el empleo de flotadores con vela de arrastre sumergida. Tales medidas se concentraron en la posición estimada del difusor subacuático en una distancia de 100 m desde la orilla norte de la laguna. Dado que la profundidad del agua en la zona estudiada es de aproximadamente 5 m, se ha medido la velocidad en una profundidad de 2,5 m solamente.

La medición fue realizada en cuatro fechas, con una frecuencia trimestral, para poder evaluar la variabilidad mensual de las corrientes de flujo. La duración de la medición era de tres horas.

Tabla 71. Corrientes de flujo en la laguna XXX, medidas a 100 m de la orilla norte (coordenadas UTM-WGS84 XXXXX, XXXXXX)

FECHA	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013
VELOCIDAD DE FLUJO (CM/S)	0,9	1,2	1,1	1,0
DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE	NO-SE	NO-SE	NO-SE	NO-SE

La medición de las corrientes demostró que la dirección de flujo es siempre orientada en dirección norte-oeste a sur-este, con velocidades de flujo entre 0,9 cm/s y 1,2 cm/s.

2.4 Estratificación térmica y perfil vertical de la densidad del agua

Los cuerpos de agua lénticos pueden mostrar una estratificación vertical de la densidad del agua que es causada por un gradiente térmico con mayores temperaturas en la superficie (= menor densidad) y menores temperaturas en el fondo (= mayor densidad).

En los lagos y lagunas altoandinas, localizados entre 2000 y 4000 msnm, como la laguna objeto del presente estudio, la dinámica térmica se aparta considerablemente de la que presentan los sistemas en las zonas bajas del trópico, debido a la altitud y a las consecuentes condiciones climáticas imperantes. Investigaciones realizadas en algunos lagos de alta montaña han contribuido al conocimiento del régimen térmico de estos, siendo en general clasificados como oligotérmicos con circulaciones frecuentes (es decir, nunca se estratifican), por lo cual han sido llamados polimícticos fríos (Hutchinson & Loefler, 1956; Rodan, 1992).

Sin embargo, para conocer la variabilidad de la densidad con la profundidad de la laguna, se han determinado los perfiles de temperatura en las diferentes estaciones del año. La medición fue realizada con el conductivímetro modelo XXX, con un cable de una longitud de 30 m. Como punto de medición se ha seleccionado el centro norte de la laguna, donde la profundidad del agua es un máximo.

La densidad del agua fue calculada con base en la temperatura determinada con la siguiente ecuación, aplicable para temperaturas entre 0 °C y 40 °C, a una presión de 1 atm (Comité International des Poids et Mesures, CIPM).

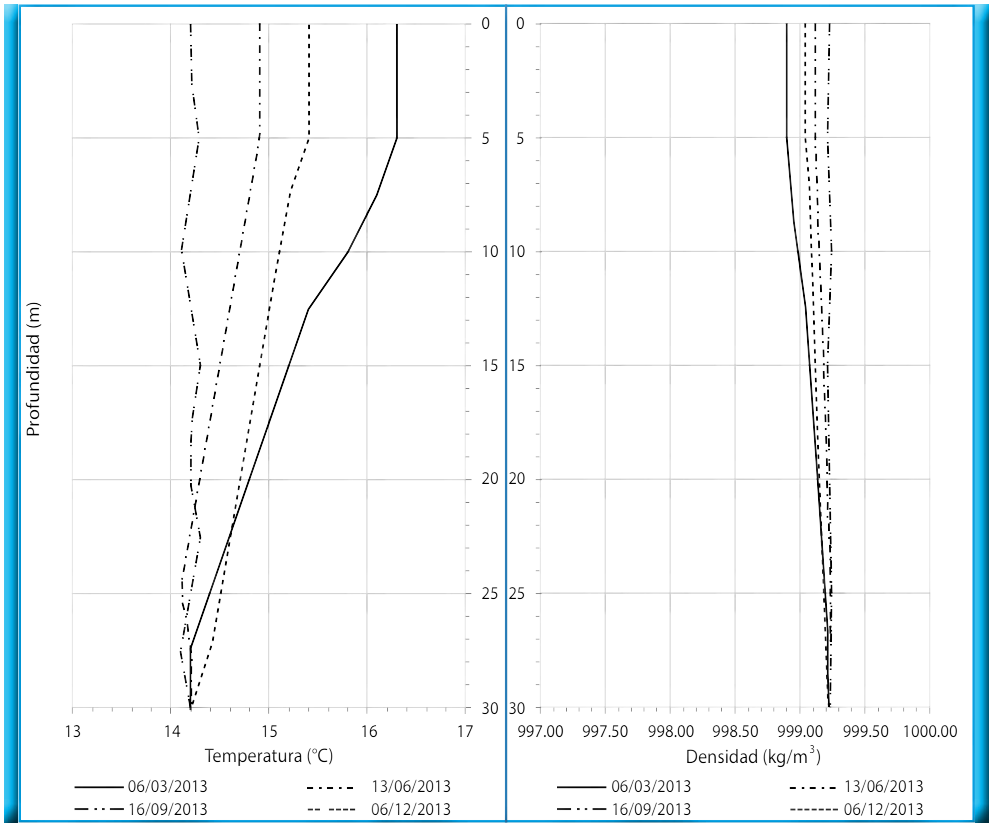
$$\rho\,(t) = 999{,}974950 \text{ x } \left(1 - \frac{(T - 3{,}983035)2 \text{ x } (T + 301{,}797)}{522528{,}9 \text{ x } (T + 69{,}34881)}\right)$$

Donde:

ρ (t) : Densidad del agua en función de la temperatura, en kg/m^3.

T : Temperatura del agua en °C.

Gráfico 57. Curvas de la estratificación térmica y de los perfiles de densidad en la laguna XXX



La medición de los perfiles de temperatura demostró que la estratificación térmica también en los meses de verano es mínima ($\Delta T < 2$ °C); de igual forma, la estratificación de la densidad es mínima con una diferencia máxima entre superficie y fondo de 0,3 kg/m^3. Por lo tanto, se comprobó que se trata de un cuerpo de agua léntico polimíctico.

2.5 Índice de intercambio de agua de la laguna

El índice de intercambio del agua determina la capacidad de asimilación de la laguna de la carga contaminante del vertimiento en el largo plazo. Este índice corresponde al caudal anual medio en la salida de la laguna. Dado que no

se dispone de una serie histórica del caudal en la salida de la laguna, se han realizado cuatro mediciones con una frecuencia trimestral del caudal en la salida de la laguna.

Tabla 72. Caudales medidos en la salida de la laguna XXX

FECHA	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013	Promedio
HORA	10:30	11:00	09:30	12:30	
CAUDAL DE LA SALIDA DE LA LAGUNA	1869 L/s	1215 L/s	1157 L/s	1687 L/s	1482 L/s

El promedio de las cuatro mediciones corresponde al índice de intercambio de agua crítico, corregido con un factor de seguridad (2), que toma en cuenta la inseguridad de la información basada en cuatro mediciones y considera la variabilidad anual de los caudales.

Asimismo, del índice de intercambio de agua se deberá restar el caudal de aguas naturales que el proyecto tomará de la quebrada XXX para el desarrollo de sus actividades, dado que esta quebrada es un tributario de la laguna XXX, y la reducción de su caudal corresponde a una reducción del índice de intercambio de agua de la laguna.

$$II_{RH,crit} = \frac{Q_{promedio}}{2} - Q_{uso} = \frac{1482}{2} - 40 = 701 \text{ L/s}$$

2.6 Calidad del agua en el cuerpo natural

Para determinar la calidad del cuerpo receptor del vertimiento se han tomado muestras de agua y se han analizado sus características químico-físicas en un laboratorio cuyos ensayos analíticos están acreditados por el Instituto Nacional de Calidad – INACAL.

Considerando la variabilidad estacional de las características de un cuerpo de agua léntico, se realizaron cuatro tomas de muestra con una frecuencia trimestral en la ubicación del vertimiento proyectado. La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor fue efectuada en las mismas fechas en las cuales se determinaron las corrientes y la estratificación térmica en el marco del estudio limnológico.

La toma de muestras fueron realizadas en una distancia de aproximadamente 100 m de la orilla norte de la laguna. Dado que la laguna XXX es un cuerpo de agua polimíctico –es decir, sin estratificación térmica significante–, solamente se tomaron las muestras en la superficie.

Se analizaron los parámetros que están potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, definidos en el acápite VI.6.3.1.

Tabla 73. Concentraciones en el cuerpo natural de agua

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS MUESTREO 1	RESULTADOS MUESTREO 2	RESULTADOS MUESTREO 3	RESULTADOS MUESTREO 4	VALOR MÁXIMO (MÍNIMO PARA O_2 Y PH)	ECA AGUA CATEGORÍA 4: CONSERVACIÓN DEL AMBIENTE ACUÁTICO
Fecha de muestreo	----	6/3/2013	13/6/2013	16/9/2013	6/12/2013		
Hora de muestreo	----	10:30	11:00	09:30	12:30		
Nombre laboratorio		XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC		
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX		
pH	---	6,14	6,20	6,17	6,26	6,14	6,5-8,5
Temperatura	°C	16,3	14,9	14,2	15,4	16,3	---
Oxígeno disuelto	mg O_2/L	7,23	7,85	7,52	7,82	7,23	>5
Conductividad	µS/cm	235	252	263	257	263	---
Sólidos suspendidos totales	mg/L	<3	<3	<3	<3	0	25
Sólidos disueltos totales	mg/L	157	169	176	172	176	500
Cianuro libre	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0,022
Nitrógeno total	mg/L	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	0	1,6
Arsénico	mg/L	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	0,004	0,01
Bario	mg/L	0,037	0,026	0,032	0,030	0,037	0,7
Cadmio	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0	0,004
Cobre	mg/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0	0,02
Cromo hexavalente	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	0,05
Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0	0,0001
Níquel	mg/L	<0,003	0,003	<0,003	<0,003	0,003	0,025
Plomo	mg/L	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0	0,001
Zinc	mg/L	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004	0,03

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que la mayoría de los parámetros evaluados cumple con los ECA-Agua de la categoría 4. Sin embargo, solo el parámetro pH excede el ECA-Agua en todas las muestras analizadas.

Esto se debe a las características geológicas de la microcuenca hidrográfica, marcadas por la intensa mineralización de la zona, la cual presenta mantos sulfurosos que, en contacto con las aguas subterráneas, producen la reducción del pH.

Las aguas ácidas afloran y fluyen por la quebrada XXX, que tributa a la laguna XXX, ocasionando las condiciones ácidas observadas.

2.7 Usos del agua en el cuerpo receptor

En la proximidad del punto de descarga proyectado no existen usos de agua tales como tomas de agua para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario o áreas de acuicultura.

3. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

3.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

De conformidad con la tabla 2, acápite I.2, De conformidad con la tabla 2 del acápite I, los parámetros por evaluarse para el caso de aguas residuales de origen minero-metalúrgico vertidas a un cuerpo de agua de categoría ECA-Agua 4, Lagunas y lagos, son los siguientes:

- Sólidos suspendidos totales
- Sólidos disueltos totales
- Cianuro libre
- Nitrógeno total
- Cromo hexavalente
- Metales considerados en la categoría ECA-Agua 4 y determinados con ICP: arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc.

Se propone no evaluar parámetros adicionales, ya que en los procesos minero-metalúrgicos no se utilizan insumos químicos que contengan sustancias consideradas en el D.S. Nº 004-2017-MINAM (véanse las hojas de seguridad de los insumos químicos usados, anexados al EIA).

3.2 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento proyectado para un proyecto minero futuro, las concentraciones máximas son supuestos iguales que los Límites Máximos Permisibles en cualquier momento.

Para los parámetros no considerados en los LMP, se proyectan sus concentraciones en el efluente:

- Cianuro libre: el cianuro libre es una fracción del cianuro total, que está reglamentado con un Límite Máximo Permisible de 1 mg/L. Por lo tanto, se puede suponer que las concentraciones de cianuro libre en el efluente serán significativamente menores de 1 mg/L. Sin embargo, no es posible determinar a priori las concentraciones de cianuro libre en las aguas residuales. Por lo tanto, se calculará su concentración máxima en el efluente mediante balance de masas, que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua.

- Nitrógeno total: el nitrógeno puede originarse de los explosivos usados en la actividad minera que contienen hasta un 33% de él, principalmente en forma de nitrato de amonio. Se estima que entre 10% y 20% de los explosivos no detonan y, debido a la alta solubilidad del nitrato de amonio,

rápidamente se disuelven cuando entran en contacto con el agua. Sin embargo, no es posible determinar anticipadamente las concentraciones de nitrógeno en las aguas residuales. Por ello, se calculará su concentración máxima en el efluente mediante balance de masas, que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua.

- Metales: los metales no considerados en los LMP (bario, níquel) pueden originarse en los minerales que serán explotados, a través de su lixiviación en los desmontes o su solución en los procesos de concentración del mineral. Los test dinámicos (SPLP) de lixiviación, realizados sobre las muestras de los minerales que serán procesados, demostraron que los efluentes posiblemente contendrán Hg, As, Cd, Cu (considerados en los LMP) y Al, Fe, Mn. Sin embargo, no se ha encontrado bario, níquel, plomo o zinc. No obstante se calculará, mediante balance de masas, sus concentraciones máximas en el efluente, que permitirán el cumplimiento de los ECA-Agua.
- Sólidos disueltos totales: dado que no es posible determinar a priori las concentraciones de los sólidos disueltos totales en el efluente, se calcularán sus concentraciones máximas en el efluente mediante balance de masas, que permitirán el cumplimiento de los ECA-Agua.

Tabla 74. Concentraciones máximas del efluente

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE EN CUALQUIER MOMENTO (D.S. Nº 010-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE TRATADO
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50	50
Sólidos disueltos totales	mg/L	---	B.M.
Cianuro libre	mg/L	---	B.M.
Nitrógeno total	mg/L	---	B.M.
Arsénico	mg/L	0,10	0,10
Bario	mg/L	---	B.M.
Cadmio	mg/L	0,05	0,05
Cobre	mg/L	0,50	0,50

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE EN CUALQUIER MOMENTO (D.S. Nº 010-2010-MINAM)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE TRATADO
Cromo hexavalente	mg/L	0,10	0,10
Mercurio	mg/L	0,00	0,00
Níquel	mg/L	---	B.M.
Plomo	mg/L	0,20	0,20
Zinc	mg/L	1,50	1,50

B.M.: la concentración admisible en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua será determinada mediante balance de masas.

3.3 Determinación del caudal máximo y medio de aguas residuales tratadas vertidas

Todas las aguas residuales del proyecto serán recolectadas mediante sistemas de drenaje superficial y subsuperficial y dirigidas al depósito de relaves. Dentro de este se tendrá una piscina de sobrenadantes, que será el resultado de la acumulación de flujos de aguas provenientes de filtraciones, escorrentías y precipitaciones. Desde la piscina de agua sobrenadante, las aguas residuales industriales serán bombeadas a la planta de tratamiento.

Las aguas residuales del proyecto provienen de las siguientes instalaciones:

- Agua subterránea del tajo: la caracterización geoquímica de los minerales de la zona indica que las paredes del tajo tendrán potencial de generar drenaje ácido. Por lo tanto, el agua del tajo deberá ser tratada. El modelo hidrogeológico determinó que el aporte de agua subterránea hacia el tajo será de 8,5 L/s, incrementándose en función de la profundidad del tajo hasta 10,3 L/s.
- Agua de lluvia captada en el tajo: las precipitaciones que caen sobre el área del tajo serán recolectadas en el lago del tajo y bombeadas al depósito de relaves.
- Agua de contacto proveniente del depósito de desmontes: dado que los desmontes tienen potencial de generación de drenaje ácido, el agua de contacto deberá ser recolectada a través de un sistema de drenaje superficial y subsuperficial, y tratada antes de su descarga a la quebrada XXX.
- Agua de contacto proveniente del almacén temporal del mineral, del área de la planta concentradora y de las vías de tránsito interno: en vista de que las aguas de precipitación que caen sobre estas áreas estarán potencialmente contaminadas, se prevé su captación y tratamiento.

- Agua contenida en los relaves: los relaves contienen 35-40% de agua. Considerando que la planta concentradora procesará 9000 ton/d, se calcula una flujo de relaves de 94,5 kg/s que contiene 33-38 L/s de agua residual.

Para el cálculo del caudal máximo de vertimiento se aplican las condiciones meteorológicas del año de mayores precipitaciones observadas (2011), mientras que para el cálculo del caudal medio se emplean las condiciones meteorológicas medias del periodo de evaluación (2009-2013). De forma conservadora, se supone que 100% de las precipitaciones serán recolectadas, omitiendo eventuales pérdidas por evaporación o infiltración, a excepción de la evaporación del depósito de relaves.

En la tabla 75 se representa el balance de agua residual mensualizado de las operaciones mineras para el año de precipitaciones máximas (2011).

Tabla 75. Balance de agua residual mensualizado evaluado con base en las precipitaciones del año 2011

PARÁMETRO	UNID.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	PROMEDIO
Precipitaciones 2011	mm	151,4	134,9	354,3	83,3	59,7	8,9	10,2	27,7	35,8	260,8	112,0	195,6	119,6
Evaporación potencial 2011	mm	81,1	68,0	66,9	68,7	54,6	76,7	77,4	82,7	86,1	78,7	103,0	78,5	76,9
Agua subterránea del tajo	L/s	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Área máxima del tajo	ha	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de lluvia captada en el tajo	L/s	36,7	36,2	86,0	20,9	14,5	2,2	2,5	6,7	9,0	63,3	28,1	47,5	29,5
Área máxima depósito de desmontes	ha	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con desmontes	L/s	47,5	46,8	111,1	27,0	18,7	2,9	3,2	8,7	11,6	81,8	36,3	61,3	38,1
Superficie máxima de almacén de mineral, planta concentradora y vías internas	ha	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	

Parámetro	UNID.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con almacén y otras áreas	L/s	2,4	2,4	5,7	1,4	1,0	0,1	0,2	0,4	0,6	4,2	1,9	3,1	1,9
Agua contenida en los relaves	L/s	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Superficie máxima del depósito de relaves	ha	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
Caudal de agua evaporada	L/s	-10,6	-9,8	-8,7	-9,3	-7,1	-10,4	-10,1	-10,8	-11,6	-10,3	-13,9	-10,3	-10,2
Caudal máximo de aguas residuales	L/s	124	124	242	88	75	43	44	53	58	187	101	150	108

En la tabla 76 se representa el balance de agua residual mensualizado de las operaciones mineras para las precipitaciones medias del periodo 2009-2013.

Tabla 76. Balance de agua residual mensualizado evaluado con base en las precipitaciones medias del periodo 2009-2013

PARÁMETRO	UNID.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	PROMEDIO
Precipitaciones medias	mm	126,0	168,5	225,8	115,4	49,4	26,6	11,7	11,5	78,9	129,5	139,6	188,8	106,0
Evaporación potencial media	mm	75,6	67,1	70,5	69,8	63,9	75,2	74,0	80,4	79,0	84,6	92,9	86,2	76,6
Agua subterránea del tajo	L/s	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Área máxima del tajo	ha	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

PARÁMETRO	UNID.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	PROMEDIO
Agua de lluvia captada en el tajo	L/s	30,6	45,3	54,8	28,9	12,0	6,7	2,8	2,8	19,8	31,4	35,0	45,8	26,3
Área máxima depósito de desmontes	ha	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con desmontes	L/s	39,5	58,5	70,8	37,4	15,5	8,6	3,7	3,6	25,6	40,6	45,2	59,2	34,0
Superficie máxima de almacén de mineral, planta concentradora y vías internas	ha	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	
Factor de escorrentía	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Agua de contacto con almacén y otras áreas	L/s	2,0	3,0	3,6	1,9	0,8	0,4	0,2	0,2	1,3	2,1	2,3	3,0	1,7
Agua contenida en los relaves	L/s	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Superficie máxima del depósito de relaves	ha	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
Caudal de agua evaporada	L/s	-9,9	-9,7	-9,2	-9,4	-8,4	-10,2	-9,7	-10,5	-10,7	-11,1	-12,5	-11,3	-10,2
Caudal medio de aguas residuales	L/s	111	145	168	107	68	54	45	44	84	111	118	145	100

3.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento físicos (clarificadores y filtro de arena) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

4. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL A LARGO PLAZO

A continuación se calcula el balance de masas de todos los parámetros potencialmente contenidos en las aguas residuales tratadas, y se evalúa el impacto ambiental del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural léntico a largo plazo.

Dado que se está evaluando el cumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo, en los siguientes cálculos se aplica el caudal medio anual del efluente, y no el máximo, como en la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla.

4.1 Balance de masa

Para todos los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas vertidas, se calculan sus concentraciones en cuerpo receptor en el largo plazo con el simple balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times II_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(II_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Donde:

C_0 : Concentración en el cuerpo receptor en el largo plazo.

C_{RH} : Concentración máxima en el cuerpo receptor, indicada en el acápite VI.6.2.6.

C_{vert} : Concentración máxima en las aguas residuales tratadas, indicada en el acápite VI.6.3.2.

$II_{RH,crit}$: Índice de intercambio de agua del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicado en el acápite VI.6.2.5.

Q_{vert} : Caudal medio del vertimiento, indicado en el acápite VI.6.3.3.

Para la evaluación de todos los parámetros contenidos potencialmente en el efluente se elaboró la tabla 77, que contiene la lista completa de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, la concentración calculada para cada parámetro en el cuerpo receptor en el largo plazo y el ECA-Agua correspondiente.

Tabla 77. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el largo plazo

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$II_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
Sólidos suspendidos totales	100 L/s	50 mg/L	701 L/s	0 mg/L	6 mg/L	25 mg/L	Cumple ECA-Agua
Sólidos disueltos totales	100 L/s	B. M.	701 L/s	176,21 mg/L	n.d.	500,00 mg/L	B. M.
Cianuro libre	100 L/s	B. M.	701 L/s	0,000 mg/L	n.d.	0,022 mg/L	B. M.
Nitrógeno total	100 L/s	B. M.	701 L/s	0,0 mg/L	n.d.	1,6 mg/L	B. M.
Arsénico	100 L/s	0,100 mg/L	701 L/s	0,004 mg/L	0,016 mg/L	0,010 mg/L	Excede ECA-Agua
Bario	100 L/s	B. M.	701 L/s	0,0 mg/L	n.d.	0,7 mg/L	B. M.
Cadmio	100 L/s	0,050 mg/L	701 L/s	0,000 mg/L	0,006 mg/L	0,004 mg/L	Excede ECA-Agua
Cobre	100 L/s	0,50 mg/L	701 L/s	0,00 mg/L	0,06 mg/L	0,02 mg/L	Excede ECA-Agua
Cromo hexavalente	100 L/s	0,10 mg/L	701 L/s	0,00 mg/L	0,01 mg/L	0,05 mg/L	Cumple ECA-Agua
Mercurio	100 L/s	0,0020 mg/L	701 L/s	0,0000 mg/L	0,0003 mg/L	0,0001 mg/L	Excede ECA-Agua
Níquel	100 L/s	B.M.	701 L/s	0,00 mg/L	n.d.	0,03 mg/L	B. M.
Plomo	100 L/s	0,200 mg/L	701 L/s	0,000 mg/L	0,025 mg/L	0,001 mg/L	Excede ECA-Agua
Zinc	100 L/s	1,50 mg/L	701 L/s	0,00 mg/L	0,19 mg/L	0,03 mg/L	Excede ECA-Agua

B. M.: la concentración máxima admisible en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo será determinada mediante balance de masas.

4.2 Análisis de alternativas de la disposición final de aguas residuales tratadas

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc en el largo plazo. Para poder cumplir con el ECA-Agua, la carga de estos metales debe ser reducida hasta el nivel de la carga admisible, disminuyendo el caudal del vertimiento, las concentraciones de los parámetros críticos, o ambos.

Por lo tanto, se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables, descritas a continuación.

5. REDUCCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES A TRAVÉS DE UN MAYOR NIVEL DE TRATAMIENTO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS

Para determinar las concentraciones máximas admisibles en el efluente, que permiten el cumplimiento de los ECA-Agua, se ha aplicado el balance de masas:

$$Cvert.admis \leq \frac{IIRH,crit \times (CECA - CRH)}{Qvert} + CECA$$

Tabla 78. Concentraciones máximas admisibles en el efluente de los parámetros arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, zinc, sólidos disueltos totales, cianuro libre, nitrógeno total, bario y níquel

PARÁMETRO	Q_{VERT}	$II_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_{ECA}	$C_{VERT,ADMIS}$	LMP
Sólidos disueltos totales	100 L/s	701 L/s	176 mg/L	500 mg/L	2,766 mg/L	---
Cianuro libre	100 L/s	701 L/s	0,000 mg/L	0,022 mg/L	0,176 mg/L	---
Nitrógeno total	100 L/s	701 L/s	0,0 mg/L	1,6 mg/L	12,8 mg/L	---
Arsénico	100 L/s	701 L/s	0,004 mg/L	0,010 mg/L	0,052 mg/L	0,1
Bario	100 L/s	701 L/s	0,04 mg/L	0,70 mg/L	5,34 mg/L	---
Cadmio	100 L/s	701 L/s	0,000 mg/L	0,004 mg/L	0,032 mg/L	0,05
Cobre	100 L/s	701 L/s	0,00 mg/L	0,02 mg/L	0,16 mg/L	0,5
Mercurio	100 L/s	701 L/s	0,0000 mg/L	0,0001 mg/L	0,0008 mg/L	0,002
Níquel	100 L/s	701 L/s	0,003 mg/L	0,025 mg/L	0,178 mg/L	---
Plomo	100 L/s	701 L/s	0,000 mg/L	0,001 mg/L	0,008 mg/L	0,2
Zinc	100 L/s	701 L/s	0,00 mg/L	0,03 mg/L	0,21 mg/L	1,5

El análisis de las concentraciones máximas admisibles en el efluente para el cumplimiento de los ECA-Agua demuestra lo siguiente:

- La concentración máxima admisible de los sólidos disueltos totales es de 2766 mg/L, lo que no debería constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.

- La concentración máxima admisible de cianuro libre es de 0,176 mg/L, lo que corresponde a 17,6% de la concentración máxima de cianuro total, y no debería constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.
- La concentración máxima admisible de nitrógeno total es de 12,8 mg/L, lo que no debería constituir un problema, dado que las concentraciones en las aguas residuales crudas con alta probabilidad serán menores.
- La concentración máxima admisible de bario es de 5,34 mg/L, lo que no debería constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.
- La concentración máxima admisible de níquel es de 0,178 mg/L, lo que no debería constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.
- La concentración máxima admisible de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc queda a niveles significativamente inferiores de los LMP, lo que significa que el sistema de tratamiento convencional propuesto no será suficiente para la protección del cuerpo receptor y el cumplimiento de los ECA-Agua. Para lograr las concentraciones máximas admisibles se debería implementar un sistema de tratamiento avanzado, como por ejemplo la osmosis inversa o la precipitación selectiva de los metales críticos.

Reducción del caudal de vertimiento mediante reúso parcial de las aguas residuales tratadas

A continuación se evalúa la alternativa de un reúso parcial de las aguas residuales tratadas, considerando que se recircule una parte del agua residual tratada a la planta concentradora de mineral, sustituyendo el agua natural.

Esta medida también incrementaría el agua natural disponible para la dilución, dado que no será necesario tomar agua natural de la quebrada XXX. Por lo tanto, el índice de intercambio de agua de la laguna se calcula con:

$$II_{RH,crit} = \frac{Q_{promedio}}{2} = \frac{1482}{2} = 741 \text{ L/s}$$

El caudal medio de vertimiento se calcula restando el caudal que será reusado:

$$Q_{vert} = 100 - 40 = 60 \text{ L/s}$$

Aplicando estos caudales al balance de masas, se calculan las siguientes concentraciones en el cuerpo natural de agua en el largo plazo.

Tabla 79. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua en el largo plazo en la alternativa de reúso parcial de aguas residuales tratadas

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$II_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
Sólidos suspendidos totales	60 L/s	50 mg/L	741 L/s	0 mg/L	4 mg/L	25 mg/L	Cumple ECA-Agua
Sólidos disueltos totales	60 L/s	B.M.	741 L/s	176,21 mg/L	n.d.	500,00 mg/L	B.M.
Cianuro libre	60 L/s	B.M.	741 L/s	0,000 mg/L	n.d.	0,022 mg/L	B.M.
Nitrógeno total	60 L/s	B.M.	741 L/s	0,0 mg/L	n.d.	1,6 mg/L	B.M.
Arsénico	60 L/s	0,100 mg/L	741 L/s	0,004 mg/L	0,011 mg/L	0,010 mg/L	Excede ECA-Agua
Bario	60 L/s	B.M.	741 L/s	0,0 mg/L	n.d.	0,7 mg/L	B.M.
Cadmio	60 L/s	0,050 mg/L	741 L/s	0,000 mg/L	0,004 mg/L	0,004 mg/L	Cumple ECA-Agua
Cobre	60 L/s	0,50 mg/L	741 L/s	0,00 mg/L	0,04 mg/L	0,02 mg/L	Excede ECA-Agua
Cromo hexavalente	60 L/s	0,10 mg/L	741 L/s	0,00 mg/L	0,01 mg/L	0,05 mg/L	Cumple ECA-Agua
Mercurio	60 L/s	0,0020 mg/L	741 L/s	0,0000 mg/L	0,0002 mg/L	0,0001 mg/L	Excede ECA-Agua
Níquel	60 L/s	B.M.	741 L/s	0,00 mg/L	n.d.	0,03 mg/L	B. M.
Plomo	60 L/s	0,200 mg/L	741 L/s	0,000 mg/L	0,015 mg/L	0,001 mg/L	Excede ECA-Agua
Zinc	60 L/s	1,50 mg/L	741 L/s	0,00 mg/L	0,12 mg/L	0,03 mg/L	Excede ECA-Agua

B. M.: la concentración máxima admisible en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua será determinada mediante balance de masas.

Del análisis anterior de las concentraciones de los parámetros críticos en el cuerpo receptor, se puede concluir que el reúso de las aguas residuales tratadas en las operaciones de la planta concentradora con un caudal continuo de 40 L/s, reduce significativamente el riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo; los LMP garantizan que las concentraciones de cadmio ya no excederán los ECA-Agua, y las concentraciones de arsénico y mercurio se aproximan al ECA-Agua. Sin embargo, las probables concentraciones de cobre, plomo y zinc superan todavía significativamente los ECA-Agua correspondientes.

En la tabla 80 se calculan las concentraciones máximas en el efluente, que permiten cumplir los ECA-Agua en el largo plazo mediante el balance de masas, considerando el reúso parcial de las aguas residuales:

$$C_{vert,admi} = \frac{II_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

Tabla 80. Concentraciones máximas admisibles en el efluente con reúso parcial de las aguas residuales tratadas

PARÁMETRO	Q_{VERT}	$II_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_{ECA}	$C_{VERT,MAX}$	LMP
Sólidos disueltos totales	60 L/s	741 L/s	176 mg/L	500 mg/L	4,486 mg/L	---
Cianuro libre	60 L/s	741 L/s	0,000 mg/L	0,022 mg/L	0,293 mg/L	---
Nitrógeno total	60 L/s	741 L/s	0,0 mg/L	1,6 mg/L	21,3 mg/L	---
Arsénico	60 L/s	741 L/s	0,004 mg/L	0,010 mg/L	0,084 mg/L	0,1
Bario	60 L/s	741 L/s	0,04 mg/L	0,70 mg/L	8,86 mg/L	---
Cadmio	60 L/s	741 L/s	0,000 mg/L	0,004 mg/L	0,053 mg/L	0,05
Cobre	60 L/s	741 L/s	0,00 mg/L	0,02 mg/L	0,27 mg/L	0,5
Mercurio	60 L/s	741 L/s	0,0000 mg/L	0,0001 mg/L	0,0013 mg/L	0,002
Níquel	60 L/s	741 L/s	0,003 mg/L	0,025 mg/L	0,293 mg/L	---
Plomo	60 L/s	741 L/s	0,000 mg/L	0,001 mg/L	0,013 mg/L	0,2
Zinc	60 L/s	741 L/s	0,00 mg/L	0,03 mg/L	0,35 mg/L	1,5

El análisis de las concentraciones máximas admisibles en el efluente para el cumplimiento de los ECA-Agua demuestra lo siguiente:

- Las concentraciones máximas admisibles en el efluente de los parámetros no reglamentados con un Límite Máximo Permisible (SDT, cianuro libre, nitrógeno, bario y níquel) quedan a niveles que no deberían constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.
- Las concentraciones máximas admisibles de arsénico, cobre y mercurio quedan ligeramente debajo de los Límites Máximos Permisibles correspondientes, lo que no debería constituir un problema después del tratamiento convencional propuesto.
- Las concentraciones máximas admisibles de plomo y zinc quedan significativamente debajo de los Límites Máximos Permisibles correspondientes. Sin embargo, considerando que los test dinámicos (SPLP) de lixiviación, realizados sobre las muestras de los minerales que serán procesados, demostraron la ausencia de níquel, plomo y zinc, se puede suponer que el efluente contendrá concentraciones muy bajas de estos metales.

Se ha evaluado antes dos alternativas técnicamente viables, que permitirán cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor. La decisión final sobre qué alternativa técnica será implementada depende de los costos de construcción y operación de los sistemas necesarios. El

análisis de la viabilidad económica de las dos alternativas ha evidenciado una clara ventaja del reúso parcial del efluente tratado en la planta concentradora. Por lo tanto, se implementará esta alternativa para poder cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor.

5. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL ECA-AGUA EN EL LÍMITE DE LA ZONA DE MEZCLA

La evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas en un cuerpo de agua léntico debe comprobar que el diseño del emisor subacuático proporciona una dilución inicial mínima –S_a– que es mayor que la dilución requerida –S_{max}–:

$$S_a > S_{max}$$

Si esta inecuación expresa un resultado correcto, las concentraciones de los contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas en el límite de la zona de mezcla serán inferiores a los ECA-Agua.

5.1 Evaluación de la dilución requerida

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (S_{max}) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(S_i , S_{(i+1)} , S_{(i+2)} , S_{(i+n)})$$

y

$$S_i = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C_{RH,i})}$$

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$: Dilución necesaria para respetar los ECA del parámetro i o i+n, respectivamente.

i, i+n: Parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente, indicados en el acápite VI.6.3.1.

$C_{vert,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el efluente, indicada en el acápite VI.6.3.2.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural, indicada en el acápite VI.6.2.6.

S_{max}: Dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla, definida como el valor máximo de los factores de dilución calculados para los diferentes parámetros relevantes para el tipo de efluente.

En la tabla 81 se calcula la dilución requerida para cada uno de los parámetros característicos del vertimiento.

Tabla 81. Dilución requerida para el cumplimiento del ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA-AGUA CAT. 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50 LMP	25	0	1
Sólidos disueltos totales	mg/L	4486 Cmax	500	176,21	12
Cianuro libre	mg/L	0,29 Cmax	0,022	0	12
Nitrógeno total	mg/L	21,3 Cmax	1,6	0	12
Arsénico	mg/L	0,08 Cmax	0,01	0,004	12
Bario	mg/L	8,86 Cmax	0,7	0,037	12
Cadmio	mg/L	0,05 LMP	0,004	0	12
Cobre	mg/L	0,27 Cmax	0,02	0	12
Cromo hexavalente	mg/L	0,1 LMP	0,05	0	1
Mercurio	mg/L	0,00 Cmax	0,0001	0	12
Níquel	mg/L	0,29 Cmax	0,025	0,0032	12
Plomo	mg/L	0,01 Cmax	0,001	0	12
Zinc	mg/L	0,35 Cmax	0,03	0,004	12
				S_{max}	12

(LMP) : La concentración máxima en el efluente corresponde al LMP.

(Cmax) : La concentración máxima en el efluente corresponde a la concentración máxima admisible para el cumplimiento del ECA-Agua en el largo plazo.

5.2 La evaluación de la dilución inicial mínima – S_a

La dilución inicial mínima –S_a– proporcionada por el difusor subacuático propuesto fue evaluada mediante el uso del modelo de simulación numérico XXX, auspiciado por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

La evaluación es realizada considerando las condiciones más críticas, lo que permitirá diseñar un dispositivo de descarga que garantice el cumplimiento de los ECA-Agua en todo momento:

- Gradiente máximo de la temperatura del cuerpo receptor, indicado en el acápite VI.6.2.4.
- Corriente horizontal mínima (0,90 cm/s) con dirección de flujo de norte-oeste a sur-este (ángulo horizontal de 315°).
- Caudal máximo de vertimiento de 202 L/s.[59]
- Densidad del agua residual igual a la densidad del agua natural.

Las variables de diseño del difusor fueron determinados según los siguientes criterios:

- La longitud del emisor fue seleccionada con 100 m, lo que permite lograr la profundidad de descarga necesaria para obtener la dilución inicial requerida, y garantiza una distancia de seguridad de la orilla para evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla.
- El diámetro del emisor debería permitir una velocidad de flujo en su interior de entre 0,6 y 6 m/s. Con un caudal máximo de 202 L/s y una velocidad de flujo máxima de 6 m/s, el diámetro del emisor debería ser de 207 mm; por lo tanto, se utilizará un emisor con un diámetro interno de 235 mm (HDPE-DN250).
- La altura de descarga sobre el fondo se seleccionó con 0,5 m, dado que no existe el riesgo de que el orificio sea cubierto con sedimentos, tal como puede ocurrir en el mar o en proximidad de la desembocadura de ríos.
- La profundidad de descarga se determinó con el modelo de simulación con la finalidad de obtener la dilución inicial requerida: 3,6 m.
- El orificio único tendrá el mismo diámetro del emisor: 235 mm.
- El eje del emisor será colocado en perpendicular a la línea de orilla (descarga orientada al sur y ángulo horizontal de descarga de 270°).
- Ángulo vertical de descarga: con la finalidad de lograr la dilución requerida (S_{max}), se ha realizado un gran número de corridas del modelo, variando iterativamente el ángulo vertical de descarga, que resultó en una dilución inicial máxima con un ángulo de 5° (eje del orificio inclinado con 5° sobre el plano horizontal).
- Ángulo horizontal de descarga: 270° (eje del orificio orientado al sur y al centro de la laguna y en perpendicular a la orilla).

El modelo numérico demostró que un emisor subacuático con un orificio único con las características indicadas brinda una dilución inicial de 39, que es mayor que la dilución requerida de 12 para el cumplimiento del ECA-Agua.

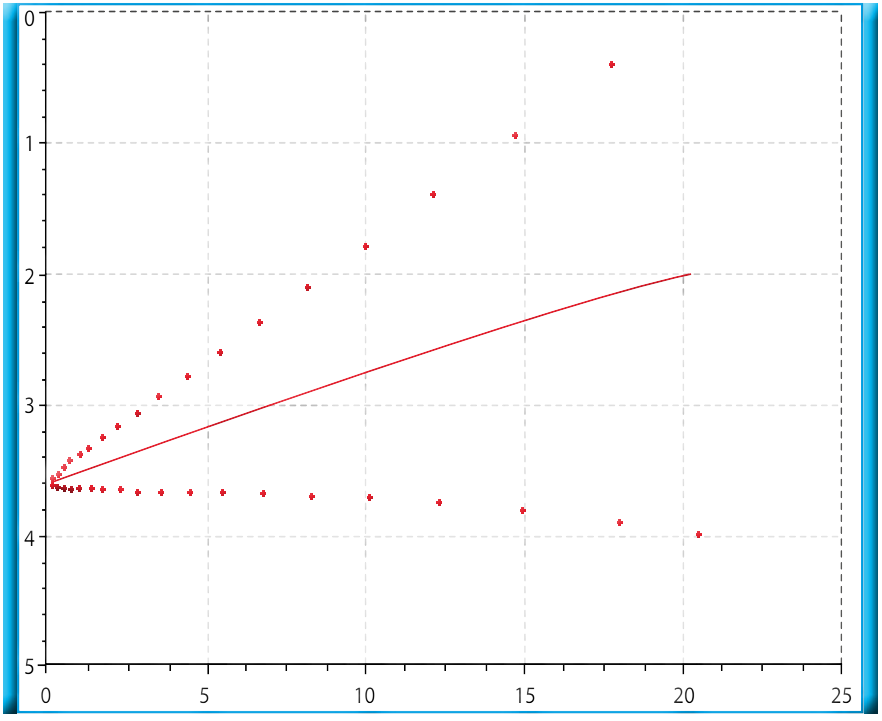
59 Caudal máximo calculado para el mes marzo de 2011 (242 L/s) menos el caudal reusado en la planta concentradora (40 L/s).

6. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN MÁXIMA DE LA ZONA DE MEZCLA

La extensión máxima de la zona de mezcla fue calculada mediante el modelo de simulación numérico, aplicando el diseño del emisor subacuático detallado en el acápite antecedente, y las corrientes horizontales en el cuerpo natural de agua máximas de 1,2 cm/s, en la dirección de corriente predominante de norte-oeste a sur-este (ángulo horizontal de 315°).

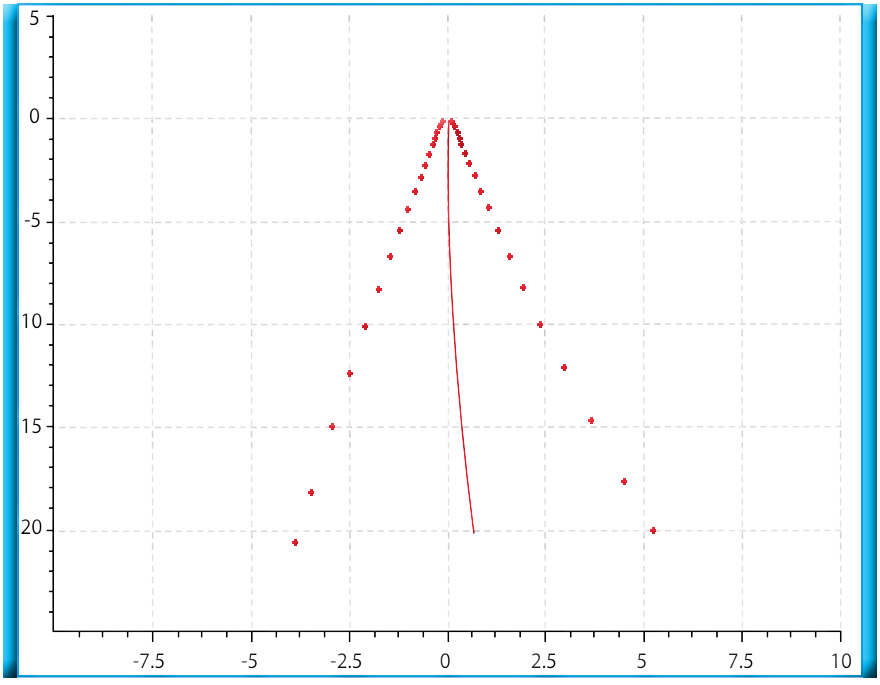
En los gráficos 58 y 59 se representan los resultados de la simulación en las condiciones de corriente máxima.

Gráfico 58. Eje central y límites de la pluma de aguas residuales (profundidad vs. distancia)



La simulación en las condiciones de corriente máxima demuestra que las aguas residuales descargadas en un ángulo de 5° sobre el plano horizontal se mezclan con el agua natural, formando una pluma que cubre todo el perfil vertical del cuerpo de agua. En una distancia de 20 m, la pluma alcanza la superficie del cuerpo de agua, punto que corresponde a la extensión máxima de la zona de mezcla.

Gráfico 59. Vista plana de la pluma de aguas residuales



La vista plana demuestra que la pluma se expande lateralmente mientras las aguas residuales se mueven en dirección sur, siendo derivada por la corriente ligeramente en dirección este. En la distancia de la extensión máxima de la zona de mezcla (20 m), la pluma alcanza un ancho de 9 m aproximadamente.

Considerando que el orificio está ubicado a una distancia de 100 m de la orilla, y que el eje de la descarga está orientado al sur y al centro de la laguna, la zona de mezcla no se acercará más que 50 m a la orilla, lo que garantiza evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla. Asimismo, hasta una distancia de 50 m desde el límite de la zona no se utiliza el agua como tomas para uso poblacional o agrícola, áreas de actividades recreativas de contacto primario o áreas de acuicultura. Por lo tanto, no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla indicada.

7. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

A continuación se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 82. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida del dispositivo de descarga	Caudal, pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas (MEH), cianuro total, hierro disuelto, cromo hexavalente, metales1, sólidos disueltos totales, cianuro libre, nitrógeno total	Semanal[2]: pH,SST Quincenal[2]: CN Mensual[2]: A y g, metales Semestral[3]: sólidos disueltos totales, cianuro libre, nitrógeno total	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 83. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PROFUNDIDAD	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL[3]	COORDENADAS – UTM (WGS84)		
	NOMBRE	CAT. ECA					ZONA	NORTE	ESTE
L-1	Laguna XXXXX	4	25 m al sur del difusor subacuático	Superficie[4]	pH[5], temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, SST, SDT, cianuro libre, nitrógeno total, cromo hexavalente, metales[1] y control visual de la ausencia de película visible de aceites y grasas	Semestral	XX	XXXXX	XXXXX
L-2	Laguna XXXXX	4	25 m al este del difusor subacuático	Superficie[4]		Semestral	XX	XXXXX	XXXXX
L-3	Laguna XXXXX	4	25 m al oeste del difusor subacuático	Superficie[4]		Semestral	XX	XXXXX	XXXXX
L-4	Laguna XXXXX	4	25 m al norte del difusor subacuático	Superficie[4]		Semestral	XX	XXXXX	XXXXX

1 Los metales considerados en la categoría ECA-Agua 4, Lagunas y lagos, determinados con ICP, son: arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc.

2 La frecuencia de control del efluente ha sido establecida en conformidad con el D.S. Nº 010-2010-MINAM, que dispone que, hasta la entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos, se deberá aplicar la frecuencia de monitoreo establecida en el artículo 7 de la R.M. Nº 011-96-EM/VMM publicada por el Ministerio de Energía y Minas, que establece la frecuencia en función del volumen diario de aguas residuales vertidas por día: $V_{diario,medio}$ = Caudal medio x 3600 segundos x 24 horas / 1000 L/m^3 = 60 x 3600 x 24 / 1000 = 5 184 m^3. Valor que está en el rango > 300 m^3/día y resulta en una frecuencia semanal para pH y SST, quincenal para CN y mensual para aceites y grasas y metales.

3 La frecuencia de control en el cuerpo receptor ha sido establecida en conformidad con la *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas*, publicada por la Autoridad Nacional del Agua, que establece la frecuencia en función del volumen anual de aguas residuales vertidas: V_{anual} = Caudal medio de AR x 365 días = 60 L/s x 3600s x 24h x 365 días / 1000L = 1,9 M m^3. Valor que está en el rango 0,3-3 M m^3 y resulta en una frecuencia semestral.

4 Ya que el modelo numérico demostró que la pluma alcanza la superficie hasta antes del límite de la zona de mezcla, las muestras serán tomadas en la superficie solamente.

5 Dado que la caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que el parámetro pH incumple el ECA-Agua (véase el numeral VI.6.2.6) debido a las características geológicas de la microcuenca hidrográfica, que son marcadas por la intensa mineralización de la zona, la cual presenta mantos sulfurosos que, en contacto con las aguas subterráneas, producen la reducción del pH, se deberá considerar al pH de excepción para la aplicación de los ECA-Agua, de conformidad con lo establecido en el artículo 6 del D.S. N° 004-2017-MINAM. Por lo tanto, los resultados del control del pH en el cuerpo receptor no serán evaluados con el ECA-Agua correspondiente.

La toma de muestra del efluente y en el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes y Aguas Superficiales en las Actividades Minero Metalúrgicas, publicado por el Ministerio de Energía y Minas, y la R.J. N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, respectivamente.

Adicionalmente, considerando que la eficiencia del sistema de tratamiento depende altamente de la regulación del pH, se prevé la instalación de un sistema de monitoreo automático del pH y de la turbiedad.

Este sistema abarca los siguientes elementos:

- Sensores del pH instalados en las entradas de los tres clarificadores y en la salida de la PTAR antes de la descarga al cuerpo receptor.
- Sensor de la turbiedad instalado en la salida de la PTAR antes de la descarga al cuerpo receptor.
- Panel de control que permite:
  - Registro y representación de los datos medidos.
  - Control y optimización automática de la dosificación de los reactivos (lechada de cal y ácido sulfúrico) en función de los valores de pH registrados.
  - Desactivación automática del bombeo de aguas residuales crudas desde el depósito de relaves, cuando el pH o la turbiedad superen el rango de tratamiento óptimo, lo que indica una falla del sistema o el agotamiento de los reactivos.

El sistema de monitoreo automático, además de garantizar la eficiencia del tratamiento y el cumplimiento de las normas ambientales, permitirá reducir los costos de tratamiento, mediante la optimización de la dosificación de los reactivos.

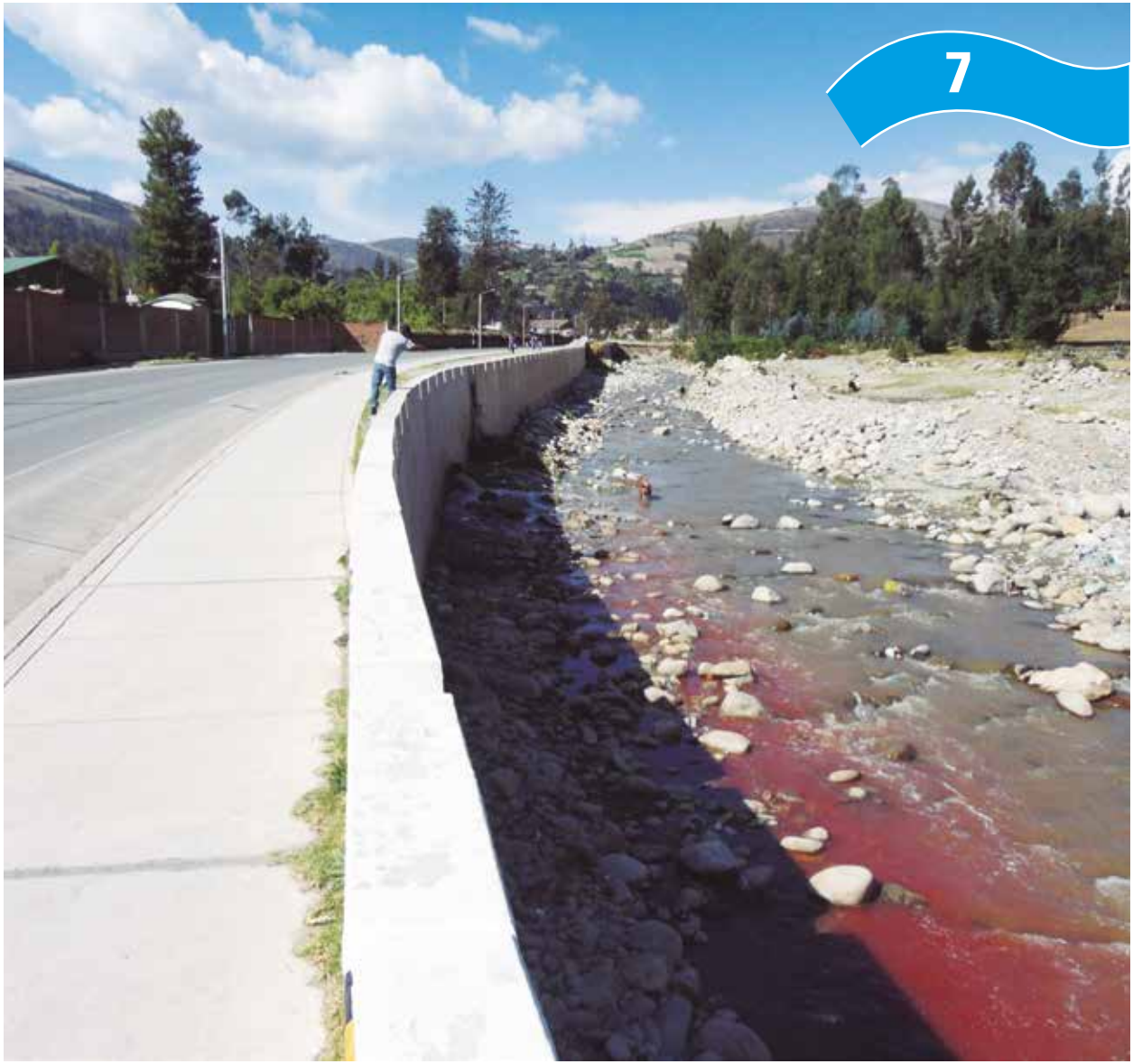
8. CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc.
- Se han evaluado dos alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables: la reducción del caudal de vertimiento mediante reúso parcial de las aguas residuales tratadas, y la reducción de las concentraciones a través de un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos. El análisis técnico-económico indicó que una mayor eficiencia en el tratamiento obligaría a la modificación del sistema de tratamiento inicialmente propuesto, lo que resultaría en un incremento significativo de los costos de construcción y operación. Por lo tanto, se descarta esta posibilidad y se propone el reúso parcial de las aguas residuales tratadas en la planta concentradora del mineral.
- El reúso de las aguas residuales tratadas en las operaciones de la planta concentradora con un caudal constante de 40 L/s elimina el riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua del parámetro cadmio. Sin embargo, también en esta alternativa queda un riesgo de incumplimiento de los parámetros arsénico, cobre, mercurio, plomo y zinc, y estos parámetros deberían ser controlados mediante la optimización de la operación del sistema de tratamiento de aguas residuales. Con tal fin, se instalará un sistema de monitoreo automático del pH y de la turbiedad en las diferentes etapas de tratamiento y antes de la descarga de las aguas residuales. Este sistema permitirá optimizar de forma automatizada la dosificación de los reactivos y la eficiencia de tratamiento.0
- El efluente no deberá superar los valores medios y máximos, para poder cumplir con la normatividad ambiental. (ver tabla pág. 291)
- Asimismo, el caudal del vertimiento no debería superar un promedio anual de 60 L/s y un máximo de 202 L/s, para poder cumplir el ECA-Agua en el largo plazo y en el límite de la zona de mezcla.
- La descarga será realizada a través de un emisor subacuático de una longitud de 100 m con un difusor de orificio único, orientado hacia el sur y en un ángulo de 5° sobre el plano horizontal. Este emisor brinda una dilución inicial mínima de 1:31, lo que permite cumplir con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla, siempre y cuando el caudal y las concentraciones en el efluente no excedan los siguientes valores.

- La zona de mezcla tiene una extensión máxima de 20 m en dirección norte-sur y de 9 m en dirección este-oeste y no se acerca más que 50 metros a la orilla, lo que garantiza evitar el contacto de las personas y animales terrestres con las aguas de la zona de mezcla.

PARÁMETROS	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE EN EL EFLUENTE TRATADO	NORMATIVIDAD QUE RIGE
pH	---	6-9	LMP
Aceites y grasas	mg/L	20	LMP
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50	LMP
Sólidos disueltos totales	mg/L	4 486	ECA
Cianuro total	mg/L	1,0	LMP
Cianuro libre	mg/L	0,29	ECA
Nitrógeno total	mg/L	21	ECA
Arsénico	mg/L	0,08	ECA
Bario	mg/L	8,86	ECA
Cadmio	mg/L	0,05	LMP
Cobre	mg/L	0,27	ECA
Cromo hexavalente	mg/L	0,10	LMP
Hierro (disuelto)	mg/L	2,0	LMP
Mercurio	mg/L	0,0013	ECA
Níquel	mg/L	0,29	ECA
Plomo	mg/L	0,01	ECA

- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en cuatro puntos de control establecidos a 25 m al sur, norte, este y oeste del difusor. Las muestras serán tomadas en la superficie y en el fondo, a 50 cm del sustrato. El control del efluente será realizado con una frecuencia semanal, y en el cuerpo receptor, semestral. De conformidad con el D.S. N° 004-2017-MINAM, se excluye el parámetro pH del control en el cuerpo receptor, ya que incumple el ECA-Agua por las condiciones naturales de la zona.


7

Vertimiento de aguas residuales de una curtiembre a una quebrada

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se describen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- Curtiembre que procesará 200 t de cuero de bovinos y 50 t de cuero de equinos al año.
- Los procesos de curtido son los siguientes:
  - Remojo: rehidratación de la piel y eliminación de la sal y otros elementos como sangre, excretas y suciedad en general.
  - Pelambre: disolución del pelo utilizando cal y sulfuro de sodio.
  - Desencalado: lavado de la piel para remover la cal y luego aplicar productos neutralizantes.
  - Descarnado: eliminación mecánica de la grasa natural y del tejido.
  - Purga enzimática: eliminación de las proteínas no estructuradas y limpieza de la flor, la que se traduce en la lisura de esta y le confiere mayor elasticidad.
  - Piquelado: preparación química de la piel para el proceso de curtido, mediante la utilización de ácido fórmico y sulfúrico principalmente, que permite la difusión del curtiente hacia el interior de la piel sin que se fije en las capas externas del colágeno.
  - Curtido: estabilización de la estructura de colágeno que compone al cuero, usando productos químicos naturales o sintéticos. Se usa una variedad de productos químicos, siendo el cromo el más importante.
  - Procesos mecánicos de poscurtación: desaguado mecánico, dividido o partido del cuero para separar el lado flor del lado carne de la piel, raspado para dar espesor definido y homogéneo al cuero, y recortes de las partes del cuero que no van a tener una utilización posterior.
  - Procesos húmedos de poscurtación: neutralizado, recurtido, teñido y engrasado del cuero.
  - Secado y terminación: desaguado, secado y aplicación de las capas de terminación (aplicación de anilinas o pigmentos dispersos en un binder, típicamente caseína o polímeros acrílicos o poliuretánicos, lacas nitrocelulósicas o uretánicas).

- La planta de tratamiento de las aguas residuales industriales abarca las siguientes etapas:

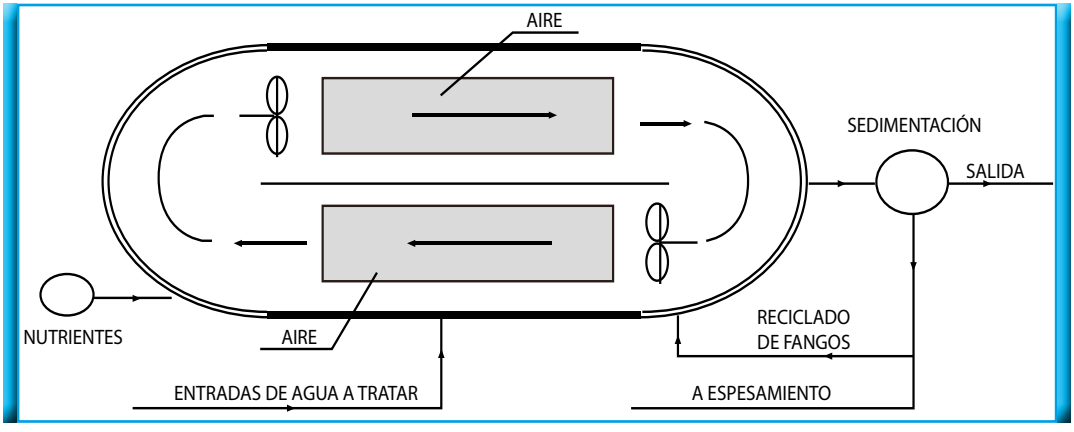
  – Desulfuración de pelambres y caleros mediante la oxidación catalítica con sales de manganeso, que consiste en inyectar microburbujas al efluente en presencia de sulfato de manganeso como catalizador, con lo que se logra reducir el S-2 de 1 900 ppm hasta 0.

  – Tratamiento del cromo: adicionalmente al reciclaje de licor de cromo en el proceso de curtido, se prevé su precipitación y posterior redisolución; el método se aplica a los baños residuales recogidos aparte. Se precipita el cromo en forma de hidróxido con un álcali, se separa el precipitado y se redisuelve con ácido sulfúrico.

  – Tratamiento biológico: una vez eliminados del efluente el sulfuro y el cromo, el agua residual resultante tiene un nivel de toxicidad bajo, permitiendo un tratamiento biológico para la reducción de la carga orgánica y del nitrógeno amoniacal. El tratamiento biológico abarca los siguientes elementos:

    ■ Ecualización y homogeneización: Todas las aguas residuales industriales del proyecto, que principalmente se originan del remojo y el desencalado, serán recolectadas y dirigidas a un tanque agitado, desde donde serán bombeadas a la planta de tratamiento. Antes de la entrada al tanque, las aguas residuales reciben el tratamiento físico mediante tamizado, separador de grasas y sedimentación primaria.

Gráfico 60. Esquema de una piscina de aireación tipo carrusel e instalaciones anexas



- Piscina de aireación a flujo continuo.
- Sedimentación secundaria.

- El agua residual industrial tratada será descargada a la quebrada XXX, que tiene la categoría ECA-Agua 3, Riego de vegetales y bebidas de animales.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

De conformidad con la tabla 2, acápite I los parámetros por evaluarse para el caso de aguas residuales industriales de curtiembre vertidas a un cuerpo de agua de categoría ECA-Agua 3 son los siguientes:

- Oxígeno disuelto
- Aceites y grasas
- Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO_5)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Sulfuros
- Sulfatos
- Cromo hexavalente
- Fenoles
- Coliformes termotolerantes.

No se deberá evaluar parámetros adicionales, ya que en los procesos de curtiembre no se utilizan insumos químicos que contengan otras sustancias consideradas en el D.S. Nº 004-2017-MINAM (véanse las hojas de seguridad de los insumos químicos usados, anexados al EIA). Tampoco se deberá evaluar los nitratos y los fosfatos, dado que la quebrada no tributa a un cuerpo de agua léntico.

2.2 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento proyectado de una PTAR futura, las concentraciones máximas corresponden a aquellas indicadas en los Límites Máximos Permisibles.

Tabla 84. Concentraciones máximas del efluente

PARÁMETROS	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE CRUDO [1]	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE[2]	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE TRATADO	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO REQUERIDA
Oxígeno disuelto	mg/L	0[3]	-	0	-
pH[1]	--	3-10	5,0-8,5	5,0-8,5	Neutralización
Temperatura[1]	°C	<35	35	35	0%
Aceites y grasas[1]	mg/L	194-1917	20	20	90%-99%
Sólidos suspendidos totales[1]	mg/L	1029-12917	30	30	97%-99,8%
DBO5[1]	mg/L	794-7167	30	30	96%-99,6%
DQO[1]	mg/L	1941-19167	50	50	97%-99,7%
Sulfuros[1]	mg/L	35-417	0,5	0,5	99%-99,9%
Sulfatos	mg/L	265-9167	-	B. M.	B. M.
Cromo hexavalente[1]	mg/L	11-3865	0,2	0,2	98%-99,99%
Cromo total[1]	mg/L	53-5946	0,5	0,5	99%-99,99%
Nitrógeno amoniacal[1]	mg/L	124-1417	10	10	92%-99,3%
Fenoles	mg/L	0,4-100	-	B.M.	B. M.
Coliformes termotolerantes[1]	NMP/100mL	1E+2-1E+5	1000	1000	0%-99%

1 Parámetro regulado con un LMP (D.S. Nº 003-2002-PRODUCE).
2 Fuente: Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector curtidos, 2003.
3 LMP para actividad nueva (D.S. Nº 003-2002-PRODUCE).
4 Se supone una concentración de oxígeno disuelto en el efluente de 0 mg/L, lo que es una suposición conservadora.

B. M.: la concentración en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua será determinada mediante balance de masas.

2.3 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas

El consumo de agua y la generación de aguas residuales es muy variable de una industria de curtiembre a otra, pero por lo general oscila entre los 20 m^3 y los 40 m^3 por tonelada de piel vacuna, y entre 130-250 litros por piel ovina.[60]

60 Fuente: Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector curtidos, 2003.

Para este proyecto se suponen valores conservativos de 40 m^3/ton_{vacuna} y 250 m^3/ton_{ovina} . Considerando que al año se procesarán 200 t de cuero de bovinos y 50 de cuero de equinos, el volumen anual de aguas residuales se calcula con 20 500 m^3. El agua será tratada en una planta de flujo continuo y descargada de forma constante al cuerpo receptor; el caudal medio de descarga será 0,9 L/s (descarga en los días de trabajo solamente) y el máximo 1,8 L/s, suponiendo una relación de caudal máximo y mínimo de 1:2.

$$Q_{vert} = 1,8 \text{ L/s}$$

2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento primario (criba media y desarenador) eliminarán los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor fueron determinadas en la época de estiaje, que es el periodo más crítico en lo que concierne a la capacidad de asimilación de la carga contaminante.

Tal como evidencia la tabla 85, que contiene las precipitaciones mensuales históricas registradas en la estación meteorológica XXX, ubicada a 4 km del área de proyecto, el mes con las menores precipitaciones mensuales es junio.

Tabla 85. Precipitación mensual histórica y promedio multianual

Precipitación mensual histórica (mm)

ESTACIÓN: XXX
CUENCA: XXX
FUENTE: SENAMHI

LATITUD: XX^0 XX´XX´´
LONGITUD: XX^0 XX´XX´´
ELEVACIÓN: XX m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2009	83.7	128.8	91.1	49.4	35.7	1.7	14.0	21.0	18.6	107.4	19.5	66.4
2010	122.4	83.6	95.9	28.3	28.4	10.8	42.0	2.8	34.3	41.5	86.9	51.6
2011	69.3	123.3	95.2	24.4	16.9	3.5	31.9	30.4	77.1	82.5	65.3	86.8
2012	73.5	79.6	98.0	50.5	23.0	0.0	0.4	42.0	38.5	45.0	63.8	97.3
2013	28.3	132.8	69.6	12.0	10.4	21.9	9.3	6.4	45.5	55.9	90.7	107.1
PROMEDIO	75.4	109.6	90.0	32.9	22.9	7.6	19.5	20.5	42.8	66.5	65.2	81.8

Considerando el régimen multianual de las precipitaciones, se puede suponer que el cuerpo receptor en el mes junio tiene el caudal mínimo. Por lo tanto, el día 17 de junio de 2013 se determinaron las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor en la ubicación del vertimiento proyectado, con los siguientes resultados:

- Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento: $W_{min} = 1,7$ m.
- Profundidad media de la quebrada aguas abajo del vertimiento: $d = 0,13$ m.
- Velocidad de flujo media[61]: $u = 1,0$ m/s.
- Caudal instantáneo: $Q_x = 180$ L/s.
- Factor de irregularidad del cauce: $c = 0,6$ (cauce natural con serpentear moderado).

La pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento fue determinada mediante GPS, estableciendo la diferencia entre la altitud del punto de vertimiento proyectado y de un punto ubicado 500 m aguas abajo; y la diferencia de altitud medida son 15,8 m. Con estos datos se calcula la pendiente del cauce con:

$$s = 15,8 / 500 = 0,0316 \text{ m/m}$$

4. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento se aplica el *método simplificado* desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.

Dado que el vertimiento será realizado en la orilla del curso de agua, la longitud de la zona de mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 \, u}{2 \, \pi \, Dy} = \frac{1,7^2 \, x 1,0}{2 \, x \, 3,1416 \, x \, 0,01566} = ,4 \text{ m} \approx 30 \text{ m}$$

Donde:

D_y: Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, que se calcula con:

$$D_y = c \, x \, d \, x \, u^* = 0,6 \, x \, 0,13 \, x \, 0,2007 = 0,01566$$

u^*: Velocidad de corte en m/s, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \, x \, d \, x \, s)} = \sqrt{(9,80665 \, x \, 0,13 \, x \, 0,0316)} = 0,2007$$

61 Promedio de todas las mediciones realizadas con el correntómetro en la sección donde se determinó el caudal.

4.1 Restricciones de la zona de mezcla

No es necesario restringir, es decir, limitar la extensión máxima de la zona de mezcla, dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- No existen usos primarios, poblacionales, agrícolas, industriales u otros de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia de hasta dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla (60 m).
- No existe un cuerpo de agua léntico natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento.
- No existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento a una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (30 m).
- La longitud de la zona de mezcla no es mayor de 500 m.

5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

Dado que no se dispone de una serie histórica de datos hidrológicos, el caudal del cuerpo receptor ha sido determinado en la época de estiaje en una medición única (véase el acápite VI.7.3, Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor).

Este caudal instantáneo –Q_x– se corrige según la siguiente fórmula:

$$Q_{RH,crit} = \frac{Qx}{2} = \frac{180\ L/s}{2} = 90\ L/s$$

donde 2 es el factor de seguridad, que considera la variabilidad multianual de los caudales en época de estiaje y la inseguridad de la información basada en una medición única.

Este caudal crítico de dilución no debe ser reducido adicionalmente, dado que no es necesario restringir la extensión de la zona de mezcla, tal como se ha demostrado en el acápite antecedente.

6. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Se han determinado las características químico-físicas del cuerpo receptor a través de la toma de muestra de agua y análisis en un laboratorio cuyos ensayos analíticos están acreditados ante INACAL.

La toma de muestra fue realizada en la ubicación del vertimiento proyectado, el día 17 de junio de 2013, correspondiente a la época de estiaje. Por lo tanto, las concentraciones determinadas corresponden al periodo más crítico en lo que se refiere a la capacidad de asimilación de la carga contaminante.

Se analizaron los parámetros potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, definidos en el acápite VI.7.2.1.

Tabla 86. Concentraciones en el cuerpo natural de agua determinadas en la época de estiaje

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/AÑO	17/6/2013	ECA-AGUA CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	
Caudal del cuerpo receptor	L/s	180	
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	
Nombre laboratorio		XXXX SAC	
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	
Coordenada norte (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	
Coordenada este (UTM-WGS84)	m	XXXXXX	
Temperatura	°C	16,2	---
Oxígeno disuelto***	mg/L	7,95	5 (bebida); 4 (riego)
Aceites y grasas	mg/L	<1,7	1,0
DBO_5	mg/L	<6,0	15
DQO	mg/L	11	40
Sulfuros	mg/L	<0,006	0,05
Sulfatos	mg/L	4,5	500 (bebida); 300 (riego)
Cromo hexavalente	mg/L	<0,003	1 (bebida); 0,1 (riego)
Fenoles	mg/L	<LDA	0,001
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	330	1000 (riego tallo bajo y bebida) 2000 (riego tallo alto)

LDA: Límite de detección analítica.

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que ninguno de los parámetros evaluados excede los ECA-Agua de la categoría 3.

7. BALANCE DE MASA

Se calculan las concentraciones de los parámetros aguas abajo de la zona de mezcla mediante el balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Dado que C_0 para la mayoría de parámetros, a excepción de NO_3 y O_2, es la mayor concentración luego de la zona de mezcla, la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua se reduce a:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0: Concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{RH}: Concentración en el cuerpo receptor, indicada en el acápite VI.7.6.

$C_{ver}t$: Concentración máxima en las aguas residuales tratadas, indicada en acápite VI.7.2.2.

$Q_{RH,crit}$: Caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicado en el acápite VI.7.5.

Q_{vert}: Caudal máximo del vertimiento, indicado en el acápite VI.7.2.3.

C_{ECA}: ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

Tabla 87. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	Q_{VERT}	C_{VERT}	$Q_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_0	C_{ECA}	EVALUACIÓN
Aceites y grasas	1,8 L/s	20 mg/L	90 L/s	0,0 mg/L	0,4 mg/L	1,0 mg/L	Cumple ECA-Agua
DBO_5	1,8 L/s	30 mg/L	90 L/s	0 mg/L	1 mg/L	15 mg/L	Cumple ECA-Agua
DQO	1,8 L/s	50 mg/L	90 L/s	11 mg/L	12 mg/L	40 mg/L	Cumple ECA-Agua.
Sulfuros	1,8 L/s	0,5 mg/L	90 L/s	0 mg/L	0,01 mg/L	0,05 mg/L	Cumple ECA-Agua
Sulfatos	1,8 L/s	B. M.	90 L/s	5 mg/L	n.d.	300 mg/L	B. M.
Cromo hexavalente	1,8 L/s	0,2 mg/L	90 L/s	0 mg/L	0 mg/L	0,1 mg/L	Cumple ECA-Agua
Cromo total	1,8 L/s	0,5 mg/L	90 L/s	0 mg/L	0,01 mg/L	0,2 mg/L	Cumple ECA-Agua
Fenoles	1,8 L/s	B. M.	90 L/s	0 mg/L	n.d.	0,001 mg/L	B. M.
Coliformes termotolerantes	1,8 L/s	1,000 NMP/100mL	90 L/s	330 NMP/100mL	343 NMP/100mL	1000 NMP/100mL	Cumple ECA-Agua

B. M.: la concentración admisible en el efluente que permitirá el cumplimiento de los ECA-Agua será determinada mediante balance de masas.

El balance de masa demuestra que todos los parámetros cumplirán con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla. Sin embargo, existen algunos que no se pueden evaluar, dado que no están reglamentados con un Límite Máximo Permisible y no es posible estimar su concentración en el efluente.

Para estos parámetros se aplica la ecuación de mezcla con la finalidad de determinar la concentración máxima admisible en el efluente que permitirá cumplir el ECA-Agua en el cuerpo receptor:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

La concentración máxima admisible será un criterio de diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 88. Concentraciones máximas admisibles para poder cumplir los ECA-Agua en el cuerpo receptor de sulfatos y fenoles

PARÁMETRO	Q_{VERT}	$Q_{RH,CRIT}$	C_{RH}	C_{ECA}	C_{VERT}
Sulfatos	1,8 L/s	90 L/s	5 mg/L	300 mg/L	15 075 mg/L
Fenoles	1,8 L/s	90 L/s	0,000 mg/L	0,001 mg/L	0,051 mg/L

Ambas concentraciones máximas admisibles muy probablemente podrán ser cumplidas después del sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto. Sin embargo, si el monitoreo del efluente demostrara concentraciones mayores, se prevé optimizar el proceso productivo con el objetivo de reducir la carga del compuesto crítico en la fuente.

8. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE OXÍGENO DISUELTO AGUAS ABAJO DE LA ZONA DE MEZCLA

El oxígeno disuelto llega a la concentración mínima aguas abajo, y distante de la zona de mezcla, debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de materia orgánica y a la nitrificación del nitrógeno amoniacal, para luego recuperarse a través de la reaeración y la producción de oxígeno de las algas.

Para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua se desarrolla a continuación la evaluación simplificada del cumplimiento del ECA-Agua para oxígeno disuelto, con la metodología propuesta por Hydroscience (1971).

Esta evaluación se realiza para las condiciones más críticas, las cuales se encuentran en la época de estiaje, debido a los bajos caudales disponibles para la dilución y las temperaturas del agua relativamente altas.

El método simplificado corresponde a la siguiente inecuación:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

Donde:

$ECAO_2$: ECA-Agua de oxígeno disuelto en la categoría 3: 5,0 mg O_2/L.

CO_2,RH : Concentración de oxígeno disuelto medida en el cuerpo receptor en el periodo de estiaje: 7,95 mg O_2/L.

D_C: Déficit máximo de oxígeno disuelto, que se calcula con Hydroscience (1971):

$$D_C = LO \times \phi^{\frac{\phi}{1-\phi}} = 0{,}98 \times 20{,}2^{\frac{20{,}2}{1-20{,}2}} = 0{,}0415 \text{ mg/L}$$

L_0: Demanda de oxígeno disuelto debido al consumo de materia orgánica (mg O_2/L), que se calcula con:

$$L_0 = \frac{DBO_{U,vert} \times Q_{vert} + DBO_{U,RH} \times Q_{RH,crit}}{(Q_{vert} + Q_{RH,crit})} = \frac{50 \times 1{,}8 + 0 \times 90}{(1{,}8 + 90)} = 0{,}98 \text{ mg/l}$$

$DBO_{U,vert}$: Demanda bioquímica de oxígeno última del vertimiento: dado que se trata de un vertimiento proyectado, y la DBO_U no puede ser determinada en laboratorio, se supone que la DBO última corresponde al Límite Máximo Permisible de la DQO. Esta suposición es conservadora, dado que la DQO abarca también compuestos orgánicos no biodegradables:

$$DBO_{U,vert} = LMP_{DQO} = 50 \text{ mg/L}$$

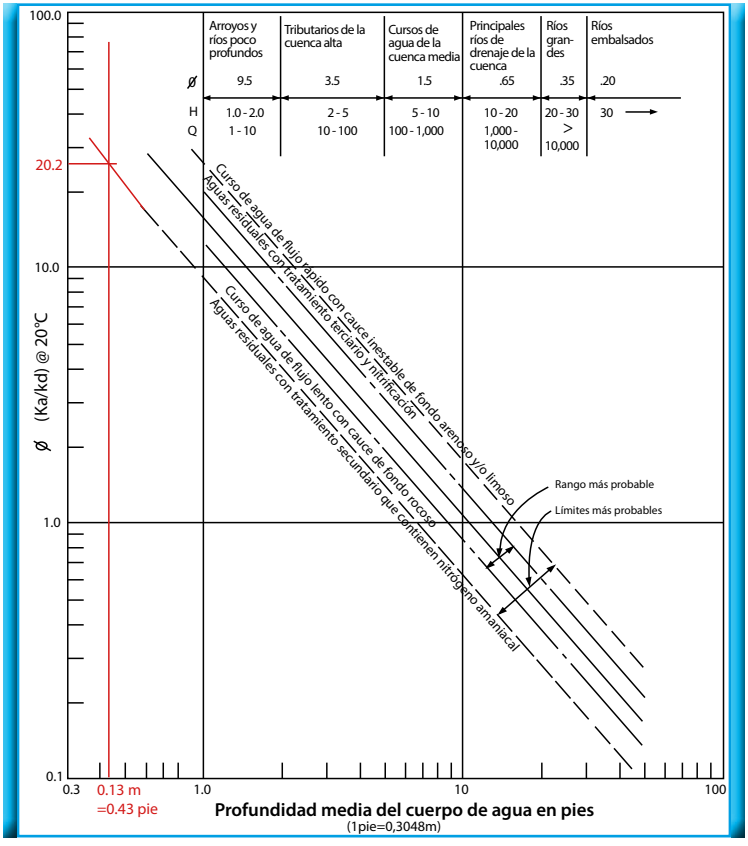
$DBO_{U,RH}$: Demanda bioquímica de oxígeno última del cuerpo de agua determinada en un ensayo de laboratorio de veinte días. En el caso específico en el que el análisis de DBO_5 ha demostrado la ausencia de carga orgánica en el cuerpo receptor, la $DBO_{U,RH}$ es supuesta 0 mg/L.

$Q_{RH,crit}$: Caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución: 90 L/s (véase el acápite VI.7.5).

Qvert: Caudal máximo del vertimiento: 1,8 L/s (véase el acápite VI.7.2.3).

Φ: Tasa de asimilación definida con K_a/K_d (tasa de reaeración entre tasa de desoxigenación carbonácea), que se determina en función de la profundidad promedio del cuerpo natural aplicando el gráfico siguiente y considerando las condiciones más críticas (curso de agua de flujo lento y aguas residuales con tratamiento secundario que contienen nitrógeno amoniacal).

Gráfico 61. Tasa de asimilación de oxígeno disuelto – Φ (Salas & Martino, 1990)



Con estos datos de ingreso se obtiene:

$$ECA_{O2} \leq C_{O2,RH} - D_C$$

$$5{,}0 \leq 7{,}95 - 0{,}0415$$

$$5{,}0 \leq 7{,}91$$

Esto demuestra que la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla ocasionada por la oxidación de la materia orgánica contenida en el efluente será 7,91 mg/L y cumplirá con el ECA-Agua de 5,0 mg/L.

9. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL

Se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 89. Programa de control del efluente

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL	COORDENADAS – UTM ($WGS8_4$)		
				ZONA	NORTE	ESTE
V-1	Salida del dispositivo de descarga	Caudal, pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales, DBO_5, DQO, sulfuros, sulfatos, cromo hexavalente, cromo total, nitrógeno amoniacal, fenoles, coliformes termotolerantes	Semestral 1	XX	XXXXXXX	XXXXXX

Tabla 90. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL	COORDENADAS – UTM ($WGS8_4$)		
	NOMBRE	CAT. ECA				ZONA	NORTE	ESTE
RH-1	Quebrada XXXXX	3	20 m aguas arriba del vertimiento	pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, aceites y grasas, DBO_5, DQO, sulfuros, sulfatos, cromo hexavalente, fenoles, coliformes termotolerantes	Anual en la época de estiaje (junio) [2]	XX	XXXXXXX	XXXXXX
RH-2	Quebrada XXXXX	3	30 m aguas abajo del vertimiento en la misma orilla donde se realiza el vertimiento		Anual en la época de estiaje (junio) [2]	XX	XXXXXXX	XXXXXX

1 La frecuencia de control del efluente ha sido establecida en conformidad con el Protocolo del Monitoreo de Efluentes Líquidos publicado por el Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales con R.M N° 026-2000-MITINCI, que establece un mínimo de dos muestreos por año.

2 La frecuencia de control en el cuerpo receptor ha sido establecida en conformidad con la *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas,* publicada por la Autoridad Nacional del Agua, que establece la frecuencia en función del volumen anual de aguas residuales vertidas: Vanual = 20 500 m^3. Valor que está en el rango de 0 – 300 000 m^3 y resulta en una frecuencia anual.

La toma de muestra del efluente y del el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas, y de conformidad con el protocolo de monitoreo u otras normas establecidas por el Ministerio de la Producción y la R.J. Nº 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de los Cuerpos Naturales de Agua Superficiales, respectivamente.

Dado que la evaluación realizada en el acápite VI.7.8 no indica un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua de oxígeno disuelto, no será necesario establecer un punto de control adicional aguas abajo de la zona de mezcla para el control de las concentraciones de oxígeno disuelto.

CONCLUSIONES

- El vertimiento de aguas residuales industriales tratadas a la quebrada XXX con alta probabilidad no causará un incumplimiento de los ECA-Agua fuera de la zona de mezcla, dado que:

– Las concentraciones en el límite de la zona de mezcla calculadas con el balance de masas en las condiciones más críticas no exceden los ECA-Agua de los parámetros característicos de las aguas residuales vertidas, siempre y cuando el efluente cumpla los Límites Máximos Permisibles.

– La concentración mínima de oxígeno ocasionada por la oxidación de la carga orgánica de las aguas residuales vertidas, determinada con el método simplificado de Hydroscience para las condiciones más críticas, es mayor que el ECA-Agua correspondiente.

- Para poder cumplir con el ECA-Agua de sulfatos y fenoles, su concentración en el efluente no debería superar las siguientes concentraciones máximas admisibles:

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE EN EL EFLUENTE PARA CUMPLIMIENTO DEL ECA-AGUA
Sulfatos	mg/L	15 075
Fenoles	mg/L	0,051

- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en dos puntos de control establecidos a 20 m aguas arriba y a 30 m aguas abajo del vertimiento. No será necesario establecer un punto adicional para el control del oxígeno disuelto, dado que la evaluación no indica un riesgo de incumplimiento del ECA-Agua. Considerando el bajo volumen de aguas residuales vertidas, se realizarán dos (2) tomas de muestra de agua residual tratada y solo una (1) toma de agua natural por año, preferiblemente en el mes junio, cuando el caudal del cuerpo receptor llegue a un mínimo.


8

Vertimiento de aguas residuales de una industria láctea a una quebrada

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se resumen las características del proyecto que tienen relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- Planta de fabricación de leche, cremas, mantequillas, quesos y yogurt, que al año procesará 12 millones de litros de leche.
- Los procesos de la planta son los siguientes:

– Fabricación de leche líquida (crema, entera, parcialmente descremada y descremada), que abarca las siguientes etapas: recepción, almacenamiento en frío, clarificación, pasteurización, homogeneización, desodorización y envasado.

– Fabricación de queso, que abarca las siguientes etapas: recepción de la leche fresca, almacenamiento en frío, clarificación, pasteurización, homogeneización, coagulación, moldeo y prensado, maduración y envasado.

– Fabricación de yogurt, que abarca las siguientes etapas: recepción de la leche fresca, almacenamiento en frío, clarificación, pasteurización, homogeneización, mezcla, maduración y envasado.

– Fabricación de mantequilla, que abarca las siguientes etapas: recepción de la leche fresca, almacenamiento en frío, clarificación, pasteurización, batido, lavado, amasado y envasado.

- La planta operará 264 días al año y 8 horas por día.
- El sistema de tratamiento de aguas residuales industriales será diseñado en función de los resultados de la evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor, dado que no existen Límites Máximos Permisibles para este tipo de aguas residuales.
- El agua residual doméstica generada por los cincuenta trabajadores de la planta será tratada en la planta de aguas residuales industriales. Por lo tanto, deberá ser considerada en la evaluación del impacto en el cuerpo receptor.
- El agua residual industrial tratada será descargada a la quebrada XXX, que tiene la categoría ECA-Agua 3, Riego de vegetales y bebidas de animales. La quebrada tributa a un lago ubicado aproximadamente 40 km aguas abajo del vertimiento.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Determinación del caudal máximo de aguas residuales tratadas vertidas

El mayor volumen de aguas residuales procede del agua de lavado derivada de operaciones de limpieza de equipos, purga de líneas por cambio de producto y etapas de los procesos de pasteurización.

La práctica observada y medida en Chile demuestra que las plantas de procesamiento de leche en la Región Metropolitana generan un volumen de entre 5 y 20 l para cada litro de leche.[62]

En España, la generación de agua residual de las industrias de productos lácteos (excepto helados) oscila entre 0,77 l y 8,75 l por litro de leche recibida.[63]

Considerando que los procesos de producción proyectados son de tipo semiautomatizado, comparables con las tecnologías empleadas en España, se considerará un volumen máximo de 8,75 l de aguas residuales por cada litro de leche recibida.

El caudal máximo de aguas residuales industriales generadas se calcula con el volumen anual de leche recibida y las horas de producción por año según el detalle mostrado en la tabla 91.

Tabla 91. Caudal máximo de aguas residuales industriales

GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	8,75	L/LITRO DE LECHE
Litros de leche procesados por año	12 000 000	L/año
Generación de aguas residuales	105 016 320	L/año
Horas de producción por año	2112	horas/año
Generación de aguas residuales	13,81	L/s

El caudal máximo de aguas residuales domésticas generadas por los trabajadores de la planta se supone con 100 l por trabajador y día.[64] Considerando que en la planta trabajarán cincuenta personas en un horario de ocho horas, el caudal medio de aguas residuales domésticas se calcula con:

100 litros x 50 trabajadores / 8 horas / 3600 segundos = 0,17 L/s

Suponiendo una variación máxima diurna del caudal de aguas residuales de 2,5, el caudal máximo de aguas residuales domésticas se calcula con: 0,17 x 2,5 = 0,43 L/s.

El caudal máximo de aguas residuales industriales y domésticas será de: 13,81 + 0,43 = 14,24 L/s.

62 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana (1988). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Fabricación de productos lácteos.* Santiago.
63 Fuente: Ministerio de Medio Ambiente de España (2005). *Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector lácteo.*
64 Fuente: *Norma Técnica Peruana I.S. 010*: Instalaciones sanitarias para edificaciones. La dotación de agua para industrias con necesidades de aseo es de 100 l por trabajador por día.

2.2 Determinación de la lista de parámetros por evaluarse

La Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector lácteo, publicada en el año 2005 por el Ministerio de Medio Ambiente de ese país, indica que las aguas residuales de la industria láctea contienen los siguientes parámetros característicos:

- Aceites y grasas
- Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO_5)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Nitrógeno (los ECA-Agua categoría 3 consideran los nitratos)
- Fósforo (los ECA-Agua categoría 3 consideran los fosfatos)
- pH variable.

Dado que la quebrada XXX tributa a un lago, ubicado aproximadamente 40 km aguas abajo del vertimiento, se deberá evaluar también los nutrientes (nitratos y fósforo).

En vista de que las aguas residuales tratadas contienen una alta carga orgánica, se deberá evaluar también las concentraciones mínimas de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla.

En virtud de que las aguas residuales tratadas se originan de los procesos industriales y de los servicios higiénicos de la planta, adicionalmente se deberá evaluar los parámetros característicos de las aguas residuales domésticas que, según la tabla 2, capítulo I.2, de la *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas,* son los siguientes:

- Oxígeno disuelto
- Aceites y grasas
- DBO_5
- DQO
- Coliformes termotolerantes

2.3 Determinación de las concentraciones máximas

Dado que se trata de un vertimiento proyectado de una actividad futura, las concentraciones máximas fueron estimadas con base en los valores referenciales indicados en la literatura.

Tabla 92. Concentraciones máximas en las aguas residuales industriales no tratadas

PARÁMETROS	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE INDUSTRIAL NO TRATADO	
		RANGO CARACTERÍSTICO	VALOR MÁXIMO
Oxígeno disuelto	mg/L	0[1]	0
pH	mg/L	2-11[3]	11
Aceites y grasas	mg/L	0-814[3]	814
DBO_5	mg/L	1000-6000[2]	6 000
DQO	mg/L	5-48 592[3]	48 592
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0-1 111[3]	1 111
Nitratos	mg/L	0[4]	0
Fosfatos	mg/L	0-284[3]	284

1 Se supone una concentración de oxígeno disuelto en el efluente de 0 mg/L, lo que es una suposición conservadora.

2 Fuente: Ministerio de Medio Ambiente de España (2005). Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector lácteo.

3 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana (1998). Guía para el control y prevención de la contaminación industrial - Fabricación de productos lácteos. Santiago.

4 Considerando la condición anoxia del efluente, se supone la ausencia de nitratos en el efluente.

Las concentraciones de los parámetros característicos en las aguas residuales domésticas son representadas en la tabla 93.

Tabla 93. Concentraciones máximas en las aguas residuales domésticas no tratadas

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE DOMÉSTICO NO TRATADO			
	APORTE POR HABITANTE EN 24 HORAS	APORTE POR TRABAJADOR EN 12 HORAS	VOLUMEN AR	CONCENTRACIÓN
Oxígeno disuelto				0 mg/L[1]
pH				7-9[2]
Aceites y grasas				50 mg/L[2]
DBO_5	50 g/hab*día[3]	25 g/pers*día	100 L/pers*día[4]	250 mg/L
DQO	100 g/hab*día[3]	50 g/pers*día	100 L/pers*día[4]	500 mg/L
Nitrógeno amoniacal	20 g/hab*día[3]	10 g/pers*día	100 L/pers*día[4]	100 mg/L
Nitratos				0 mg/L [5]
Fosfatos	3 g/hab*día[3]	1,5 g/pers*día	100 L/pers*día[4]	15 mg/L
Coliformes termotolerantes	$2 \cdot 10^{11}$ N.° bacterias /hab*día[3]	$1 \cdot 10^{11}$ N.° bacterias/ pers*día	100 L/pers*día[4]	$1 \cdot 10^{8}$ NMP/100mL

1 Se supone una concentración de oxígeno disuelto en el efluente de 0 mg/L, lo que es una suposición conservadora.

2 Valor estimado.

3 Fuente: Norma Técnica Peruana O.S. 090, Plantas de tratamiento de aguas residuales. Aporte per cápita para aguas residuales domésticas.

4 Fuente: Norma Técnica Peruana I.S. 010, Instalaciones sanitarias para edificaciones: la dotación de agua para industrias con necesidades de aseo es de 100 l por trabajador por día.

5 Considerando la condición anoxia del efluente, se supone la ausencia de nitratos en él.

Considerando que el agua residual industrial y doméstica será tratada en la misma planta de tratamiento de aguas residuales, las características de las aguas residuales mezcladas son determinadas mediante el balance de masas:

$$C_{AR\ mezcla} = \frac{(C_{AR\ ind.} \times Q_{AR\ ind.}) + (C_{AR\ domé.} \times Q_{AR\ domé.})}{(Q_{AR\ ind.} + Q_{AR\ domé.})}$$

Tabla 94. Concentraciones máximas en las aguas residuales mezcladas no tratadas

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DOMÉSTICAS MEZCLADAS				
	CAUDAL AR INDUSTRIALES (L/S)	CONCENTRACIÓN AR INDUSTRIALES (MG/L O NMP/100 ML)	CAUDAL AR DOMÉSTICAS (L/S)	CONCENTRACIÓN AR DOMÉSTICAS (MG/L O NMP/100 ML)	CONCENTRACIÓN AR MEZCLADAS (MG/L O NMP/100 ML)
Oxígeno disuelto	13,81	0	0,43	0	0
pH	13,81	2-11	0,43	7-9	2-11[1]
Aceites y grasas	13,81	814	0,43	50	791
DBO_5	13,81	6 000	0,43	250	5 826
DQO	13,81	48 592	0,43	500	47 140
Nitrógeno amoniacal	13,81	1 111	0,43	100	1 081
Nitratos	13,81	0	0,43	0	0
Fosfatos	13,81	284	0,43	15	276
Coliformes termotolerantes	13,81	0	0,43	$1{,}0 \cdot 10^8$	$3{,}0 \cdot 10^6$

1 Rango corresponde a los valores de pH mínimo y máximo (aguas residuales industriales), dado que el balance de masas no es aplicable para determinar el pH después de la mezcla.

2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Se preverán los sistemas de tratamiento primario (criba media y desarenador) que permitan eliminar los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor fueron determinadas en la época de estiaje, que es el periodo más crítico en materia de capacidad de asimilación de la carga contaminante.

Tal como se evidencia en la tabla 95, que contiene las precipitaciones mensuales históricas registradas en la estación meteorológica XXX, ubicada a 4 km del área de proyecto, el mes con las menores precipitaciones mensuales es junio.

Tabla 95. Precipitación mensual histórica y promedio multianual

Precipitación mensual histórica (mm)

ESTACIÓN: XXX
CUENCA: XXX
FUENTE: SENAMHI

LATITUD: XX^0 XX´XX´´
LONGITUD: XX^0 XX´XX´´
ELEVACIÓN: XX m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2009	83.7	128.8	91.1	49.4	35.7	1.7	14.0	21.0	18.6	107.4	19.5	66.4
2010	122.4	83.6	95.9	28.3	28.4	10.8	42.0	2.8	34.3	41.5	86.9	51.6
2011	69.3	123.3	95.2	24.4	16.9	3.5	31.9	30.4	77.1	82.5	65.3	86.8
2012	73.5	79.6	98.0	50.5	23.0	0.0	0.4	42.0	38.5	45.0	63.8	97.3
2013	28.3	132.8	69.6	12.0	10.4	21.9	9.3	6.4	45.5	55.9	90.7	107.1
PROMEDIO	75.4	109.6	90.0	32.9	22.9	7.6	19.5	20.5	42.8	66.5	65.2	81.8

Considerando el régimen multianual de las precipitaciones, se puede suponer que el cuerpo receptor en el mes junio tiene el caudal mínimo. Por lo tanto, el día 17 de junio de 2013 se determinaron las características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor en la ubicación del vertimiento proyectado, con los siguientes resultados:

- Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 m aguas abajo del vertimiento: $W_{min} = 1,7$ m.
- Profundidad media de la quebrada aguas abajo del vertimiento: $d = 0,13$ m.

- Velocidad de flujo media[65]: u = 1,0 m/s.
- Caudal instantáneo: Q_x = 180 L/s.
- Factor de irregularidad del cauce: c = 0,6 (cauce natural con serpentear moderado).

La pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento fue determinada mediante GPS, y así se estableció la diferencia de altitud del punto de vertimiento proyectado y de un punto ubicado 500 m aguas abajo; la diferencia de altitud medida son 15,8 m. Con estos datos se calcula la pendiente del cauce con:

$$s = 15{,}8 / 500 = 0{,}0316 \text{ m/m}$$

4. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA

Para el cálculo de la extensión de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento, se aplica el método simplificado desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América. Dado que el vertimiento será realizado en la orilla del curso de agua, la longitud de la zona de mezcla se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})2\ u}{2\ \pi\ Dy} = \frac{1{,}72 \text{ x} 1{,}0}{2 \text{ x } 3{,}1416 \text{ x } 0{,}01566} = 29{,}4 \text{ m} \approx 30 \text{ m}$$

Donde:

Dy: Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento, que se calcula con:

$$Dy = c \text{ x } d \text{ x } u^* = 0{,}6 \text{ x } 0{,}13 \text{ x } 0{,}2007 = 0{,}01566$$

u*: Velocidad de corte en metros por segundo, que se calcula con:

$$u^* = \sqrt{(g \text{ x } d \text{ x } s)} = \sqrt{(9{,}80665 \text{ x } 0{,}13 \text{ x } 0{,}0316)} = 0{,}2007$$

4.1 Restricciones de la zona de mezcla

No es necesario restringir, es decir, limitar, la extensión máxima de la zona de mezcla, dado que se cumplen las siguientes condiciones:

- No existen usos primarios, poblacionales, agrícolas, industriales u otros de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla (60 m).
- No existe un cuerpo de agua léntico natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (30 m).
- No existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (30 m).
- La longitud de la zona de mezcla no es mayor de 500 m.

65 Promedio de todas las mediciones realizadas con el correntómetro en la sección donde se determinó el caudal.

5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA LA DILUCIÓN

Dado que no se dispone de una serie histórica de datos hidrológicos, el caudal del cuerpo receptor ha sido determinado en la época de estiaje en una medición única (véase el acápite VI.8.3, Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor).

Este caudal instantáneo –Q_x– se corrige según la siguiente fórmula:

$$Q_{RH,crit} = \frac{Q_x}{2} = \frac{180\ L/s}{2} = 90\ L/s$$

Donde 2 es el factor de seguridad que considera la variabilidad multianual de los caudales en época de estiaje y la inseguridad de la información basada en una medición única.

Este caudal crítico de dilución no debe ser reducido adicionalmente, dado que no es necesario restringir la extensión de la zona de mezcla, tal como se ha demostrado en el acápite precedente.

6. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

Se han establecido las características químico-físicas del cuerpo receptor a través de la toma de muestra de agua y análisis en un laboratorio cuyos ensayos analíticos están acreditados ante INACAL.

La toma de muestra fue realizada en la ubicación del vertimiento proyectado, el día 17 de junio de 2013, que corresponde a la época de estiaje. Por lo tanto, las concentraciones determinadas corresponden al periodo más crítico en lo que concierne a la capacidad de asimilación de carga contaminante.

Se analizaron los parámetros potencialmente presentes en las aguas residuales tratadas, definidos en el acápite VI.8.2.2.

Tabla 96. Concentraciones en el cuerpo natural de agua determinadas en la época de estiaje

FECHA DE MUESTREO	DD/MM/AÑO	17/6/2013	ECA-AGUA CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES
Hora de muestreo	hh:mm	10:30	
Caudal del cuerpo receptor	L/s	180	
Toma de muestra realizada por:		Laboratorio	
Nombre laboratorio		XXXX SAC	
Número del informe de ensayo analítico		XXXX-XX	
Coordenada norte (UTM-WGS8$_4$)	m	XXXXXX	
Coordenada este (UTM-WGS8$_4$)	m	XXXXXX	
Temperatura	°C	16,2	---
Oxígeno disuelto	mg/L	7,95	5 (bebida); 4 (riego)
pH	---	7,82	6,5-8,4 (bebida); 6,5-8,5 (riego)
Aceites y grasas	mg/L	<1,7	1,0
DBO$_5$	mg/L	<6,0	15
DQO	mg/L	<9,0	40
Nitrógeno amoniacal	mg/L	<0,03	---
Nitratos	mg/L	<0,065	50 (bebida); 10 (riego)
Fosfatos	mg/L	<0,061	1
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	31	1000 (riego tallo bajo y bebida) 2000 (riego tallo alto)

La caracterización de la calidad del agua del cuerpo receptor evidenció que ninguno de los parámetros evaluados excede los ECA-Agua de la categoría 3.

7. BALANCE DE MASA

A continuación se calculan las concentraciones de los parámetros aguas abajo de la zona de mezcla mediante el balance de masa:

$$C_0 = \frac{(C_{RH} \times Q_{RH,crit}) + (C_{vert} \times Q_{vert})}{(Q_{RH,crit} + Q_{vert})}$$

Dado que C_0 para la mayoría de parámetros a excepción de NO_3 y O_2 es la mayor concentración luego de la zona de mezcla, la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua se reduce a:

$$C_0 \leq C_{ECA}$$

Donde:

C_0 : Concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento.

C_{RH} : Concentración en el cuerpo receptor, indicada en el acápite VI.8.6.

C_{vert} : Concentración máxima en las aguas residuales tratadas, indicada en el acápite VI.8.2.3.

$Q_{RH,crit}$: Caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicado en el acápite VI.8.5.

Q_{vert} : Caudal máximo del vertimiento, indicado en el acápite VI.8.2.1.

C_{ECA} : ECA-Agua del parámetro en evaluación según la categoría que corresponda.

Tabla 97. Balance de masa y evaluación del cumplimiento del ECA-Agua aguas abajo del vertimiento en el límite de la zona de mezcla

PARÁMETRO	QVERT	CVERT	QRH,CRIT	CRH	C0	CECA	EVALUACIÓN
Aceites y grasas	14,2 L/s	790,9 mg/L	90 L/s	0,0 mg/L	108,1 mg/L	1,0 mg/L	Incumple ECA-Agua
DBO_5	14,2 L/s	5 826 mg/L	90 L/s	0 mg/L	796 mg/L	15 mg/L	Incumple ECA-Agua
DQO	14,2 L/s	47 140 mg/L	90 L/s	0 mg/L	6440 mg/L	40 mg/L	Incumple ECA-Agua
Fosfatos	14,2 L/s	276,11 mg/L	90 L/s	0,00 mg/L	37,72 mg/L	1,00 mg/L	Incumple ECA-Agua
Coliformes termotolerantes	14,2 L/s	$3{,}0 \cdot 10^8$ NMP/100mL	90 L/s	$3{,}1 \cdot 10^1$ NMP/100mL	$4{,}1 \cdot 10^5$ NMP/100mL	$1{,}0 \cdot 10^3$ NMP/100mL	Incumple ECA-Agua

El balance de masa demuestra que todos los parámetros incumplirán con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla. Por lo tanto, a continuación se aplicará la ecuación de mezcla con la finalidad de determinar la concentración máxima admisible en el efluente que permitirá cumplir con el ECA-Agua en el cuerpo receptor:

$$C_{vert} \leq \frac{Q_{RH,crit} \times (C_{ECA} - C_{RH})}{Q_{vert}} + C_{ECA}$$

La concentración máxima admisible será un criterio de diseño de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales. Considerando que la planta de tratamiento está constituida por diferentes tanques y pozas con un gran volumen

de ecualización, en la evaluación de las concentraciones máximas admisibles se supone que las aguas residuales tratadas serán vertidas con un caudal constante, correspondiente al caudal de aguas residuales medio y no máximo.

Tabla 98. Caudal medio de aguas residuales tratadas

GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	105 016 320	L/AÑO
Generación de aguas residuales domésticas	1 320 000	L/año
Días de producción por año	264	días/año
Caudal de aguas residuales total	4,66	L/s

Tabla 99. Concentraciones máximas admisibles en el efluente que permitirán cumplir los ECA-Agua en el cuerpo receptor

PARÁMETROS	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE CRUDO	CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR	ECA-AGUA, CATEGORÍA 3	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE EN EL EFLUENTE TRATADO QUE PERMITIRÁ CUMPLIR CON LOS ECA-AGUA	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO REQUERIDA
Caudal medio	L/s	14,24	90	---	4,66	Ecualización del caudal
Oxígeno disuelto	mg/L	0	7,95	5	(Véase evaluación en el acápite VI.8.8)	
pH	---	2-11	7,82	6,5-8,4	6,5-8,4	Neutralización a pH 6,5-8,4
Aceites y grasas	mg/L	791	0	1	20	97%
DBO_5	mg/L	5 826	0	15	305	95%
DQO	mg/L	47 140	0	40	812	98%
Nitrógeno amoniacal	mg/L	1 081	0	---	(Véase evaluación en el acápite VI.8.7.1)	
Nitratos	mg/L	---	0	10	(Véase evaluación en el acápite VI.8.7.1)	
Fosfatos	mg/L	276	0	1	20	93%
Coliformes termotolerantes	NMP/ 100mL	$3{,}0 \cdot 10^8$	31	1000	$2{,}0 \cdot 10^4$	$-3{,}0 \cdot 10^6$

7.1 Balance de masa de nitrato

Dado que el nitrógeno vertido al cuerpo natural de agua en la hidrólisis y nitrificación se transforma lentamente a nitrato, la concentración máxima ocurre aguas abajo y distante de la zona de mezcla. Por lo tanto, para la evaluación del cumplimiento de los ECA-Agua de este parámetro se aplica una metodología diferente al simple cálculo de dilución.

Dado que la nitrificación del nitrógeno amoniacal a nitratos puede ocurrir solamente si la temperatura es mayor de 10 °C y menor de 30 °C, primero se evalúa la temperatura del agua del cuerpo receptor; en este caso específico, la temperatura del agua fue medida en la época de estiaje con 16,2 °C.

En vista de que la temperatura fluctúa en el rango de 10-30 °C, puede ocurrir nitrificación, y en la evaluación del ECA-Agua de nitratos se deberá considerar la transformación de nitrógeno total a nitratos. Por lo tanto, se evalúa si la carga de nitrógeno total (suma de nitrógeno amoniacal y nitratos) aguas abajo del vertimiento es menor a la carga admisible (ECA para NO_3-N x caudal total):

$$(C(N\text{-}NH_4)_{vert} \times Q_{vert} + C(N\text{-}NH_4)_{RH} \times Q_{RH,crit} + C(NO_3\text{-}N)_{vert} \times Q_{vert} + C(NO_3\text{-}N)_{RH} \times Q_{RH,crit}) < C(NO_3\text{-}N)_{ECA} \times (Q_{vert} + Q_{RH,crit})$$

$$(1081\ mg/L \times 4{,}66\ L/s + 0\ mg/L \times 90\ L/s + 0\ mg/L \times 4{,}66\ L/s + 0\ mg/L \times 90\ L/s) < 10\ mg/L \times (4{,}66\ L/s + 90\ L/s)$$

$$5\ 037\ mg/s < 946\ mg/s$$

Esto significa que la carga de nitrógeno en el efluente excede la capacidad de asimilación de carga del cuerpo receptor, y se incumplirá el ECA-Agua de nitratos. Por lo tanto, se determina la concentración máxima admisible de nitrógeno total en el efluente que permitirá cumplir el ECA-Agua de nitratos:

$$C(N_{tot})_{vert} \leq C(NO_3\text{-}N)_{ECA} + \frac{Q_{RH,crit} \times (C(NO_3\text{-}N)_{ECA} - C(N\text{-}NH_4)_{RH} - C(NO_3\text{-}N)_{RH})}{Q_{vert}}$$

$$C(N_{tot})_{vert} \leq \frac{10 + 90 \times (10 - 0 - 0)}{4{,}66}$$

Considerando que la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente es 1081 mg/L, el sistema de tratamiento deberá permitir una reducción de nitrógeno de 81% para poder cumplir con el ECA-Agua de nitratos en el cuerpo receptor.

8. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE OXÍGENO DISUELTO AGUAS ABAJO DE LA ZONA DE MEZCLA

El oxígeno disuelto llega a la concentración mínima aguas abajo y distante de la zona de mezcla debido al consumo de oxígeno en la oxidación microbiológica de materia orgánica y la nitrificación del nitrógeno amoniacal, para luego recuperarse a través de la reaeración y la producción de oxígeno de las algas.

Para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua se evalúa el cumplimiento del ECA-Agua para oxígeno disuelto, con la metodología simplificada propuesta por Hydroscience (1971).

Esta evaluación se realiza para las condiciones más críticas, las cuales se encuentran en la época de estiaje, debido a los bajos caudales disponibles para la dilución y las temperaturas del agua relativamente altas.

El método simplificado corresponde a la siguiente inecuación:

$$ECA_{O2} \leq C_{02,RH} - D_C$$

Donde:

$ECAO_2$: ECA-Agua de oxígeno disuelto en la categoría 3:5,0 mg O_2/L.

CO_2, RH: Concentración de oxígeno disuelto medida en el cuerpo receptor en el periodo de estiaje: 7,95 mg O_2/L.

D_C: Déficit máximo de oxígeno disuelto, que se calcula con Hydroscience (1971):

$$D_C = L_0 \times \phi^{\frac{\phi}{1-0}} = 14x40x20{,}2^{\frac{20,2}{1-20,2}} = 0{,}61 \text{ mg/L}$$

L_0: Demanda de oxígeno disuelto debido al consumo de materia orgánica (mg O_2/L), que se calcula con:

$$L0 = \frac{DBO_{U,vert} \times Q_{vert} + DBO_{U,RH} \times Q_{RH,crit}}{(Q_{vert} + Q_{RH,crit})} = \frac{293 \times 4{,}66 + 0 \times 90}{(4{,}66 + 90)} = 14{,}4 \text{ mg/l}$$

$DBO_{U,vert}$: Demanda bioquímica de oxígeno última del vertimiento: dado que se trata de un vertimiento proyectado y la DBO_U no puede ser determinada en laboratorio, se supone que el DBO último corresponde a la concentración máxima admisible de DQO para el cumplimiento del ECA-Agua en el cuerpo receptor (véase el numeral VI.8.7). Esta suposición es muy conservadora, dado que la DQO abarca también compuestos orgánicos no biodegradables:

$DBO_{U,ver}t$ = Concentración máxima de DQO para el cumplimiento del ECA-Agua = 293 mg/L

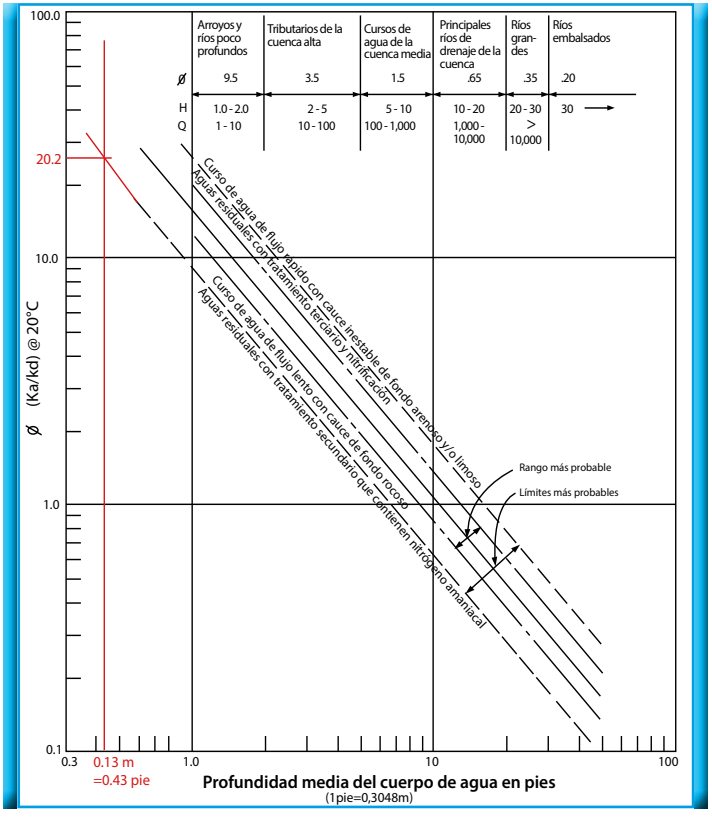
$DBO_{U,RH}$: Demanda bioquímica de oxígeno última del cuerpo de agua determinada en un ensayo de laboratorio de veinte días. En el caso específico en el que el análisis de DBO_5 ha demostrado la ausencia de carga orgánica en el cuerpo receptor, la DBOU,RH es supuesta 0 mg/L

$Q_{RH,crit}$: Caudal crítico del cuerpo receptor disponible para la dilución, indicado en el acápite VI.8.5.

Q_{vert} : Caudal máximo del vertimiento, indicado en el acápite VI.8.2.1.

Φ : Tasa de asimilación definida con K_a/K_d (tasa de reaeración entre tasa de desoxigenación carbonácea), que se determina en función de la profundidad promedio del cuerpo natural, aplicando el gráfico siguiente y considerando las condiciones más críticas (curso de agua de flujo lento y aguas residuales con tratamiento secundario que contienen nitrógeno amoniacal).

Gráfico 62. Tasa de asimilación de oxígeno disuelto - Φ (Salas & y Martino, 1990)



Con estos datos de ingreso se obtiene:

$$ECA_{02} \leq C_{02,RH} - D_C$$

$$5{,}0 \leq 7{,}95 - 0{,}61$$

$$5{,}0 \leq 7{,}34$$

Esto demuestra que la concentración mínima de oxígeno disuelto aguas abajo de la zona de mezcla ocasionada por la oxidación de la materia orgánica contenida en el efluente será 7,34 mg/L y cumplirá con el ECA-Agua de 5,0 mg/L.

9. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS

La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales en el cuerpo receptor ha evidenciado un riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, DBO_5, DQO, fosfatos, nitratos y coliformes termotolerantes.

Para cumplir el ECA-Agua en el cuerpo receptor, el sistema de tratamiento deberá reducir las concentraciones en el efluente a los valores indicados en la tabla 100.

Tabla 100. Concentraciones máximas admisibles en el efluente que permitirán cumplir los ECA-Agua en el cuerpo receptor

PARÁMETROS	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE EN EL EFLUENTE TRATADO QUE PERMITIRÁ CUMPLIR EL ECA-AGUA	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO REQUERIDA
pH	6,5-8,4	Neutralización a pH 6,5-8,4
Aceites y grasas	20 mg/L	97%
DBO_5	305 mg/L	95%
DQO	812 mg/L	98%
Nitrógeno total	203 mg/L	81%
Fosfatos	20 mg/L	93%
Coliformes termotolerantes	$2{,}0 \cdot 10^4$ NMP/100mL	$-3{,}0 \cdot 10^6$ NMP/100mL

Asimismo, la planta de tratamiento deberá permitir ecualizar el caudal variable a un caudal medio de 4,66 L/s. Como evidencia la tabla 100, las aguas residuales deberían recibir, en una planta, tratamiento primario, secundario y avanzado, que permiten la reducción de los aceites y grasas en 97%, de la carga orgánica en 95%, de la DQO en 98%, de los fosfatos en 97% y de los coliformes termotolerantes en más de seis unidades logarítmicas. Para la reducción del nitrógeno total se deberá prever una etapa de nitrificación y de desnitrificación, con una eficiencia de remoción de 81%. Asimismo, el pH de las aguas residuales deberá ser neutralizado a un valor entre 6,5 y 8,4.

Para lograr estas eficiencias, el sistema de tratamiento de aguas residuales debería abarcar los siguientes elementos:

- Separador de aceites y grasas.
- Estanque de ecualización con un tiempo de retención de seis horas y ajuste de pH a aproximadamente 7, con la dosificación de ácido sulfúrico. El ajuste del pH es imprescindible para garantizar la estabilidad del proceso anaeróbico, maximizar la generación de biogás y garantizar un efluente con un rango de pH entre 6,5 y 8,4.
- Tanque anaeróbico tipo UASB con sistema de captación de biogás y generación de energía eléctrica.
- Tanque con aireación prolongada para la reducción de la carga orgánica y nitrificación.
- Dosificación de sales férricas para la precipitación del fosfato en el clarificador secundario.
- Clarificador secundario y recirculación de los lodos a la etapa aeróbica.
- Recirculación del efluente clarificado al tanque anaeróbico donde ocurre la desnitrificación con una tasa de recirculación de 6 a 1 (agua reciclada a agua residual cruda).
- Filtro de arena rápido del efluente del clarificador secundario.
- Desinfección con UV.

Asimismo, para la estabilización del lodo producido se prevé un tanque digestor con captación de biogás. El lodo estabilizado será utilizado en la agricultura local como fertilizante.

Considerando el alto costo de inversión y operación del sistema de tratamiento de aguas residuales, se evalúa la alternativa de su reúso.

Las aguas residuales industriales de las plantas de procesamiento de leche son ricas en nutrientes (nitrógeno, fosfatos, potasio y calcio), y su reúso en la agricultura constituye un beneficio económico para los agricultores, pues permite aminorar la aplicación de nutrientes minerales. Las aguas residuales industriales contienen un promedio de 550 mg/L de nitrógeno y 140 mg/L de fósforo.[66] Tomando en cuenta las variables exigencias de nutrientes de los diferentes cultivos, se puede calcular las áreas agrícolas en las cuales las aguas residuales industriales tratadas pueden sustituir el uso de fertilizantes minerales.

66 Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana (1988). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Fabricación de productos lácteos.* Santiago.

Tabla 101. Tasas de aplicación de aguas residuales de la industria láctea para diferentes cultivos en función de la exigencia de los macronutrientes nitrógeno y fósforo

TIPO DE CULTIVO	EXIGENCIA DE NITRÓGENO*	EXIGENCIA DE FÓSFORO*	CONC. MEDIA DE NITRÓGENO EN LAS AR	CONC. MEDIA DE FÓSFORO EN LAS AR	VOLUMEN ÓPTIMO DE AR REGADAS			ÁREA DONDE LAS AR SUSTITUYEN LOS FERTILIZANTES MINERALES
					PARA NITRÓGENO	PARA FÓSFORO	INTERSECCIÓN DE LOS CONJUNTOS	
	KG/HA/AÑO	KG/HA/AÑO	MG/L	MG/L	M^3/HA/AÑO	M^3/HA/AÑO	M^3/HA/AÑO	HA
Trigo	30 - 160	4 - 30	550	140	55 - 291	29 - 214	214 - 291	361 - 490
Arroz	50 - 160	40 - 80	550	140	91 - 291	286 - 571	286 - 291	361 - 368
Maíz	50 - 300	30 - 100	550	140	91 - 545	214 - 714	214 - 545	193 - 490
Papas	80 - 150	100 - 200	550	140	145 - 273	714 - 1429	273	385
Soya	20 - 30	50 - 70	550	140	36 - 55	357 - 500	55	1925
Caña de azúcar	100 - 210	60 - 120	550	140	182 - 382	429 - 857	382	275
Algodón	50 - 120	30 - 100	550	140	91 - 218	214 - 714	214 - 218	481 - 490
Frutales	200	80	550	140	364	571	364	289
Pradera con pasto	40 - 50	5 - 10	550	140	73 - 91	36 - 71	71	1444
Pradera sin pasto	400 - 500	50 - 100	550	140	727 - 909	357 - 714	714	144

* Fuente: FAO (1984). *Fertilizer and Plant Nutrition Guide*. Roma: FAO.

La tabla anterior demuestra el beneficio del reúso de las aguas residuales industriales generadas por la planta (105 000 m^3/año), pudiendo sustituir los macronutrientes nitrógeno y fósforo en un área agrícola de una extensión entre 144 y 490 ha, llegando hasta 1925 ha para soya y 1444 ha para pradera con pasto. Sin embargo, para los cultivos de papas, soya, caña de azúcar y frutales, la relación de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales no es óptima, de donde resulta la necesidad de aplicar también fertilizantes minerales de fósforo.

El reuso para la reutilización de praderas (con o sin pasto), es particularmente útil, dado que la relación N-P de las aguas residuales es adecuada para este tipo de cultivo, y es el principal cultivo de los agricultores que proveen el insumo principal de la planta: la leche.

Sin embargo, para el reúso seguro de las aguas residuales industriales es necesario mantener su buena calidad sanitaria y evitar la mezcla con aguas residuales domésticas. Asimismo, deben recibir un tratamiento primario que permita reducir la carga orgánica para evitar la formación de malos olores y la obstrucción de los suelos agrícolas.

Por lo tanto, se deberá prever dos sistemas de tratamiento diferentes para las aguas residuales industriales y las domésticas. Para la disposición final de las aguas residuales domésticas tratadas se propone el riego de las áreas verdes ornamentales al interior de la planta. Con el fin de evitar impactos en la salud de las personas en contacto con los céspedes, se sugiere un sistema de riego subterráneo, por lo que no será necesario desinfectar las aguas residuales domésticas tratadas.[67]

El sistema de tratamiento de las aguas residuales industriales abarca los siguientes elementos:

- Separador de aceites y grasas.
- Estanque de ecualización.
- Tanque anaeróbico tipo UASB con sistema de captación de biogás y generación de energía eléctrica. El lodo generado será removido periódicamente y utilizado en la agricultura local como fertilizante.
- Tanque de almacenamiento para ecualizar diferencias en la generación y demanda de aguas residuales.

El sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas abarca los siguientes elementos:

- Tanque anaeróbico tipo Imhoff con sistema de captación de biogás y generación de energía eléctrica.
- Humedal artificial de flujo subsuperficial integrado en las áreas verdes de la planta.
- Sistema de riego subterráneo de las áreas verdes ornamentales.

Adicionalmente a las inversiones en el tratamiento, se deberá implementar acciones para incentivar el reúso de las aguas residuales industriales por los agricultores locales, que comprenden:

- Campañas de sensibilización sobre los beneficios del reúso de aguas residuales de la industria láctea.
- Capacitación sobre la aplicación de tasas de aguas residuales que permitan alcanzar un nivel de fertilización óptimo.
- Convenios con los agricultores locales sobre la cesión de las aguas residuales tratadas.

El análisis de la viabilidad económica de las dos alternativas indicó que un sistema de tratamiento con las eficiencias indicadas resulta en una alta inversión inicial y un alto costo operativo. Sin embargo, el costo estimado de la alternativa de tratamiento primario y reúso resultó significativamente menor.

67 Guías OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises, 3.ª edición, volúmenes 1-4, 2006.

10. CONCLUSIONES

- La evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas crudas en el cuerpo receptor ha evidenciado un alto riesgo de incumplimiento de los ECA-Agua de aceites y grasas, DBO_5, DQO, fosfatos, nitratos y coliformes termotolerantes.

- Para cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, las aguas residuales deberían ser tratadas en una planta con tratamiento primario, secundario y avanzado, que permite la reducción de los aceites y grasas en 97% y de la carga orgánica en 95%, la DQO en 98%, los fosfatos en 97%, el nitrógeno total en 81% y los coliformes termotolerantes en más de nueve unidades logarítmicas.

- También se ha evaluado la alternativa de reúso de las aguas residuales, considerando el pretratamiento de aguas residuales industriales y domésticas en dos sistemas separados, el reúso de las aguas residuales domésticas para el riego de las áreas verdes ornamentales de la planta y de las aguas residuales industriales en la agricultura local.

- El análisis de viabilidad económica de las dos alternativas resultó en que la alternativa de reúso es económicamente más viable que el tratamiento avanzado y posterior vertimiento al cuerpo natural de agua.

- Asimismo, el reuso representa un beneficio económico significativo para los agricultores locales, dado que las aguas residuales industriales de la planta de procesamiento de leche son ricas en nutrientes (nitrógeno, fosfatos, potasio y calcio), y pueden sustituir el uso de fertilizantes minerales en un área de praderas sin pasto de 144 ha y con pasto de hasta 1444 ha.

- Considerando el resultado del análisis realizado, el reúso es la alternativa económica, técnica y ambiental más viable para la disposición final de las aguas residuales de la industria láctea.


9

Vertimiento de aguas residuales de una industria pesquera al mar

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Se resumen las características del proyecto que son de relevancia para la evaluación del impacto del vertimiento de las aguas residuales tratadas en el cuerpo natural de agua:

- El establecimiento pesquero se dedica hace más de diez años a la elaboración de harina y aceite de pescado de alto contenido proteico, para lo cual utiliza como materia prima la anchoveta (Engraulis ringens), extraída en embarcaciones pesqueras que descargan la pesca mediante sistemas de bombeo a sus pozas de almacenamiento. La planta tiene una capacidad de producción instalada de 100 t/h. El periodo de operación de la planta varía entre dos y cinco meses al año, con un horario de producción de dieciséis hasta veinte horas por día.
- Las aguas residuales industriales generadas por la planta abarcan los siguientes efluentes:
  - Las aguas de bombeo son los efluentes de mayor volumen, se originan durante el trasvase de la materia prima de la embarcación a la planta y contienen materia orgánica suspendida y diluida, aceites y grasas, sangre y agua de mar.
  - El agua de limpieza de los equipos y del establecimiento industrial pesquero contiene partículas suspendidas, aceites y grasas, agua, soda cáustica, ácido fosfórico y un pH altamente variable.
  - La sanguaza se genera en la poza de almacenamiento de la materia prima, cuya degradación proteica se produce inmediatamente después de la muerte de la anchoveta y comienza por una acción enzimática, para continuar por una rápida acción bacteriana y procesos oxidativos de los productos de degradación.
  - El agua de cola es generada como un subproducto de la prensa de la materia prima y de la centrifugación de la sanguaza. Es rica en proteínas y aceites.
  - El condensado generado en la planta evaporadora de agua de cola, que abarca el condensado limpio (purga de condensados de los secadores y de la planta de agua de cola) y el condensado sucio (condensado de los vahos de los secadores utilizados en la planta de agua de cola como agente calefactor).
  - Los efluentes domésticos provienen de los servicios higiénicos, duchas, lavatorios y del comedor.

– Los efluentes del laboratorio, los cuales se caracterizan por contener detergentes y productos químicos diluidos, como sulfato de sodio, ácido nítrico, ácido sulfúrico, etcétera.

- En el año 2011 se implementó un moderno sistema de gestión de las aguas residuales, que abarca medidas de reducción del volumen y de la carga contaminante vertida al cuerpo receptor, y sistemas de tratamiento avanzados. Las medidas de reducción del volumen y carga contaminante fueron las siguientes:

  – Sustitución de los equipos de bombeo de la materia prima convencionales por bombas ecológicas (sistema de descarga presión-vacío). Mediante esta medida se ha reducido la relación de materia prima a agua de bombeo de 1:3,0 a 1:0,8. Asimismo, se bajó el porcentaje de destrozo en la materia prima de 30% a menos de 10%, reduciendo la pérdida de materia prima y mejorando significativamente la utilidad por tonelada de materia prima procesada. De igual forma, se pudo reducir el volumen de sanguaza generada en 25%, y se mejoró la calidad del agua de bombeo: de un promedio de 10 000 mg/L de aceites y grasas se bajó a 5000 mg/L, los sólidos suspendidos de 42 000 a 17 000 mg/L, y la demanda bioquímica de oxígeno de 50 000 mg/L a 25 000 mg/L.

  – Recuperación completa de las proteínas (suspendidas y disueltas) y del aceite de la sanguaza mediante las siguientes tecnologías: primero se coagula la sangre en un tanque con inyección directa de vapor (coagulador); posteriormente los sólidos son separados y centrifugados; luego, los sólidos y aceites separados son incorporados en el proceso de producción de harina y aceite, y el agua de cola generada es enviada a la planta evaporadora de agua de cola.

  – El licor de prensa es centrifugado para separar el aceite; el agua de cola generada es enviada a la planta de evaporación de agua de cola, donde se concentran los sólidos a través de la condensación del agua. El concentrado es incorporado en el proceso productivo.

  – El condensado de la planta de agua de cola es almacenado y reusado en la limpieza: el condensado sucio para la limpieza de equipos como los filtros rotatorios Trommel, y el condensado limpio para la limpieza de las calderas.

  – La implementación de un sistema de limpieza de la planta a alta presión permitió reducir el volumen de agua de limpieza en 25%.

  – Los efluentes domésticos son manejados en una planta compacta de tratamiento biológico. En la etapa primaria, los sólidos no biodegradables son separados mediante cámara de rejas y clarificador.

En la etapa secundaria ocurre la descomposición microbiológica de la materia orgánica, el agua es agitada y aireada, mezclándose con lodo proveniente de la etapa 3 y, una vez metabolizada la materia orgánica, el efluente pasa a un etapa de sedimentación de flujo laminar, donde se separan los sólidos por decantación. El lodo acumulado en la planta de tratamiento biológico es retirado por una EPS-RS autorizada por DIGESA. El agua tratada es reusada para el riego de las áreas verdes ornamentales dentro de los terrenos de la planta. Para evitar impactos en la salud de personas en contacto con los céspedes, se usa un sistema de riego subterráneo, de modo que no es necesario desinfectar las aguas residuales domésticas tratadas.[68] La separación de las aguas domésticas de las aguas industriales permitió reducir significativamente las concentraciones de coliformes en las aguas residuales vertidas.

- Los efluentes del laboratorio son retirados por una EPS autorizada por DIGESA.

- Los sistemas de tratamiento implementados en el año 2011 son diseñados para el tratamiento de las aguas de bombeo y las aguas de limpieza; todos los otros efluentes de la planta no son vertidos al mar, sino reusados o recuperados en la planta de agua de cola. Los sistemas de tratamiento de las aguas de bombeo abarcan las siguientes etapas:

  - Filtro rotatorio tipo Trommel, donde se separan los sólidos gruesos (> 0,5 mm).
  - Dos celdas de flotación con aire (sistema DAF, tipo DENVER) de 500 m^3/h de capacidad, provistas con dispositivos de inyección de aire comprimido en forma de microburbujas que permiten arrastrar las grasas contenidas en el agua de bombeo hacia la superficie, desde donde son recolectadas. Las espumas retiradas de la superficie de las celdas de flotación son calentadas por medio de vapor directo en un tanque coagulador, y una vez que alcanza la temperatura de 90 °C pasa a la separación (Tricanter); los sólidos y aceite recuperados son reincorporados al proceso productivo, en tanto el agua residual restante es enviada al sistema de flotación.
  - El agua de bombeo obtenida de la segunda etapa de tratamiento es enviada a la tercera etapa, donde se almacena en tres tanques ecualizadores de 1200 m^3 de volumen, para luego continuar con el proceso de recuperación de grasas y sólidos en suspensión, a través de la adición de coagulantes y floculantes (poliamina cuaternaria y poliacrilamida aniónica), y la inyección de aire en un tanque clarificador (celda de flotación KROFTA) de una capacidad de 280 m^3/h. Los lodos obtenidos son deshidratados en una separadora ambiental de 70 m^3/h de capacidad, desde

68 Guías OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises, Volúmenes 1-4, 3ra. edición, 2006.

donde los sólidos son reincorporados al proceso industrial, y el agua residual restante es enviada al sistema de flotación DAF.

– El emisor submarino tiene una longitud total de 950 m (50 m en tierra y 900 m en mar) y un diámetro interno de 296 mm (HDPE-DN315). El difusor, tipo quena, tiene una longitud de 30 m y treinta orificios de un diámetro de 80 mm con una separación de 100 cm. Los orificios están orientados verticalmente hacia arriba y el eje del difusor está orientado en dirección NE-SO, en perpendicular con la línea de la orilla de playa.

- Los sistemas de tratamiento de las aguas de limpieza abarcan las siguientes etapas:

  – Tanque agitado donde, mediante dosificación automatizada de ácido sulfúrico o soda cáustica, se ajusta el pH a valores en el rango de 5-9.

  – Tanque ecualizador de 1000 m^3 de volumen donde son almacenadas para luego ser enviadas el sistema de tratamiento del agua de bombeo, antes de ser descargadas al mar a través del emisor submarino.

  El sistema de tratamiento tiene tal eficiencia, que el efluente vertido al mar cumple con los Límites Máximos Permisibles (D.S. N°010-2008-PRODUCE, columna II), quedando en la mayoría de las muestras significativamente debajo del límite (véase el numeral VI.9.2.3).

- El cuerpo marino costero, receptor de las aguas residuales según la R.J. N° 202-2010-ANA, se encuentra clasificado en la categoría 4, Conservación del ambiente acuático. El monitoreo ambiental realizado por la empresa en los años 2012 y 2013 evidenció frecuentes incumplimientos de los ECA-Agua de los parámetros aceites y grasas y demanda bioquímica de oxígeno. Por lo tanto, la empresa requiere adecuarse a la Ley de Recursos Hídricos y presenta la actualización del Plan de Manejo Ambiental. La evaluación del impacto del vertimiento en el cuerpo receptor descrito en el presente ejemplo forma parte del PMA actualizado.

- El agua de enfriamiento de la columna barométrica es otro efluente de la planta, que se origina en la planta evaporadora de agua de cola donde el agua de mar es utilizada con un caudal constante de 160 L/s para efectuar vacío en la torre barométrica. No es considerada agua residual, dado que permanece limpia, pues no toma contacto con ninguna materia prima y su temperatura es de 28ºC hasta un máximo de 35ºC. Luego de cumplir su función de enfriar, es descargada al cuerpo natural marino a través de un segundo emisor submarino, de una longitud de 350 m (50 m en tierra y 300 m en mar), con diámetro nominal de 400 mm. El difusor cuenta con un orificio único con un diámetro de 375 mm orientado horizontalmente (ángulo vertical = 0°) y mar adentro (dirección este-oeste). Aunque no se trata de aguas residuales, en el acápite VI.9.5.1 se evalúa el

impacto de su descarga en el cuerpo natural de agua en materia de variación de la temperatura.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

2.1 Caudal máximo de las aguas residuales tratadas vertidas

Para la descarga de la materia prima se aplica una bomba ecológica, que trabaja con una relación de materia prima a agua de 1:1,5. Considerando la capacidad de descarga de la bomba de 350 t/h, el caudal de las aguas de bombeo se calcula con 525 m^3/h. Las aguas de bombeo son temporalmente almacenadas en tres tanques ecualizadores de 1200 m^3 de volumen, desde donde son enviadas al tanque clarificador (KROFTA) de una capacidad de 280 m^3/h. El caudal máximo vertido a través del emisor corresponde a la capacidad de tratamiento de esta última etapa de tratamiento, igual a 280 m^3/h o 78 L/s.

Dado que el agua de limpieza pasa por el mismo sistema de tratamiento, también su caudal máximo de descarga es de 78 L/s.

Se debe precisar que el proceso de producción de harina y aceite de pescado sigue una cadena de subprocesos en la que la actividad de recepción del pescado se lleva a cabo durante las primeras horas y genera agua de bombeo. Por lo común, cuando el procesamiento de la totalidad de la materia prima ha sido concluida, se llevan a cabo las actividades de limpieza de maquinarias y equipos e instalaciones de la planta pesquera. Por tanto, no se produce mezcla entre el agua de bombeo y el agua de limpieza.

2.2 Lista de parámetros por evaluarse

En conformidad con la tabla 2, acápite I los parámetros por evaluarse para el caso de aguas residuales industriales del procesamiento de pescado y mariscos vertidas a un cuerpo de agua marino costero de categoría ECA-Agua 4 son los siguientes:

- Aceites y grasas (A y g)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO_5).

2.3 Concentraciones máximas en las aguas residuales tratadas

Dado que se trata de un vertimiento en curso, se cuenta con información de la calidad de las aguas residuales vertidas, recopilada en el control mensual realizado por la empresa en los periodos de producción.

Tabla 102. Calidad de las aguas de bombeo tratadas

FECHA DE MUESTREO		D. S. Nº 010-2008-PRODUCE – LMPS (COLUMNA II)	15/5/2012	5/6/2012	17/6/2012	8/5/2013	10/6/2013	12/7/2013	VALOR MÁXIMO
HORA DE MUESTREO			11:30	12:00	13:00	12:30	11:30	12:00	
NOMBRE LABORATORIO			XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	
NÚMERO DEL INFORME DE ENSAYO ANALÍTICO			XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	
pH	---	5-9	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,5	5,8
Temperatura	ºC	---	23,5	22,0	20,6	17,8	19,8	17,5	23,5
A y g	mg/L	1500	809	1432	1350	1464	1320	906	1464
DBO_5	mg/L	---	5400	9800	3050	6300	10200	5850	10200
SST	mg/L	2500	1598	2488	1008	1881	1555	2056	2488

Tabla 103. Calidad de las aguas de limpieza tratadas

FECHA DE MUESTREO		D.S.Nº 010-2008-PRODUCE - LMP PARA VERTIMIENTO FUERA DE LA ZONA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL LITORAL	15/5/2012	5/6/2012	18/6/2012	9/5/2013	10/6/2013	12/7/2013	VALOR MÁXIMO
HORA DE MUESTREO			23:30	24:00	01:00	00:30	23:30	24:00	
NOMBRE LABORATORIO			XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	XXXX SAC	
NÚMERO DEL INFORME DE ENSAYO ANALÍTICO			XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	XXXX-XX	
pH	---	5-9	8,9	7,9	7,8	8,9	7,8	6,2	8,9
Temperatura	ºC	---	24,0	22,1	20,8	25,3	17,5	19,8	25,3
A y g	mg/L	1500	1068	172	180	22	635	160	1068
DBO_5	mg/L	---	5250	1350	2600	2900	9300	2650	9300
SST	mg/L	2500	583	233	104	430	1816	951	1816

2.4 Eliminación de los residuos sólidos contenidos en el efluente

Los sistemas de tratamiento (filtro rotatorio y celdas de flotación) están apropiadamente diseñados para eliminar los residuos sólidos, la materia flotante persistente y el material sedimentable, contenidos en las aguas residuales antes de la descarga al cuerpo natural de agua.

2.5 Densidad del agua residual tratada

La densidad del agua residual tratada es determinada por el software de simulación con base en su salinidad y temperatura. Para las aguas de bombeo se ha supuesto una salinidad media de 35 psu, dado que se originan del uso de agua de mar, y una temperatura de 23,5 °C, correspondiente a la temperatura máxima medida (véase el párrafo anterior). Con estos datos se calcula una densidad del agua de bombeo tratada de 1023,8 kg/m^3.

Para las aguas de limpieza se ha supuesto una salinidad de 0, dado que se originan del uso de agua destilada (condensado), y una temperatura de 25,3 °C, correspondiente a la temperatura máxima medida. Con estos datos se calcula una densidad del agua de limpieza tratada de 997,0 kg/m^3.

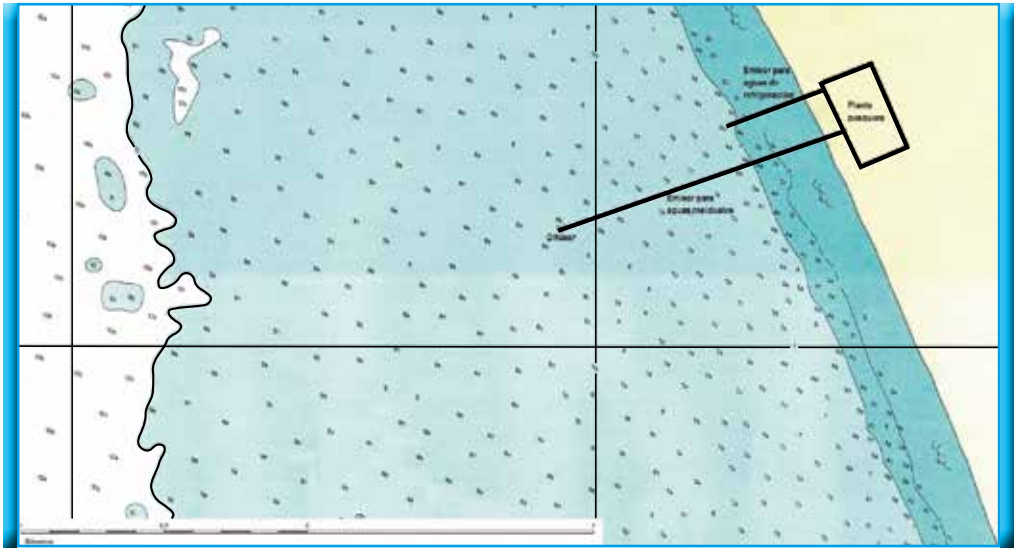
3. CARACTERÍSTICAS DEL CUERPO RECEPTOR

Para la evaluación del efecto del vertimiento en el cuerpo receptor, es necesario contar con información sobre las condiciones ambientales del vertimiento, tal como la configuración del cuerpo natural de agua. A continuación se presenta un resumen de los resultados del estudio oceanográfico del cuerpo receptor que abarca la batimetría, las corrientes, la estratificación térmica y el perfil vertical de la densidad del agua natural.

3.1 Batimetría

En el gráfico 63 se muestra el mapa náutico más reciente del área marino-costera, que contiene los datos batimétricos y la ubicación de los dos emisores submarinos actualmente en uso.

Gráfico 63. Batimetría del área del proyecto



Como se muestra en el mapa náutico, la batimetría local es característica de la zona centro-norte del Perú, con una pendiente del fondo marino muy baja, debido a que la plataforma continental se extiende a algunos kilómetros mar adentro. En la zona de rompiente de olas la pendiente del fondo marino es 2% y luego se reduce a aproximadamente 0,2%, quedando a este nivel bajo hasta el borde de la plataforma continental, que se encuentra a una distancia de más de 100 km.

El actual emisor submarino de aguas residuales está ubicado en una profundidad de 8,5 m, y el emisor de aguas de refrigeración a 6,3 m. El ángulo de orientación horizontal del emisor es 210° medido desde el este en sentido antihorario.

3.2 Corrientes marinas

Un factor muy importante para la evaluación de la dilución inicial y de la extensión de la zona de mezcla son las corrientes marinas. El conocimiento de sus velocidades y direcciones en varias profundidades permite hacer estimaciones adecuadas sobre los efectos de dilución en las diferentes condiciones ambientales.

Para la determinación de las corrientes a diferentes profundidades, se empleó un medidor continuo tipo Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), con un intervalo de medición de 15 minutos en el periodo del 20 de mayo hasta el 19 de junio de 2013 (treinta días). El medidor fue instalado al final del actual difusor a una distancia de

940 m de la costa y a una profundidad de 8,5 m. En los siguientes gráficos se representan los resultados de la medición de las corrientes marinas.

Gráfico 64. Dirección de corriente versus velocidad de flujo en una profundidad de 2,0 m

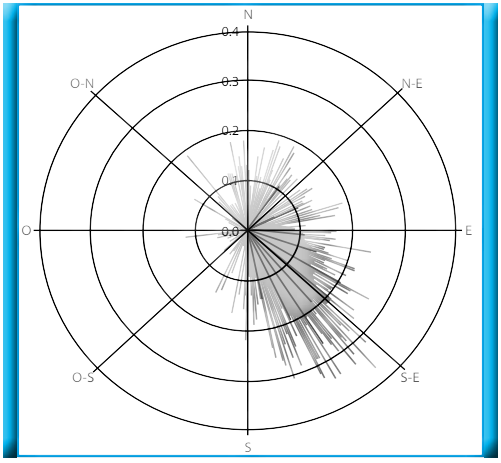
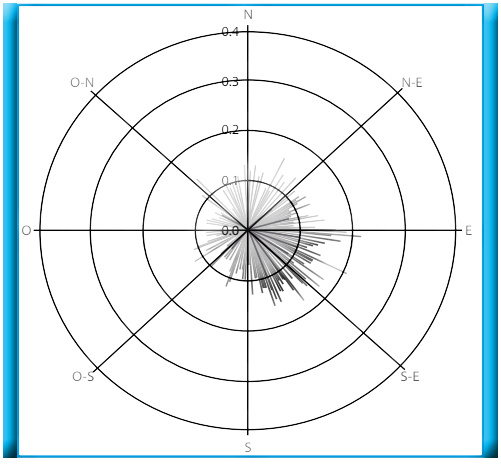


Gráfico 65. Dirección de corriente versus velocidad de flujo en una profundidad de 6,5 m



Como muestran los gráficos anteriores, la velocidad de la corriente en la superficie varía significativamente entre valores de 0,00 y 0,38 m/s, con una mayor ocurrencia de velocidades entre 0,00 y 0,20 m/s. A mayor profundidad de 6,5 m, la velocidad de flujo es menor con valores entre 0,00 y 0,22 m/s, y con mayor ocurrencia entre 0,00 y 0,10 m/s. La dirección de flujo predominante es sur-este hacia norte-oeste, en paralelo a la línea de costa.

Las velocidades máximas de la corriente en las diferentes direcciones, necesarias para el cálculo de la extensión máxima de la zona de mezcla, fueron determinadas con base en los gráficos anteriores.

Tabla 104. Velocidades máximas de la corriente en las diferentes direcciones

DIRECCIÓN DE CORRIENTE		PROFUNDIDAD (M)	VELOCIDAD MÁXIMA (M/S)
PUNTOS CARDINALES	ÁNGULO MEDIDO DESDE EL ESTE EN SENTIDO CONTRA EL RELOJ		
De O a E	0°	2,0	0,13
		6,5	0,13
De S a N	90°	2,0	0,38
		6,5	0,18
De E a O	180°	2,0	0,25
		6,5	0,22
De N a S	270°	2,0	0,19
		6,5	0,15

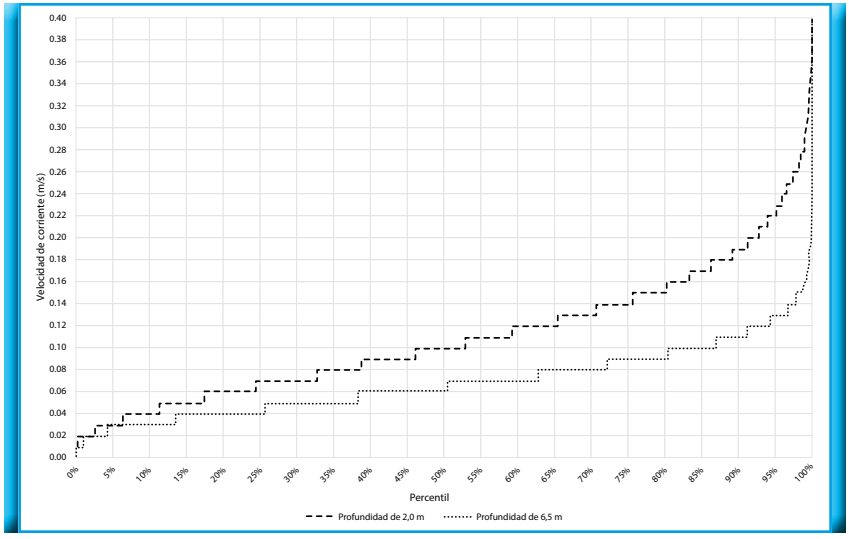
La velocidad mínima de la corriente, necesaria para el cálculo de la dilución inicial mínima, fue determinada con base en un análisis estadístico, calculando el percentil de 20% de todas las velocidades medidas en las diferentes profundidades.

Tabla 105. Percentil de 20% de las velocidades de la corriente marina en diferentes profundidades calculado con base en las velocidades medidas en el periodo 20/5-19/6/2013

PROFUNDIDAD (M)	VELOCIDAD DE CORRIENTE(M/S)
2,0	0,06
6,5	0,04

Estos valores corresponden a una velocidad que ocurre con una frecuencia acumulada de 20%, es decir que en 80% de las mediciones fue superada, como demuestra el gráfico 66

Gráfico 66. Frecuencia acumulada de las velocidades de corrientes en diferentes profundidades



3.3 Densidad del agua natural marina

El vertimiento evaluado está ubicado en la proximidad del grado 7° de latitud, donde el cuerpo marino está influenciado por la corriente fría de Humboldt. Por tanto, no existe una estratificación térmica significativa. Asimismo, en la proximidad del vertimiento no se encuentran desembocaduras de ríos o canales de agua dulce. Por consiguiente, se puede suponer densidad del agua constante en la columna de agua, la cual es determinada con base en la salinidad y la temperatura del cuerpo receptor medido en la superficie: la salinidad media de 35 psu y la temperatura de 18,1 °C (corresponde a la temperatura máxima medida en el punto M-6, que se encuentra alejado del emisor actual). Con estos datos, el software de simulación calcula una densidad del agua de mar de 1025,3 kg/m^3.

3.4 Calidad del cuerpo natural de agua

Por un periodo superior a tres años, la empresa estuvo evaluando la calidad del cuerpo receptor. A continuación se presentan los resultados del monitoreo de los dos últimos años, posteriores a la implementación del nuevo sistema de gestión de aguas residuales.

El muestreo fue realizado en los puntos que se muestran en la tabla 106.

Tabla 106. Puntos de monitoreo de la calidad del cuerpo receptor

CÓDIGO PUNTO	UBICACIÓN	COORDENADAS (UTM-WGS8$_4$)		
		ZONA	NORTE	ESTE
M-1	Al final del emisor	17	XXXXXX	XXXXXX
M-2	200 m al sur del emisor	17	XXXXXX	XXXXXX
M-3	200 m al norte del emisor	17	XXXXXX	XXXXXX
M-4	200 m al este del emisor	17	XXXXXX	XXXXXX
M-5	200 m al oeste del emisor	17	XXXXXX	XXXXXX
M-6	Punto blanco, 500 m aguas afuera	17	XXXXXX	XXXXXX

Tabla 107. Resultados analíticos del monitoreo mensual realizado en los años 2012-2013

FECHA DE MUESTREO NOMBRE LABORATORIO NÚMERO DEL INFORME DE ENSAYO ANALÍTICO			15/5/2012 XXXX SAC XXXX-XX	5/6/2012 XXXX SAC XXXX-XX	17/6/2012 XXXX SAC XXXX-XX	8/5/2013 XXXX SAC XXXX-XX	10/6/2013 XXXX SAC XXXX-XX	12/7/2013 XXXX SAC XXXX-XX	VALOR MÁXIMO	ECA-AGUA, CATEGORÍA 4, MAR
Punto M-1: final del emisor	pH	---	7,83	7,82	7,69	7,78	7,79	7,94	7,94	6,5-8,5
	Temperatura	ºC	18,7	17,1	16,7	17,5	16,2	15,9	18,7	delta 3 °C
	A y g	mg/L	<0,5	2,8	3,1	<0,5	4,0	<0,5	4,0	1
	DBO_5	mg/L	<2	48,0	27,4	<2	42,0	<2	48,0	10
	SST	mg/L	28,1	12,0	5,8	14,1	27,3	25,2	28,1	30
M-2: 200 m al sur del emisor	pH	---	8,09	7,54	7,88	7,63	7,84	7,98	8,09	6,5-8,5
	Temperatura	ºC	18,4	17,2	16,3	17,1	16,4	16,0	18,4	delta 3 °C
	A y g	mg/L	<0,5	<0,5	<0,5	3,2	<0,5	<0,5	3,2	1
	DBO_5	mg/L	<2	<2	<2	19,8	<2	<2	19,8	10
	SST	mg/L	34,9	6,6	14,8	15,7	8,9	26,5	34,9	30

FECHA DE MUESTREO NOMBRE LABORATORIO NÚMERO DEL INFORME DE ENSAYO ANALÍTICO			15/5/2012 XXXX SAC XXXX-XX	5/6/2012 XXXX SAC XXXX-XX	17/6/2012 XXXX SAC XXXX-XX	8/5/2013 XXXX SAC XXXX-XX	10/6/2013 XXXX SAC XXXX-XX	12/7/2013 XXXX SAC XXXX-XX	VALOR MÁXIMO	ECA-AGUA, CATEGORÍA 4, MAR
M-3: 200 m al norte del emisor	pH	---	8,04	7,41	7,66	7,73	7,73	7,90	8,04	6,5-8,5
	Temperatura	°C	18,7	17,0	16,2	16,9	16,3	15,9	18,7	delta 3 °C
	A y g	mg/L	5,4	1,2	3,2	<0,5	3,8	<0,5	5,4	1
	DBO_5	mg/L	50,0	17,4	28,2	<2	34,0	<2	50,0	10
	SST	mg/L	23,9	9,6	19,5	10,3	10,9	22,5	23,9	30
M-4: 200 m al este del emisor	pH	---	8,12	7,73	7,68	7,59	7,88	7,89	8,12	6,5-8,5
	Temperatura	°C	18,8	17,1	16,5	17,0	16,2	15,9	18,8	delta 3 °C
	A y g	mg/L	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,0	1
	DBO_5	mg/L	<2	<2	<2	8,0	<2	<2	8,0	10
	SST	mg/L	29,1	12,1	18,7	14,7	12,9	17,1	29,1	30
M-5: 200 m al oeste del final del emisor	pH	---	7.94	7.28	7.70	7.62	7.81	7.86	7.94	6.5-8.5
	Temperatura	°C	18.6	17.0	16.5	16.8	16.1	15.8	18.6	delta 3 °C
	A y g	mg/L	1.4	2.6	3.4	<0.5	<0.5	1.8	3.4	1
	DBO_5	mg/L	19.2	48.0	54.0	<2	<2	24.0	54.0	10
	SST	mg/L	21.7	9.2	17.1	12.9	11.9	26.0	26.0	30
M-6: Punto blanco, 500 m aguas afuera	pH	---	8.01	6.99	7.67	7.68	7.81	7.89	8.01	6.5-8.5
	Temperatura	°C	18.5	16.8	16.5	16.8	16.0	15.8	18.5	delta 3 °C
	A y g	mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.0	1
	DBO_5	mg/L	<2	<2	<2	<2	<2	<2	0.0	10
	SST	mg/L	16.5	7.0	15.1	11.4	10.5	14.7	16.5	30

Los monitoreos realizados en los años 2012 a 2013 evidenciaron frecuentes incumplimientos de los ECA-Agua de los parámetros aceites y grasas y demanda bioquímica de oxígeno en la proximidad del emisor submarino. Estos incumplimientos fueron observados en los puntos M-1, M-2, M-3 y M-5.

Respecto al punto M-1, se debe considerar que está ubicado en vertical arriba del emisor, lo que significa que está dentro de la zona de mezcla y, por lo tanto, no es válido para la evaluación del cumplimiento del ECA-Agua. Sin embargo, los puntos M-2, M-3 y M-5 están ubicados fuera de la zona de mezcla, tal como se determinó en el numeral VI.9.5.2.

El punto M-6 es el "punto blanco" ubicado a aproximadamente 500 m al oeste del final del emisor. La calidad del agua en este punto representa la calidad natural del cuerpo receptor, la cual no presenta indicios de contaminación. Por lo tanto, se deberá suponer que los incumplimientos de los ECA-Agua en proximidad del emisor son ocasionados por el vertimiento de aguas residuales. Otro aspecto a considerar para el impacto del vertimiento es que los incumplimientos ocurren principalmente en los puntos ubicados en dirección de las corrientes superficiales predominantes (desde sur-esta hacia norte-oeste). Para comprobar si el vertimiento causa los incumplimientos del ECA-Agua, en el numeral VI.9.5.2 se evalúa la dilución inicial alcanzada con el emisor submarino actualmente en uso.

4. DETERMINACIÓN DE LA DILUCIÓN INICIAL REQUERIDA (S_{MAX})

La dilución requerida para respetar los ECA-Agua en el cuerpo de agua en el límite de la zona de mezcla (S_{max}) se calcula con:

$$S_{max} = MAX(S_i , S_{(i+1)} , S_{(i+2)} , S_{(i+n)})$$

Donde:

S_i , $S_{(i+n)}$: Dilución necesaria para respetar los ECA del parámetro i o i+n respectivamente, calculada con:

$$S_i = \frac{(C_{vert,i} - C_{ECA,i})}{(C_{ECA,i} - C_{RH,i})}$$

i, i+n: Parámetros comprendidos en los ECA-Agua y relevantes para el tipo de efluente (véase el numeral VI.9.2.2).

$C_{vert,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el efluente (véase el numeral VI.9.2.3).

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i según la categoría que corresponda.

$C_{RH,i}$: Concentración máxima del parámetro i en el cuerpo de agua natural (véase el numeral VI.9.3.4).

S_{max}: Dilución requerida para poder cumplir los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla, definida como el valor máximo de los factores de dilución calculados para los diferentes parámetros.

Tabla 108. Dilución inicial requerida (S_{max}) para el vertimiento de aguas de bombeo tratadas

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA- AGUA CATEGORÍA 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
A y g	mg/L	1464	1	0,0	1463
DBO_5	mg/L	10200	10	0,0	1019
SST	mg/L	2488	30	16,5	182
				S_{max}	**1463**

Tabla 109. Dilución inicial requerida (Smax) para el vertimiento de aguas de limpieza tratadas

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL EFLUENTE	ECA- AGUA CATEGORÍA 4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL CUERPO NATURAL	SI
A y g	mg/L	1068	1	0,0	1067
DBO_5	mg/L	9300	10	0,0	929
SST	mg/L	1816	30	16,5	132
				S_{max}	**1067**

La dilución requerida para poder cumplir los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla es 1463 en el caso del vertimiento de aguas de bombeo tratadas, y 1067 en el caso de las aguas de limpieza tratadas; en ambos casos, el parámetro crítico son los aceites y grasas.

5. EVALUACIÓN DE LOS EMISORES SUBMARINOS ACTUALES

Los objetivos de la evaluación son:

- Determinar que la descarga de aguas de refrigeración de la columna barométrica de la planta evaporadora del agua de cola no exceda el ECA-Agua de la temperatura (delta T < 3 °C).
- Establecer la extensión de la zona de mezcla con la finalidad de comprobar que los actuales puntos de monitoreo no estén ubicados en su interior.
- Determinar la dilución inicial del agua residual para comprobar si los incumplimientos de los ECA-Agua son causados por el vertimiento actualmente en curso.

Para la evaluación del emisor submarino se recomienda usar el software XXX, auspiciado por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (Center for Exposure Assessment Modeling – CEAM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

5.1 Evaluación de la descarga de las aguas de refrigeración

Para determinar que la descarga de aguas de refrigeración de la columna barométrica de la planta evaporadora del agua de cola no exceda el ECA-Agua de temperatura (delta T < 3 °C), a continuación se desarrolla el modelo de simulación de la dispersión de estas aguas en el cuerpo receptor.

Las características de las aguas de enfriamiento de la columna barométrica son los siguientes:

– Caudal: 160 L/s

– Temperatura máxima: 35 °Celsius

– Salinidad: 35 psu

– Densidad: 1019,9 kg/m^3 (valor calculado por el software en función de la temperatura y salinidad)

El emisor submarino tiene los siguientes parámetros de diseño:

– Diámetro interno: 375 mm (HDPE-DN400).

– Longitud: 350 m (50 m en tierra y 300 m en mar).

– Orificio único con diámetro de 375 mm.

– Orientación vertical del eje del orificio: 0° (descarga horizontal).

– Orientación horizontal del eje del orificio: oeste-oeste-sur o 210° medido desde el este en sentido antihorario.

El cuerpo receptor en la ubicación de la descarga tiene las siguientes características:

– Profundidad de descarga: 5,1 m (6,3 m, correspondientes a la profundidad promedio del cuerpo receptor en la ubicación del difusor, menos 1,2 m correspondientes a la altura de descarga sobre el fondo).

– Velocidad de corrientes: 0,0 m/s (suposición conservadora, dado que en la ubicación de este emisor no se cuenta con mediciones de las corrientes).

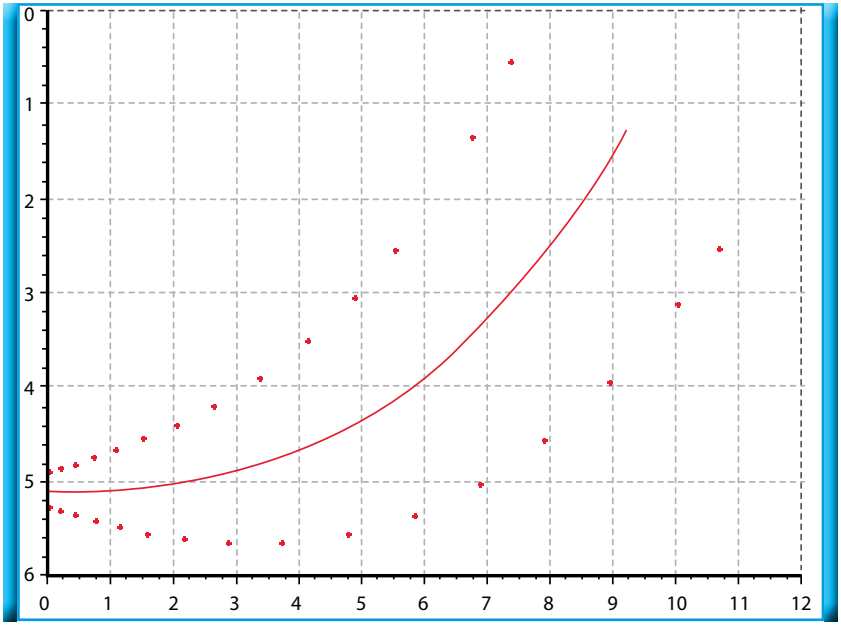
– Temperatura del agua: 18,8 °C (correspondiente a la temperatura máxima medida en el punto M-4, que es el punto más próximo a este emisor).

– Salinidad: 35 psu.

– Densidad: 1025,1 kg/m^3 (valor calculado por el software en función de la temperatura y la salinidad).

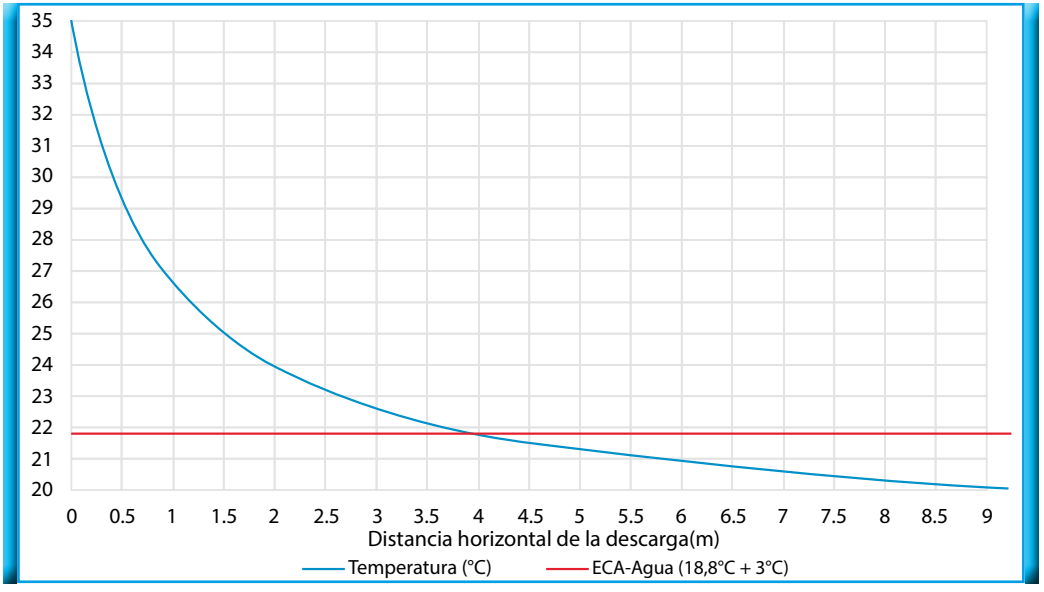
La simulación del vertimiento de las aguas de refrigeración dio los resultados que se muestran en el gráfico 67.

Gráfico 67. Pluma de las aguas de refrigeración (profundidad vs. distancia del emisor en metros)



Luego de ser descargadas por el emisor, las aguas de refrigeración se expanden rápidamente y se mezclan con el agua natural. La pluma tiene una trayectoria elíptica ascendiente, y después de aproximadamente 9,2 m alcanza la superficie (límite de la zona de mezcla).

Gráfico 68. Temperatura media en la pluma de aguas de refrigeración después de su descarga (temperatura vs. distancia de la descarga)



La temperatura de las aguas de refrigeración, después de salir del emisor, se reduce de forma exponencial, y después de 4,0 m es inferior a la temperatura admisible para el cumplimiento del ECA-Agua (3 °C superior a la temperatura natural del agua). En el límite de la zona de mezcla, a una distancia de 9,2 m del emisor, la temperatura media de la pluma es 20,05 °C, o 1,25 °C superior a la temperatura natural del agua.

Luego de la evaluación se comprobó que el incremento de la temperatura en el límite de la zona de mezcla no es mayor de 3 °C con relación a la temperatura natural del agua.

5.2 Evaluación del vertimiento de aguas residuales industriales

Antes de evaluar la dilución inicial y la extensión de la zona de mezcla, se analiza la funcionalidad hidráulica del difusor. Un difusor eficiente debería tener un área total de salidas inferior al área de la tubería. Si el área total de los orificios excede el área de la tubería, la velocidad media de la descarga por los orificios sería menor que la velocidad de flujo de la tubería; esto es, el flujo tendría que desacelerarse antes de la descarga. Físicamente esto no es posible y, por lo tanto, algunos orificios no

descargarían a su máxima capacidad, o no lo harían, anulando de esta manera el propósito del difusor.

En el caso del emisor evaluado, el área de la tubería es:

$$A_{tub} = r^2\pi = 14{,}82 \text{ x } 3{,}1416 = 688 \text{ cm}^2.$$

El área de un orificio es: $A_{orif} = r^2\pi = 42 \text{ x } 3{,}1416 = 50{,}3 \text{ cm}^2$, y el área total de todas las salidas es: 50,3 x 30 = 1509 cm^2; lo que es 2,2 veces mayor que el área de la tubería. Por lo tanto, se debe notar que los orificios no descargan con caudales constantes a lo largo del difusor y que los últimos orificios no tendrán descargas o descargas a caudales muy bajos.

Considerando que los *software* de simulación de la dilución inicial suponen un difusor con características hidráulicas adecuadas, y que el caudal en todos los orificios debe ser constante, para la evaluación de la dilución inicial del emisor actual se deberá considerar que solamente aquellos orificios descargarán, y que en suma tienen un área menor que el área de la tubería:

$$n_{orificios \text{ con descarga}} = A_{tub}/A_{orif} = 688 / 50{,}3 = 13{,}7$$

Por lo tanto, en la evaluación del emisor actual se consideran solo los primeros catorce orificios, ya que los dieciséis últimos no presentan descarga ninguna o muestran un caudal de descarga muy bajo.

Determinación de la dilución inicial mínima (S_a) del emisor actual

Con la finalidad de determinar la dilución inicial que alcanza el actual dispositivo de descarga, se presenta la simulación de la descarga de aguas residuales actual mediante el software XXX.

Los parámetros de entrada al modelo son los siguientes:

- Las características de las aguas residuales:

TIPO DE DESCARGA	CAUDAL (L/S)	TEMPERATURA (°C)	SALINIDAD (PSU)	DENSIDAD (KG/M³)*
Aguas de bombeo tratadas	78	23,5	35	1023,8
Aguas de limpieza tratadas	78	25,3	0	997,0

* La densidad ha sido calculada por el software en función de la temperatura y la salinidad.

- El emisor submarino tiene los siguientes parámetros de diseño:
  - Diámetro interno: 296 mm (HDPE-DN315).
  - Longitud: 950 m (50 m en tierra y 900 m en mar).
  - Número de orificios: 14.
  - Distancia entre los orificios: 1 m.
  - Diámetro del orificio: 80 mm.
  - Orientación vertical del eje de los orificios: 90° (descarga vertical).
  - Orientación horizontal del eje de los orificios no relevante, por tratarse de descarga vertical.

- El cuerpo receptor en la ubicación de la descarga tiene las siguientes características:
  - Profundidad de descarga: 8,2 m (8,5 m correspondientes a la profundidad media del cuerpo receptor en la ubicación del difusor, menos 0,3 m correspondientes a la altura de descarga sobre el fondo).
  - Densidad: 1025,3 kg/m^3 (valor calculado por el software en función de la temperatura y la salinidad).
  - Corrientes marinas mínimas (véase el numeral VI.9.3.2) orientadas al N-O (dirección de flujo predominante).

Con estos datos de ingreso, se han calculado las siguientes diluciones iniciales mínimas.

Tabla 110. Dilución inicial mínima del emisor submarino actual.

TIPO DE DESCARGA	DILUCIÓN IICIAL MÍNIMA	DILUCIÓN REQUERIDA PARA PODER CUMPLIR LOS ECA-AGUA
Aguas de bombeo tratadas	84	1463
Aguas de limpieza tratadas	100	1067

Considerando los resultados de la simulación, se debe notar que el emisor actual logra diluciones iniciales mínimas, muy inferiores a la dilución requerida para poder cumplir con los ECA-Agua. Por lo tanto, se confirmó que el actual vertimiento de aguas residuales industriales causa los incumplimientos de los ECA-Agua en el cuerpo receptor.

Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla

La extensión máxima de la zona de mezcla del vertimiento de aguas residuales industriales fue calculada mediante el modelo de simulación, aplicando las características del emisor submarino y del cuerpo receptor indicados anteriormente; sin embargo, en el lugar de la corriente marina mínima se aplican las velocidades máximas (véase el numeral VI.9.3.2.).

En los siguientes gráficos se representan los resultados de la simulación en las condiciones de corriente máxima; la línea y los puntos rojos corresponden a los resultados de la corrida con el agua de bombeo tratada, y los azules al agua de limpieza tratada.

Gráfico 69. Eje central y límites de la pluma de aguas residuales (profundidad vs. distancia del emisor, en metros)

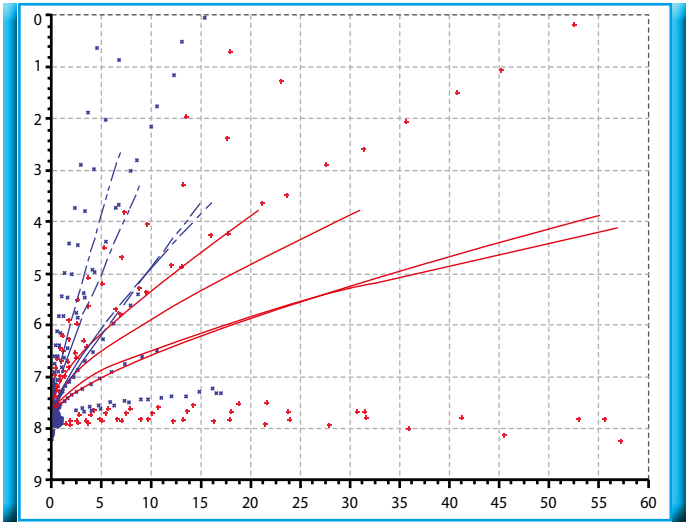
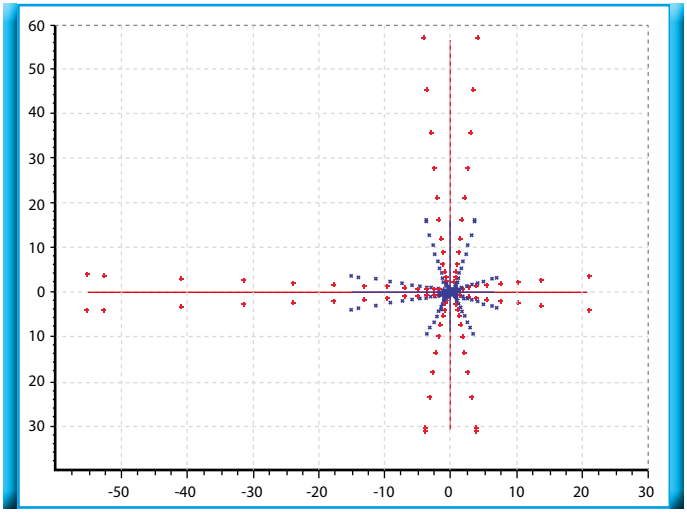


Gráfico 70. Vista plana de la pluma de aguas residuales (distancias del emisor en metros)



La simulación en las condiciones de corriente máxima demuestra que la zona de mezcla no excede una distancia de 60 m medidos desde el emisor submarino. Esta extensión máxima se observa para la descarga de agua de bombeo tratada y con corriente en dirección norte. En dirección sur, la extensión máxima es de 31 m; en el este, 22 m, y en el oeste, 55 m. Asimismo, se nota que el agua de limpieza, debido a su menor densidad, sube rápidamente a la superficie, resultando en una zona de mezcla de menor extensión.

Con lo anterior se comprobó que los puntos de monitoreo M-2, M-3 y M-5 están ubicados fuera de la zona de mezcla y, por lo tanto, son válidos para el control de los ECA-Agua.

6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Dado que la actual calidad de las aguas residuales tratadas y el dispositivo de descarga no permiten cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, se deberá prever mecanismos que permitan reducir la carga contaminante del efluente o reconsiderar el diseño del emisor submarino. A seguir se evalúan estas dos alternativas.

6.1 Reducción de la carga contaminante del efluente

Para reducir la carga contaminante del efluente se recomienda disminuir el caudal de aguas residuales vertidas, las concentraciones de los contaminantes críticos, o ambos, caudal y concentraciones, considerando las siguientes opciones:

- Implementación de tecnologías limpias que reduzcan el volumen y/o la carga de las aguas residuales generadas, que pueden abarcar también el reúso/recirculación parcial o total de las aguas residuales.
- Modificación del proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia de remoción de los parámetros críticos.

Ambas opciones se discuten a continuación.

Implementación de tecnologías limpias

Considerando que el agua de bombeo corresponde al mayor volumen de los dos efluentes vertidos al mar con las mayores concentraciones, las medidas para la reducción de la carga contaminante deberán concentrarse sobre este tipo de efluente. A nivel internacional, muchos países han dejado de usar sistemas de bombeo húmedo precisamente porque generan grandes volúmenes de agua de bombeo y, con ello, excesivas pérdidas de rendimiento, y afectan la calidad del cuerpo natural marino-costero. Sin embargo, en el caso de la planta pesquera objeto de este estudio, no se puede prescindir de los sistemas húmedos por la peculiar línea costera somera que impide que las embarcaciones se acerquen a menos de 500 m de la costa.

Como parte de un proyecto financiado por USAID,[69] en 1996 un equipo de consultores técnicos estudió el problema del agua de bombeo sistemáticamente, con la finalidad de identificar cómo minimizar las pérdidas de materia prima y reducir el impacto ambiental. Posteriormente propusieron un paquete de diferentes tecnologías y modificaciones de procesos, que en conjunto podrían ser efectivos para recuperar casi la totalidad de la materia prima del agua de bombeo y reducir el impacto ambiental a un mínimo. Este paquete se ha denominado Sistema de Recirculación del Agua de Bombeo. Dicho sistema posibilita recuperar casi toda la proteína y el aceite que actualmente se pierden con el agua de bombeo descargada al mar, y la incorporación de lo recuperado en la producción. El concepto básico es reciclar y reusar la misma agua de bombeo para múltiples descargas de materia prima de las embarcaciones y luego evaporarla en la planta evaporadora. Cada vez que el agua de bombeo llega a la planta y es separada del pescado, pasa por una serie de pasos para remover tanto aceite y proteína como sea posible. Luego es bombeada de regreso a la embarcación para ser reusada. Con el tiempo, el agua de bombeo contendrá altos porcentajes de proteína disuelta, haciendo que la evaporación del agua y la recuperación de la proteína sean técnica y económicamente factibles. La recirculación ofrece varias ventajas: cualquier sistema se puede adaptar, permite la recuperación de la totalidad de la materia prima y usa mucho menos agua (en EE. UU. la razón de agua a pescado es de 0,3 a 1,0). Sin embargo, se deberá tomar algunas precauciones para evitar la formación de gases, y se debe usar agua dulce para eliminar el problema de la cristalización de sales en la planta evaporadora.

El sistema de recirculación consiste de los siguientes componentes:

- Una bomba de pescado ecológica con una baja relación de agua/pescado.
- Una tubería de baja fricción de PVC para transferir el pescado de la chata a la planta.
- Una tubería submarina de regreso de la planta a la chata.
- Un sistema de filtración y flotación que remueve el aceite y los sólidos suspendidos del agua de bombeo en cada pase.
- Un tanque de amortiguación para eliminar las fluctuaciones del caudal.
- Un tanque de retención para recibir el agua reciclada cargada de proteínas que será enviada a la planta evaporadora.
- Una planta evaporadora para la recuperación de la materia disuelta.

69 The Environmental Pollution Prevention Project-EP3 (1996). Prácticas recomendadas para mejorar la eficiencia de los procesos en la industria de harina de pescado. Arlington, Virginia, EE. UU.

El informe final del proyecto dejó constancia de que el costo total de este sistema puede ser recuperado en menos de un año debido al menor grado de pérdida de materia prima y un consecuente mayor rendimiento. Además, los residuos orgánicos al mar se reducirán en 90%.

En el caso de la planta de harina y pescado objeto del presente estudio, el periodo de recuperación de la inversión será todavía inferior, ya que cuenta con los componentes más costosos del sistema de recirculación, como la bomba ecológica, el sistema de filtración y flotación y la planta evaporadora.

Sin embargo, no existe una fuente de agua dulce en proximidad de la planta, lo que constituye un serio impedimento para la implementación del sistema de recirculación.

Modificación del proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales

Para calcular la concentración máxima admisible del vertimiento ($C_{vert,admi}$), que permitirá cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, se aplica la siguiente ecuación:

$$C_{vert,admi} = S_a \times (C_{ECA,i} - C_{RH,i}) + C_{ECA,i}$$

Donde:

S_a : Dilución inicial mínima del emisor actual, determinada en lo anterior.

$C_{ECA,i}$: ECA-Agua del parámetro i.

$C_{RH,i}$: Concentración de fondo del parámetro i en el cuerpo receptor.

Tabla 111. Concentración máxima admisible del vertimiento que permitirá cumplir con los ECA-Agua en el cuerpo receptor, manteniendo el actual emisor submarino

PARÁMETRO	DILUCIÓN INICIAL MÍNIMA DEL EMISOR ACTUAL	C_{ECA}	C_{RH}	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN LAS AGUAS RESIDUALES	$C_{VERT,ADMI}$	EFICIENCIA DE TRATAMIENTO REQUERIDA
	---	MG/L	MG/L	MG/L	MG/L	%
A y g	100	1,0	0,0	1464	101	93%
DBO_5	100	10,0	0,0	10200	1010	90%
SST	100	30,0	16,5	2488	1380	45%

Manteniendo el emisor submarino actual, se debería reducir las concentraciones en el efluente de los aceites y grasas a 101 mg/L (93% de remoción), de la demanda bioquímica de oxígeno a 1010 mg/L (90% de remoción) y de los sólidos suspendidos totales a 1380 mg/L (45% de remoción).

Considerando que la planta ya en el año 2011 ha implementado las mejores tecnologías de tratamiento físico disponibles, el tratamiento biológico de las aguas residuales es la única opción para lograr las eficiencias requeridas indicadas en la tabla 111.

Al respecto, se debe considerar la naturaleza del proceso productivo que se realiza en pocas semanas del año solamente; bajo tales condiciones, técnicamente es imposible mantener un proceso de depuración biológico (lodos activados, filtros percoladores, tanques anaeróbicos, etcétera), que necesita ser alimentado constantemente con aguas residuales para mantener la masa microbiológica. No obstante, el tratamiento biológico podría llevarse a cabo en una PTAR municipal junto con las aguas residuales urbanas. Sin embargo, en el caso específico no existe una PTAR municipal en la proximidad de la planta y, por lo tanto, el tratamiento biológico técnicamente no es viable.

Evaluación de alternativas de diseño del emisor submarino

Para lograr una mayor dilución inicial se cuenta con las siguientes opciones de diseño:

- Incrementar la longitud del emisor para lograr una mayor profundidad de descarga.
- Disminuir el diámetro de los orificios e incrementar al mismo tiempo el número de orificios y el espacio entre ellos, aumentando la longitud del difusor.

En el caso del vertimiento evaluado, la batimetría local muestra una pendiente del fondo marino muy baja (0,2%) orientada mar adentro; en tales condiciones, un incremento de la longitud del emisor resulta en incrementos muy bajos de la profundidad de descarga. Por ejemplo, el incremento de la longitud del emisor de 1 km corresponde a un incremento de la profundidad de descarga de 2 m solamente. Por lo tanto, el incremento de la longitud del emisor tiene una relación de costo-beneficio muy baja en materia del incremento de la dilución inicial. Por lo tanto, en el caso específico se prioriza la segunda opción de diseño, disminuir el diámetro de los orificios e incrementar al mismo tiempo el número de orificios y el espacio entre ellos. Incrementando la longitud del difusor aumenta la dilución en proporción directa aun con profundidades casi constantes, ya que es el aumento del área del agua renovadora sobre el difusor lo que determinará la dilución.

Los parámetros de ingreso del modelo fueron determinados según el siguiente detalle:

- Características de las aguas residuales:
  - Caudal máximo: 78 L/s.

– Densidad: 1023,8 kg/m^3 (aguas de bombeo tratadas) y 997,0 kg/m^3 (aguas de limpieza tratadas).

- Características del emisor submarino:
  – Tipo tubería: HDPE-DN315.
  – Longitud del emisor: 950 m (50 m en tierra y 900 m en mar). Para reducir los costos de la modificación del emisor, se prevé utilizar el emisor actual y modificar el difusor solamente. Para tal fin, se cerrarán los orificios actuales con abrazaderas para tubos en HDPE y se perforarán nuevos orificios en la tubería existente.
  – Diámetro interno del emisor y difusor: 296 mm (seleccionado para mantener la velocidad de flujo en el emisor en aproximadamente 1 m/s, que resulta en una carga de bombeo mínima y al mismo tiempo impide la sedimentación de materia suspendida al interior del emisor).
  – Orientación horizontal del eje de los orificios: norte-norte-oeste o 120° medidos desde el este en sentido antihorario (en paralelo a la orilla de playa). Por ende, la orientación del difusor es perpendicular a la costa.
- Características del cuerpo receptor en la ubicación de la descarga:
  – Profundidad de descarga: 8,2 m (profundidad media del cuerpo receptor en la ubicación del difusor de 8,5 me, menos 0,3 metros correspondientes a la altura de descarga sobre el fondo).
  – Densidad: 1 025,3 kg/m^3 (calculado por el software en función de la temperatura y la salinidad).
  – Dirección de corrientes: norte-oeste o 135° medidos desde el este en sentido antihorario (correspondiente a la dirección de corriente predominante, véase el numeral VI.9.3.2).
  – Corrientes marinas mínimas (véase el numeral VI.9.3.2).

El diámetro de los orificios, su ángulo vertical de descarga y su separación han sido optimizados de forma iterativa con el modelo de simulación, con la finalidad de obtener la dilución requerida mientras la longitud del difusor mínima?

La evaluación de las alternativas de diseño del difusor resultó en los siguientes parámetros de diseño que permitirán lograr la dilución inicial máxima:

- Diámetro del orificio: 35 mm (determinado iterativamente reduciendo el diámetro gradualmente hasta obtener la dilución requerida).
- Número de orificios: 65 (calculados con la condición de que la relación entre el área total de los orificios y el área de la tubería debe ser aproximadamente 1 a 0,9 (Brooks, 1970), para garantizar el funcionamiento hidráulico del difusor).

- Distancia entre los orificios: 5,0 m (determinada iterativamente reduciendo la distancia gradualmente hasta obtener la dilución requerida).
- Longitud del difusor: 320 m (calculado con: número de orificios – 1 x distancia).
- Ángulo vertical de descarga: 0°, descarga horizontal (determinado iterativamente modificando el ángulo gradualmente hasta obtener la dilución inicial máxima).

Con las características indicadas, el emisor submarino logra, en las condiciones más críticas (corriente mínima), las siguientes diluciones mínimas.

Tabla 112. Dilución inicial mínima del emisor submarino propuesto

TIPO DE DESCARGA	DILUCIÓN INICIAL MÍNIMA	DILUCIÓN REQUERIDA PARA PODER CUMPLIR LOS ECA-AGUA
Aguas de bombeo tratadas	1488	1463
Aguas de limpieza tratadas	1120	1067

Las diluciones mínimas son mayores que las diluciones requeridas; por lo tanto, el emisor submarino es apto para la descarga de las aguas residuales tratadas y permitirá cumplir con los ECA-Agua en el límite de la zona de mezcla.

Sin embargo, considerando el diámetro de los orificios de solamente 35 mm y el consecuente riesgo de obstrucción, será necesario realizar la manutención y limpieza de los orificios regularmente. Asimismo, se deberá instalar un tamiz fino después de la cámara de registro para evitar que sólidos gruesos ingresen al emisor y obstruyan los orificios.

Determinación de la extensión máxima de la zona de mezcla

La extensión máxima de la zona de mezcla fue calculada mediante el modelo de simulación, aplicando los siguientes parámetros:

- Las características de las aguas residuales:

TIPO DE DESCARGA	CAUDAL (L/S)	TEMPERATURA (°C)	SALINIDAD (PSU)	DENSIDAD (KG/M³)*
Aguas de bombeo tratadas	78	23,5	35	1023,8
Aguas de limpieza tratadas	78	25,3	0	997,0

* Valor calculado por el software en función de la temperatura y salinidad.

- El emisor submarino tiene los parámetros de diseño indicados en lo anterior.
- El cuerpo receptor, en la ubicación de la descarga, tiene las siguientes características:

– Profundidad de descarga: 8,2 m.

– Densidad: 1025,3 kg/m^3.

– Velocidad de corrientes máximas en las diferentes direcciones (véase el numeral VI.9.3.2).

En los siguientes gráficos se representan los resultados de la simulación en las condiciones de corriente máxima; la línea y los puntos rojos corresponden a los resultados de la corrida con el agua de bombeo tratada, y los azules al agua de limpieza tratada.

Gráfico 71. Eje central y límites de la pluma de aguas residuales (profundidad vs. distancia, en metros)

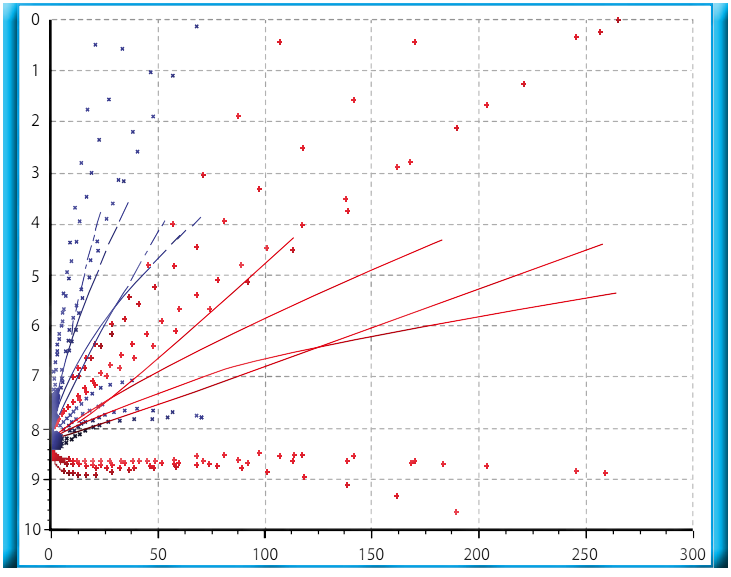
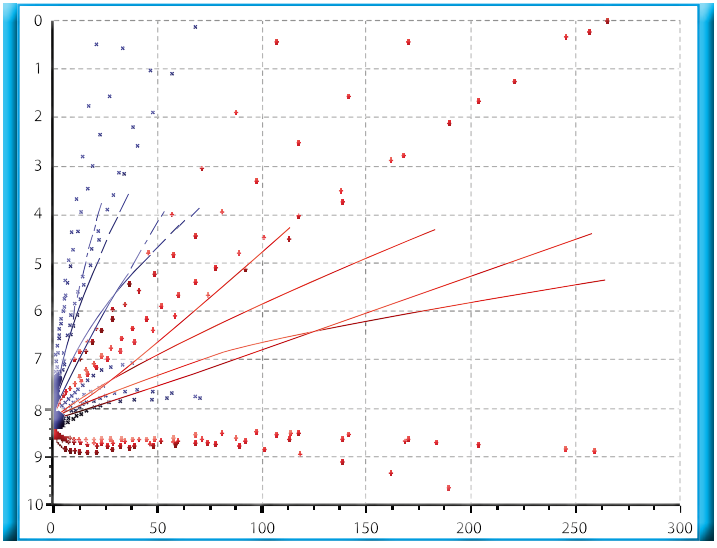


Gráfico 72. Dilución inicial media en condiciones de corriente máxima (dilución inicial media vs. distancia, en metros)



La simulación en las condiciones de corriente máxima demuestra que la zona de mezcla no excede una distancia de 280 m medidos desde el emisor submarino. Esta extensión máxima se observa para la descarga de agua de bombeo tratada y con corriente en dirección oeste. En dirección norte la extensión máxima son 260 m, en dirección sur 190 m y este 110 m. Asimismo, se nota que el agua de limpieza, debido a su menor densidad, sube rápidamente a la superficie, resultando en una zona de mezcla de menor extensión.

En el gráfico de la dilución inicial media en condiciones de corriente máxima, se observa que la dilución inicial a una distancia de 200 m es significativamente mayor que la dilución requerida para el cumplimiento de los ECA-Agua. Por lo tanto, se recomienda establecer una zona de mezcla que no exceda una distancia de 200 m desde el difusor, lo que está conforme con el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, aprobado con la R.J. N° 010-2016-ANA, que establece que el muestreo del cuerpo receptor deberá realizarse a 200 m del final del emisor (descarga), siguiendo la dirección de la corriente prevaleciente.

Por lo tanto, la zona de mezcla se extiende por una superficie de 400 m de ancho (200 m al sur y al norte) y 720 metros de largo (320 m longitud del difusor + 200 m al este y al oeste). En esta área no se encuentran áreas habilitadas para desarrollar actividades de acuicultura o donde se haya otorgado un derecho de uso

acuícola, áreas donde se realizan actividades recreativas de contacto primario, áreas naturales protegidas o ecosistemas frágiles reconocidos por las autoridades ambientales o sectoriales. Asimismo, el emisor submarino no está ubicado en proximidad de una bahía, así que no existe un riesgo de acumulación de contaminantes y de incumplimiento de los ECA-Agua en el largo plazo. Por lo tanto, no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla.

7. CRITERIOS PARA EL CONTROL DE LOS IMPACTOS DEL VERTIMIENTO EN EL CUERPO NATURAL DE AGUA

A continuación se propone el programa de control de los impactos del vertimiento en el cuerpo natural de agua, el cual comprende la determinación de las cargas contaminantes en las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial.

Tabla 113. Programa de control del efluente en establecimientos industriales pesqueros (EIP) de consumo humano indirecto (CHI)

PUNTO DE MUESTREO (CÓDIGO DE MUESTREO GEOREFERENCIADO- UTM (WGS 84)	PARÁMETROS DE CONTROL DE EFLUENTES DE CONSUMO HUMANO INDIRECTO (CHI)	FRECUENCIA DE CONTROL		
		PHAP		PHRRH
		VEDA	PRODUCCIÓN	
Efluentes industriales del proceso	Caudal (Q), temperatura (T), pH, aceites y grasas (A y G), sólidos suspendidos totales (SST), DBO_5, coliformes termotelarantes (*), DQO (***)		Un monitoreo mensual con descarga de materia prima (producción)	Trimestral
Efluentes de limpieza y matenimiento		Uno después de cada temporada de pesca		
Efluente de la columna barométrica CB)			Un monitoreo al finalizar cada temporada de pesca en EIP que descragan CB de formas independiente	

Nota: La toma de muestra de los efluentes será realizada en la caja de registro antes de su descarga al mar.

* Plantas de CHI que descargan los efluentes domésticos tratados a un medio natural. Las plantas que tengan sistema de tratamiento biológico de efluentes residuales domésticos (PTAR) no monitorearán dicho parámetro.

** Los EIP de CHI y CHD que descargan sus efluentes domésticos tratados a la red de alcantarillado deben considerar los parámetros considerados por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

*** Plantas de reaprovechamiento de recursos hidrobiológicos.

PHAP: Plantas de Harina y Aceite de Pescado.

PHRRH: Planta Harina de Reaprovechamiento de Recursos Hidrobiológicos (Según la R.M. N° 061-2016-PRODUCE).

Tabla 114. Programa de control del efluente en establecimientos industriales pesqueros (EIP) de consumo humano directo (CHD)

PUNTO DE MUESTREO (CÓDIGO GEOREFENRECIADO- UTM (WGS 84)	PARÁMETROS DE CONTROL DE EFLUENTES DE CONSUMO HUMANO DIRECTO (CHD)	FRECUENCIA DE CONTROL
Efluentes industriales del proceso de CHD que vierten a un cuerpo natural	Caudal (Q), temperatura (T), pH, aceites y grasas (A y G), sólidos suspendidos totales (SST), DBO_5, coliformes termotelarantes (*) y (**), DQO	Semestral
Efluentes industriales del proceso de CHD con PHRC, que vierten a un cuerpo natural		Trimestral

Nota: La toma de muestra de los efluentes será realizada en la caja de registro antes de su descarga al mar.

* Los EIP de CHD con licencia de operación vigente que no operen por falta de materia prima, deberán presentar a PRODUCE, en forma individual, el informe de registro de recepción de materia prima correspondiente.

** Los EIP de CHI y CHD que descargan sus efluentes domésticos tratados a la red de alcantarillado deben considerar los parámetros considerados por el Ministerio de Vivienda, Construccion y Saneamiento.

PHRC: Planta Harina de Residual accesoria a la actividad de CHD (según la R.M. N° 061-2016-PRODUCE).

Tabla 115. Programa de control de la calidad del cuerpo natural de agua

CÓDIGO	CUERPO NATURAL DE AGUA		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	PROFUNDIDAD	PARÁMETROS DE CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL1	COORDENADAS - UTM ($WGS8_4$)		
	NOMBRE	CAT. ECA					ZONA	NORTE	ESTE
M-1-s	Mar XXXXX	x	200 m al norte del centro del difusor	Superficie	Según categorías establecidas en la R. J. Nº 010-2016-ANA	Según frecuencia establecida en la R.M. N° 061-2016-PRODUCE	XX	XXXXX	XXXXX
M-1-f				Fondo a 50 cm del sustrato					
M-2-s	Mar XXXXX	x	200 m al oeste del final del difusor	Superficie			XX	XXXXX	XXXXX
M-2-f				Fondo a 50 cm del sustrato					
M-3-s	Mar XXXXX	x	200 m al sur del centro del difusor	Superficie			XX	XXXXX	XXXXX
M-3-f				Fondo a 50 cm del sustrato					
M-4-s	Mar XXXXX	x	200 m al este del inicio del difusor	Superficie			XX	XXXXX	XXXXX
M-4-f				Fondo a 50 cm del sustrato					

1 La frecuencia de control ha sido establecida en conformidad con el Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto, aprobado por el Ministerio de la Producción (R.M. N°061-2016-PRODUCE).

La toma de muestra del efluente y en el cuerpo receptor será realizada en las mismas fechas y en conformidad con el Protocolo para el Monitoreo de Efluentes de los Establecimientos Industriales Pesqueros de Consumo Humano Directo e Indirecto, aprobada mediante R.M. N° 061-2016-PRODUCE y la R. J. Nº 010-2016-ANA, que aprueba el Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de los Cuerpos Naturales de Agua Superficiales, respectivamente.

8. CONCLUSIONES

- La planta de harina y aceite en el año 2011 ha implementado las mejores tecnologías disponibles para la reducción del volumen y de la carga de las aguas residuales. Sin embargo, en los monitoreos de la calidad del agua del cuerpo receptor posteriores se evidenció frecuentes incumplimientos de los ECA-Agua.
- La evaluación del actual emisor submarino ha evidenciado que:
  - Los puntos de monitoreo están ubicados fuera de la zona de mezcla y son válidos para el control de los ECA-Agua.
  - La dilución inicial lograda con el emisor actual queda significativamente debajo de la dilución requerida para cumplir los ECA-Agua.
- Se ha evaluado dos (2) alternativas que permiten eliminar el riesgo de impactos no aceptables:
  - La reducción de la carga contaminante a través de la recirculación del agua de bombeo y un mayor nivel de tratamiento de los parámetros críticos.
  - La modificación del actual emisor submarino.
- La alternativa de recirculación del agua de bombeo técnicamente no es viable, dado que no existe una fuente de agua dulce en proximidad de la planta, que es un prerrequisito para la evaporación del agua de bombeo en la planta evaporadora.
- La alternativa de mayor tratamiento técnicamente no es viable, dado que los sistemas de tratamiento biológicos requieren un flujo continuo de aguas residuales, el cual por la estacionalidad de la producción no es factible. Asimismo, no existe una PTAR municipal en la cual se podría tratar el agua residual de la planta.
- La evaluación de un nuevo emisor ha demostrado que un difusor de 300 m de longitud con 65 orificios de un diámetro de 35 mm orientados horizontalmente y hacia el norte, permitirá lograr la dilución requerida para poder cumplir los ECA-Agua.

- Para reducir los costos de la modificación del emisor, se prevé utilizar el emisor actual y cambiar el difusor solamente. A tal fin, se cerrará los orificios actuales con abrazaderas para tubos en HDPE y se perforará nuevos orificios en la tubería existente.
- La zona de mezcla tiene una extensión máxima de 720 m en dirección este-oeste y 400 m en sur-norte; no ocupa áreas habilitadas para desarrollar actividades de acuicultura o donde se haya otorgado un derecho de uso acuícola, áreas donde se realizan actividades recreativas de contacto primario, áreas naturales protegidas o ecosistemas frágiles reconocidos por las autoridades ambientales o sectoriales. Por lo tanto, no existe un impedimento para establecer la zona de mezcla.
- El programa de control propuesto comprende la determinación de las cargas contaminantes de los parámetros característicos de las aguas residuales tratadas, así como de la calidad del agua superficial en cuatro puntos de control establecidos a 200 m al norte, oeste, sur y este del difusor. Las muestras serán tomadas en la superficie y adicionalmente a 50 cm del fondo. El control del efluente y en el cuerpo receptor será realizado en el periodo de producción con una frecuencia mensual.

GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA Y LA EVALUACIÓN
DEL IMPACTO DEL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
TRATADAS A UN CUERPO NATURAL DE AGUA.

Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de:
Anghelo Manuel Rodríguez Paredes
en el mes de agosto 2017

Tiraje 500 ejemplares