Estado Plurinacional
de Bolivia

MMAyA
Ministerio de Medio Ambiente y Agua

PLAN MAESTRO INTEGRAL DE AGUA Y SANEAMIENTO DEL VALLE CENTRAL DE TARIJA BOLIVIA

INFORME ESPECIAL Nº2
ESTRATEGIAS DE SANEAMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN Y EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS SERVIDAS, INCLUYENDO UN DETALLADO ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

TYPSA GITEC LWB LandandWaterBolivia Aguilar & Asociados

TARIJA, 2015

INFORME ESPECIAL Nº2
ESTRATEGIA DE SANEAMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN Y EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS SERVIDAS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. ANTECEDENTES 1
1.2. OBJETIVOS 1
2. ESTRATEGIA PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES 1
2.1. SITUACIÓN ACTUAL 1
2.1.1. Tarija 1
2.1.2. San Lorenzo 3
2.1.3. Uriondo 3
2.1.4. Padcaya 3
2.2. ESTRATEGIA PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES A FUTURO 4
2.2.1. Tarija 4
2.2.2. San Lorenzo 6
2.2.3. Uriondo 7
2.2.4. Padcaya 9
3. ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 11
3.1. SITUACIÓN ACTUAL 11
3.1.1. PTAR de San Luis 11
3.1.2. PTAR de San Lorenzo 11
3.1.3. PTAR de Uriondo 11
3.1.4. Tratamiento en Padcaya 12
3.2. ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS SERVIDAS 12
3.2.1. Ley 1333 de Medio Ambiente 12
3.2.2. Estrategia para el tratamiento en etapas 12
3.2.3. Reutilización de aguas servidas para regadío 13
3.2.4. Tratamiento de fangos para uso agrícola 14
3.2.5. Caracterización de las aguas residuales 15
3.2.6. Caudales de diseño 15
3.2.7. Alternativas de tratamiento 16
3.2.7.1. Factores para la elección de las alternativas de tratamiento 16
3.2.7.2. Alternativas de tratamiento estudiadas y su grado de mecanización 16
3.2.7.3. Diagramas de flujo de las alternativas estudiadas para las PTARs 20
3.2.8. Descripción de las alternativas estudiadas para cada PTAR 28
3.2.8.1. Diseño de PTARs para San Lorenzo, Padcaya y Uriondo PTARs 28
3.2.8.2. PTAR San Luis – Tarija 29
3.3. SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS 31
3.3.1. Costes de inversión y explotación de todas las alternativas 31
3.3.2. Alternativas seleccionadas para cada PTAR 33
4. RIO GUADALQUIVIR 38
4.1. USOS DE LAS AGUAS DEL RÍO GUADALQUIVIR 38

ÍNDICE

4.1.1. Río Guadalquivir - Tramo población San Lorenzo 38
4.1.2. Río Guadalquivir - Tramo ciudad de Tarija 39
4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA 40
4.2.1. Campaña de Muestreo 40
4.2.1.1. Rio Guadalquivir Zona San Lorenzo 41
4.2.1.2. Rio Guadalquivir Zona Tarija 42
4.2.2. Clasificación para el río Guadalquivir 44
4.3. DESCARGAS DE AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS AL RÍO GUADALQUIVIR 48
4.4. DESCARGAS DE AGUAS INDUSTRIALES AL RÍO GUADALQUIVIR 51
5. MODELACIÓN DEL RIO GUADALQUIVIR 55
5.1. INTRODUCCIÓN 55
5.2. MIKE 11 – MODELO ALTERNATIVO PARA LA SIMULACIÓN DE RIOS Y CANALES 55
5.2.1. Selección del modelo 55
5.2.2. Formulación del modelo 56
5.2.2.1. Editor de simulación 57
5.2.2.2. Editor de red 57
5.2.2.3. Editor de sección transversal 57
5.2.2.4. Editor de contorno 58
5.2.2.5. Editores de parámetros 58
5.2.3. Representación conceptual 58
5.2.3.1. Módulo hidrodinámico (HD) 58
5.2.3.2. Módulo de advección - dispersión (AD) 58
5.2.3.3. Módulo de calidad de agua - Laboratorio ecológico (WQ ECO Lab) 59
5.3. REPRESENTACION FUNCIONAL 59
5.3.1. Ecuaciones de Saint Venant 59
5.3.1.1. Ecuación de energía en estado permanente 60
5.3.1.2. Método de integración numérica 61
5.3.1.3. Resistencia del lecho 62
5.3.1.4. Ecuación de advección - dispersión 63
5.3.1.5. Coeficiente de dispersión 63
5.3.1.6. Degradación de materia orgánica en fase acuosa 64
5.3.1.7. Procesos que afectan la concentración del oxígeno disuelto 64
5.3.1.8. Coeficiente de Arrhenius 65
5.4. DIAGNÓSTICO DEL RÍO GUADALQUIVIR CON FINES DE MODELACIÓN MATEMÁTICA 65
5.4.1. Introducción 65
5.4.2. Configuración de la representación básica del sistema 66
5.4.3. Simplificación y esquematización gráfica del sistema fluvial 66
5.4.3.1. Características geométricas y físicas 67
5.4.3.2. Sistema de coordenadas 67
5.4.3.3. Pendiente 68
5.4.3.4. Sección transversal 68
5.4.3.5. Coeficiente de rugosidad de manning “n” 68

ÍNDICE

5.4.3.6. Características hidrodinámicas 69
5.4.3.7. Características de calidad del agua 69
5.4.3.8. Radiación solar 69
5.4.3.9. Coeficiente "θ" de corrección de la temperatura 70
5.4.3.10. Coeficiente de dispersión 70
5.4.3.11. Tasa de desoxigenación – "k_1" 71
5.4.3.12. Tasa de reaireación – "k_2" 72
5.4.3.13. Concentración media de saturación del oxígeno – "k_m" 72
5.4.3.14. Condiciones iniciales y de contorno del sistema 73
5.4.3.15. Condiciones iniciales 73
5.4.3.16. Condiciones de borde 74
5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 77
5.5.1. Calibración y verificación del modelo 77
5.5.1.1. Calibración de los módulos: hidrodinámico versus calidad de agua 78
5.5.1.2. Aplicación del método de calibración iterativa 78
5.5.1.3. Cuantificación de la incertidumbre de los parámetros seleccionados 80
5.5.2. Simulación y análisis de escenarios 83
5.5.2.1. Proyección de las condiciones de borde 83
5.5.2.2. Evaluación de alternativas de saneamiento para el río Guadalquivir 85
5.6. CARACTERIZACIÓN DEL RIO GUADALQUIVIR SEGÚN SU APTITUD DE USO 87
5.7. RECOMENDACIONES AL MODELO 89
6. CONCLUSIONES 91
7. REFERENCIAS 91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Coberturas de saneamiento por quinquenio - Tarija 4
Tabla 2.2. Coberturas de saneamiento por quinquenio – San Lorenzo 6
Tabla 2.3: Coberturas de saneamiento por quinquenio – Uriondo 8
Tabla 2.4: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Padcaya 9
Tabla 3.1: Usos y tratamiento para la reutilización de aguas servidas 13
Tabla 3.2: Usos y tratamientos para fangos 14
Tabla 3.3: Producción anual de fangos actual y futura 14
Tabla 3.4: Valores medios de las concentraciones del afluente para el diseño de PTARs 15
Tabla 3.5: Caudales de diseño para la PTAR de San Luis 15
Tabla 3.6: Caudales de diseño para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya - 2036 15
Tabla 3.7: Tratamientos estudiados 16
Tabla 3.8: Parámetros de diseño principales para el pretratamiento (para todas las alternativas) 17
Tabla 3.9: Parámetros de diseño principales para el tratamiento primario 17
Tabla 3.10: Parámetros de diseño principales para el tratamiento secundario 17
Tabla 3.11: Parámetros de diseño principales para el tratamiento terciario 18
Tabla 3.12: Parámetros de diseño principales para el sistema de lagunas 19
Tabla 3.13: Parámetros de diseño principales para el tratamiento fangos 19
Tabla 3.14: Alternativas con costes de inversión y explotación - Tarija 31
Tabla 3.15: Alternativas con costes de inversión y explotación – San Lorenzo 32
Tabla 3.16: Alternativas con costes de inversión y explotación – Uriondo 32
Tabla 3.17: Alternativas con costes de inversión y explotación – Padcaya 33
Tabla 3.18: Alternativas seleccionadas 33
Tabla 4.1 Valores de caracterización del río Guadalquivir – San Lorenzo 42
Tabla 4.2 Valores de caracterización del río Guadalquivir – Tarija 43
Tabla 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca del río Guadalquivir 45
Tabla 4.4 Caracterización de las aguas servidas - Tarija 49
Tabla 4.5: Industria Bodegas Milcast Corp. 52
Tabla 4.6: Industrias PIL Tarija 52
Tabla 4.7: Industrias EMBOL S.A 53
Tabla 4.8: Industrias CBN 53
Tabla 4.9: Industria Cascada del Sur 54
Tabla 4.10: Industria Avícola Pollo Pintón 54
Tabla 5.1: Extensiones de los archivos que utiliza Mike 11 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.2: Expresiones más conocidas para determinar k2 65
Tabla 5.3: Caracterización del sistema fluvial – Puntos muestreados en el río Guadalquivir 66
Tabla 5.4: Coeficientes empíricos de corrección para distintos procesos. 70
Tabla 5.5: Constantes cinéticas de degradación de la materia orgánica 71
Tabla 5.6: Constantes cinéticas de reaireación de 1er. orden para distintos ríos a 20 ºC 72
Tabla 5.7: Condiciones de borde: hidrodinámicas (Octubre 2012) – Caudal de aguas residuales por zona de aporte 74
Tabla 5.8: Condiciones de borde: hidrodinámicas (situación actual 2012) – Tramos entre puntos muestreados en el río Guadalquivir 75
Tabla 5.9: Condiciones de borde: calidad de agua (Octubre 2012) – Descargas del río Guadalquivir 76
Tabla 5.10: Condiciones de borde: calidad de agua de descargas especiales. 77
Tabla 5.11: Coeficientes de reacción 82
Tabla 5.12: Coeficientes de reacción 84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de alcantarillado sanitario existente - Tarija 2
Figura 2.2: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Tarija 4
Figura 2.3. Sistema de alcantarillado actual y futuro - Tarija 5
Figura 2.4: Coberturas de saneamiento por quinquenio – San Lorenzo 6
Figura 2.5. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - San Lorenzo 7
Figura 2.6: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Uriondo 7
Figura 2.7. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - Uriondo 8
Figura 2.8: Coberturas por quinquenio - Padcaya 9
Figura 2.9. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - Padcaya 10
Figura 3.1: Alternativa 1 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya 20
Figura 3.2: Alternativa 2 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya 21
Figura 3.3: Alternativa 3 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya 22
Figura 3.4: Alternativa 4 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya 23
Figura 3.5: Alternativa 1 – C1: Mejoras para la PTAR de San Luis 24
Figura 3.6: Alternativa 2 – C2: Mejoras para la PTAR de San Luis 25
Figura 3.7: Alternativa 3 – B1: PTAR nueva para San Luis 26
Figura 3.8: Alternativa 4 – B2: PTAR nueva para San Luis 27
Figura 3.9. Alternativa elegida: Alternativa 2: C2 – PTAR de San Luis 34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.10. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de San Lorenzo 35
Figura 3.11. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de Uriondo 36
Figura 3.12. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de Padcaya 37
Figura 4.1. Puntos de muestreo en el río Guadalquivir 41
Figura 4.2 Clasificación de cuerpos de agua superficiales según RMCH – Ley 1333 44
Figura 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca del río Guadalquivir 45
Figura 4.4. Clasificación del río Guadalquivir 48
Figura 4.5. Ubicación de las descargas al río Guadalquivir – Zona Tarija 50
Figura 5.1. Extensiones de los archivos que utiliza Mike11 56
Figura 5.2: Sector del canal con su mal computacional 60
Figura 5.3: Volumen de control utilizado para determinar el perfil del nivel de agua 61
Figura 5.4. Precisión de los métodos de integración numérica 62
Figura 5.5: Caracterización del sistema fluvial 67
Figura 5.6: Sección Transversal del punto de control G10 - prog. 27+415 68
Figura 5.7: Diagrama de flujo del proceso de la calibración adoptado 79
Figura 5.8: Resultados de la calibración del perfil térmico 81
Figura 5.9: Resultados de la calibración del perfil de oxígeno disuelto 82
Figura 5.10: Resultados de la calibración del perfil de la demanda bioquímica de oxígeno 83
Figura 5.11: Perfil longitudinal de la DBO (mg/l) - Escenario actual y futuro sin mejoras de tratamiento 85
Figura 5.12: Perfil longitudinal DBO (2036) – PTAR nuevas (Efluente de matadero sin tratamiento) 86
Figura 5.13: Perfil longitudinal DBO (2036) – PTAR nuevas (Efluente de matadero con tratamiento) 87
Figura 5.14: Categorización del río Guadalquivir – Situación sin mejoras de tratamiento 88
Figura 5.15: Categorización del río Guadalquivir según su aptitud de uso 89

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El Ministerio de Medio Ambiente y Agua suscribió el contrato de consultoría Nº 056 en fecha 20 de Marzo del 2012 para la elaboración de del ***Plan Maestro Integral de Agua y Saneamiento del Valle Central de Tarija***, el cual forma parte de los estudios, que de manera simultánea, se están ejecutando además en las Áreas Metropolitanas de La Paz-El Alto, Santa Cruz y el Valle Central de Tarija, los cuales se enmarcan dentro de la Primera Fase del Programa de Agua Potable y Alcantarillado para zonas periurbanas del Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA), con fecha de orden de proceder 2 de Abril de 2012, contrato que fue adjudicado al Consorcio de Consultores formado por las empresas TYPSA-GITEC - Land & Water Bolivia – Aguilar & Asociados S.R.L.

Dentro del Plan Maestro Integral se encuentra al Informe ***Especial Nº2 Estrategia de saneamiento para la recolección y el tratamiento de las aguas servidas***, incluyendo un detallado análisis de alternativas tecnológicas.

Este Informe Especial se ha realizado a partir de las dos entregas ya realizadas para la zona de Tarija, las cuales son:

- **Etapa I**: Diagnóstico de la situación actual de los servicios de agua y saneamiento.
- **Etapa II**: Demandas futuras y estrategias de expansión.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos de este Informe Especial son los siguientes para Tarija, San Lorenzo, Uriondo y Padcaya:

- Estudio del sistema alcantarillado actual y la estrategia futura hasta llegar a una cobertura final del 100%,
- Estudio del tratamiento de aguas residuales producidas en la actualidad en los Municipios de Tarija, San Lorenzo, Uriondo y Padcaya y la estrategia futura para un tratamiento completo consiguiendo una efluente para re-uso y un fango estabilizado como destino final abono en la agricultura,
- Estudio de la calidad de rio Guadalquivir debió a todos los vertidos domésticos e industriales y su futura calidad con la incorporación de una cobertura total en el sistema de alcantarillado y el tratamiento de aguas residuales.

2. ESTRATEGIA PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES

2.1. SITUACIÓN ACTUAL

2.1.1. Tarija

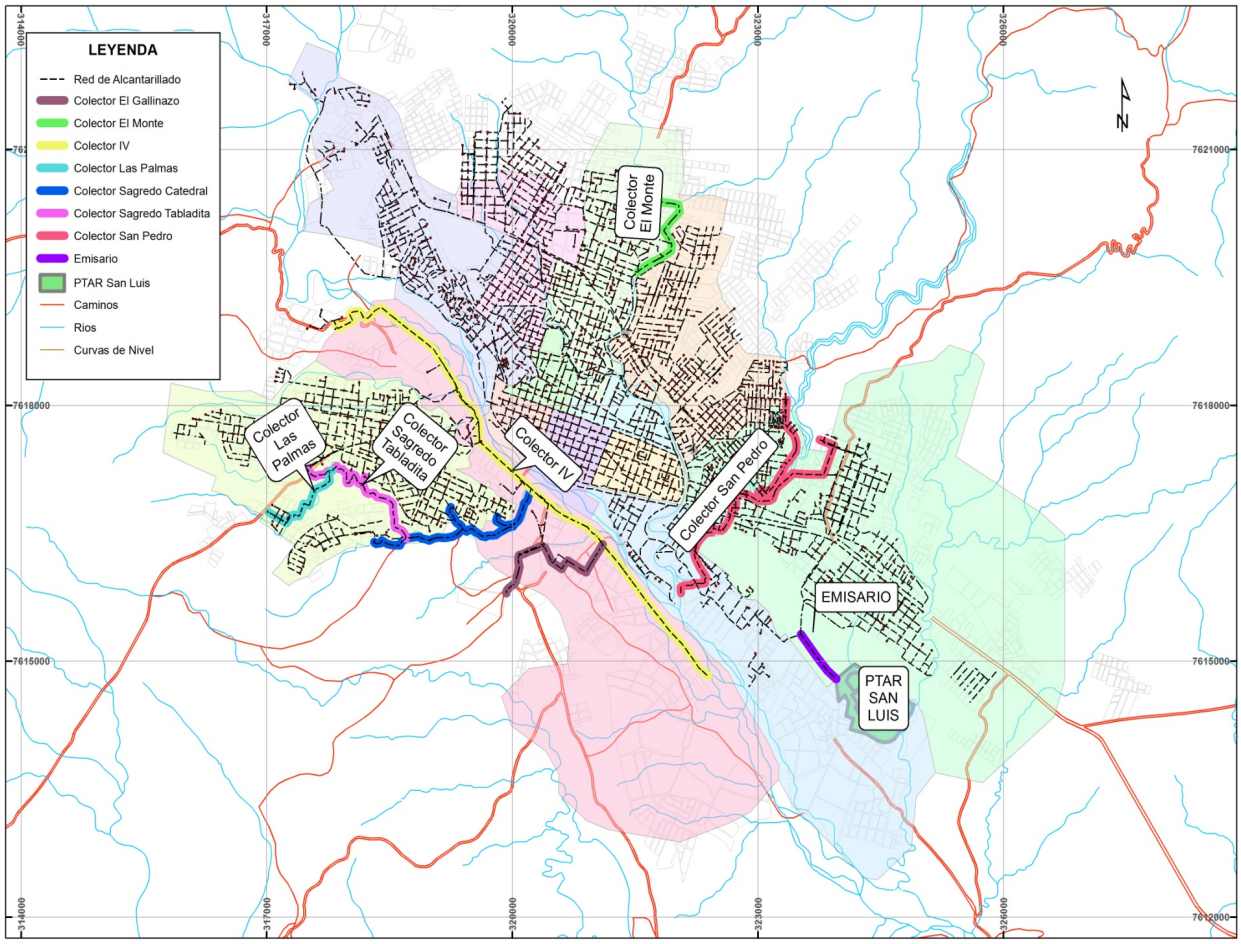
El alcantarillado sanitario en la ciudad de Tarija es de tipo gravedad con una cobertura total de 79.7% y con 27.382 conexiones[1]. La Figura 2.1 de la página siguiente muestra la red de alcantarillado sanitario existente, en la ciudad de Tarija.

Los componentes del sistema de recolección de las aguas residuales en la ciudad de Tarija son:

[1] De acuerdo a información proporcionada por COSAALT, al 31 de diciembre de 2011.

- La longitud de toda la red de colectores principales y secundarios al año 2011 es de 357.718 m, en diámetros de 6" hasta 28". De los 13 distritos, solo 9 descargan sus aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis, mientras que los otros 4 distritos descargan al rio Guadalquivir mediante cámaras sépticas y/o descargas directas al mismo río.
- Existen dos emisarios: 1) desde la Universidad Juan Misael Saracho hasta el cruce San Luis, con 3.173 m con 100 mm de diámetro; y 2) desde el cruce San Luis hasta las Lagunas en una longitud de 957 m con 1.000 mm de diámetro.
- El tratamiento de las aguas residuales se realiza en la PTAR de San Luis, la cual atiende a un 65% de los afluentes producidos en la ciudad. Esta PTAR está diseñada para un caudal de diseño de 210 (l/s) mediante un tratamiento de dos lagunas anaeróbicas, una laguna facultativa y una laguna de maduración.
- Para los sectores de la ciudad que no descargan sus aguas residuales a las lagunas, existen 11 cámaras sépticas. Dichas cámaras sépticas están completamente colapsadas y no se produce ningún tratamiento primario alguno. Es decir, sus efluentes son vertidos al río sin ningún tipo de tratamiento.
- Existe otra descarga a la quebrada de Torrecillas y esta recorre en una longitud de 3.800 ml hasta el rio Guadalquivir sin tratamiento ninguno.

Figura 2.1. Sistema de alcantarillado sanitario existente - Tarija



Fuente: Elaboración propia

El mayor problema que existe en este momento en Tarija es la escasez de tratamiento de las aguas servidas en la PTAR de San Luis existente. Esta PTAR existente de San Luis, la cual tiene muchos olores y muy pobre rendimiento por lo que no se cumple con la Ley 1333. Por otro lado, existen otros vertidos sin tratamiento que van al río Guadalquivir produciendo el empeoramiento de sus aguas.

2.1.2. San Lorenzo

El alcantarillado sanitario en la ciudad de San Lorenzo es de tipo gravedad, con una cobertura total de 80%.

El sistema de alcantarillado sanitario del área urbana del municipio de San Lorenzo es de gran cobertura. Cuenta una red de colectores, cámaras de inspección en diferentes tramos. Estos colectores están distribuidos por diferentes calles de San Lorenzo y transportan el agua hasta los lugares de tratamiento.

Para el tratamiento de las aguas servidas, San Lorenzo posee una planta de tratamiento de aguas residuales y una cámara séptica en el Barrio de San Pedro.

La longitud estimada de toda la red de colectores principales y secundarios al año 2011 es de 34.570 ml, en diámetros de 6" y descargan sus aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en la confluencia de los ríos Calama y Guadalquivir.

El mayor problema que existe en este momento en San Lorenzo es el tratamiento de las aguas servidas por ser muy pobre. La PTAR existente de San Lorenzo produce olores y tiene pobre rendimiento, por lo que no se cumple con la Ley 1333. Sus aguas poco tratadas vierten al río Guadalquivir.

2.1.3. Uriondo

El alcantarillado sanitario en la ciudad de Uriondo es de tipo gravedad, con una cobertura total de 90%.

El sistema de alcantarillado sanitario del área urbana del municipio de Uriondo es de gran cobertura y de construcción reciente "año 2010". Cuenta con una red de colectores, cámaras de inspección en diferentes tramos. Estos colectores están distribuidos por diferentes calles de Uriondo y transportan el agua residual hasta la planta de tratamiento. La longitud estimada de toda la red de colectores principales y secundarios al año 2011 se desconoce, en diámetros de 6" y descargan sus aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el río Camacho.

Se cuenta con un emisario que transportan las aguas negras hasta la planta de tratamiento de aguas residuales de tiene 8" de diámetro y una longitud de 1600 ml aproximadamente.

2.1.4. Padcaya

El alcantarillado sanitario en la ciudad de Padcaya es de tipo gravedad, con una cobertura total de 58%.

El sistema de alcantarillado sanitario del área urbana del municipio de Padcaya es de poca cobertura. Cuenta una red de colectores, cámaras de inspección en diferentes tramos. Estos colectores están distribuidos por diferentes calles de Padcaya y transportan el agua hasta los lugares de tratamiento que son 4 cámaras sépticas. La longitud estimada de toda la red de colectores principales y secundarios al año 2011 es desconocida y es de 6" y descargan sus aguas a 4 cámaras sépticas.

El tratamiento de las aguas residuales es solo un tratamiento primario de la mayor parte de Padcaya mediante cuatro cámaras sépticas ubicadas en la ciudad. Las 4 cámaras sépticas vierten al río Tarija a través de las quebradas aguas servida después de un escaso tratamiento.

2.2. ESTRATEGIA PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES A FUTURO

El servicio de saneamiento tiene como objetivo fundamental el mejoramiento de condiciones de salubridad de la población mediante la recolección de las aguas residuales producidas en las viviendas, liberando a los habitantes de ambientes riesgosos por la presencia de vectores que proliferan en las aguas estancadas que son vertidas sin control en los patios y calles. Además, las aguas residuales deben ser trasladadas a instalaciones especiales donde serían procesadas hasta lograr una adecuada depuración alcanzando los niveles establecidos en la ley 1333.

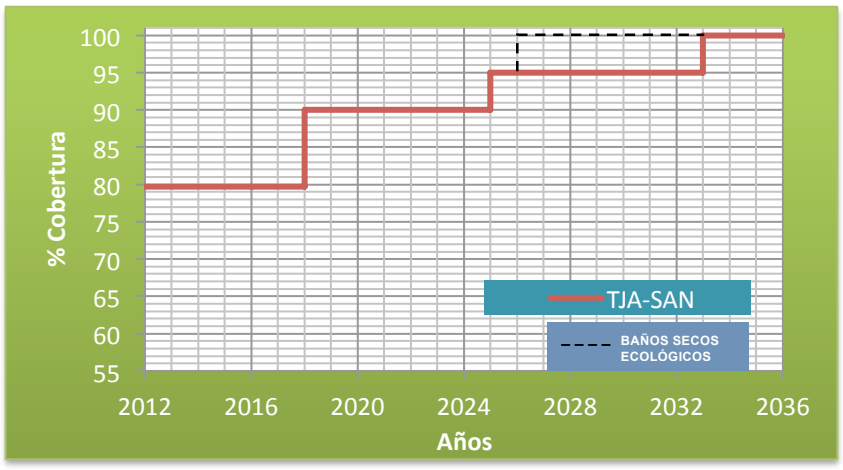
Desde el punto de vista de la población, el interés mayor es tener la posibilidad de evacuar las aguas servidas a un colector que les lleve a la planta de tratamiento; en tal sentido, para lograr ese cometido se requiere la ampliación de las redes de alcantarillado, hasta llegar a la cobertura universal (100%). Desde el punto de vista técnico y financiero, es bastante difícil llegar de un solo salto al 100%, por lo que se propone hacerlo de forma paulatina y en función de los plazos y fases de ejecución de obras divididas en corto, mediano y largo plazo.

2.2.1. Tarija

En la actualidad, la cobertura del servicio de alcantarillado se encuentra en el rango del 79.7%.

Las coberturas de este estudio por quinquenio para el servicio de alcantarillado sanitario para Tarija son los indicados en la siguiente Figura.

Figura 2.2: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Tarija



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.1. Coberturas de saneamiento por quinquenio - Tarija

Años	Cobertura Alcantarillado Sanitario	Cobertura Baños Secos Ecológicos	Cobertura Total Saneamiento
	%	%	%
2012	79,7	0,0	79,7
2016	79,7	0,0	79,7
2021	90,0	5,0	95,0
2026	95,0	5,0	100,0
2031	95,0	5,0	100,0
2036	100,0	0,0	100,0

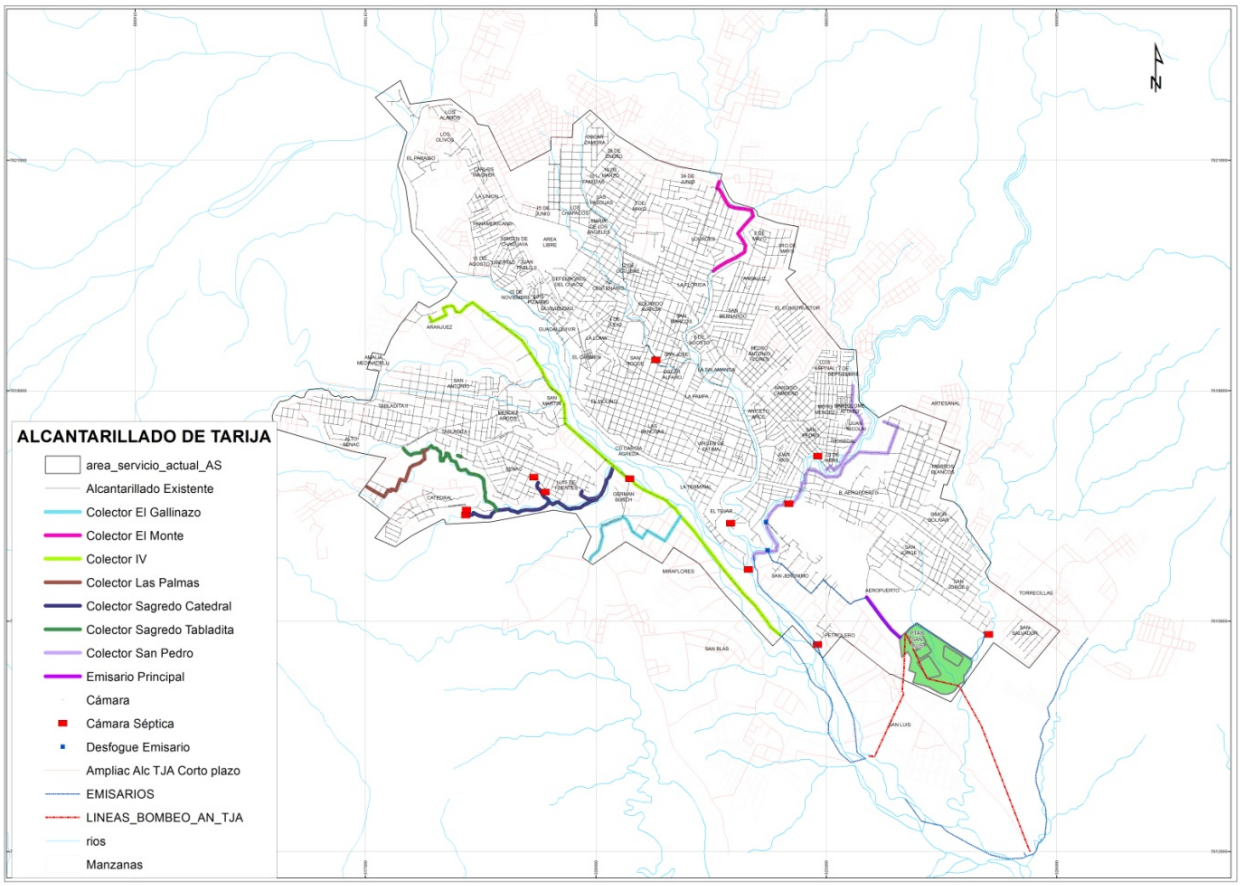
Fuente: Elaboración propia

Para la población que no tenga acceso a la red de alcantarillado sanitario, también se plantea la promoción de soluciones a nivel de domicilio (baños secos ecológicos) temporalmente, mientras se ejecutan las obras de alcantarillado, a fin de cumplir con la cobertura universal al 2025.

En la actualidad, el único sitio disponible para transportar las aguas servidas de Tarija es donde se encuentran las lagunas de San Luis, dado que ya es propiedad de la Gobernación Departamental de Tarija y tiene 54 ha disponibles. Por tanto, no se buscará otra ubicación.

A continuación se muestra el esquema del sistema de alcantarillado con las obras a corto, medio y largo plazo.

Figura 2.3. Sistema de alcantarillado actual y futuro - Tarija



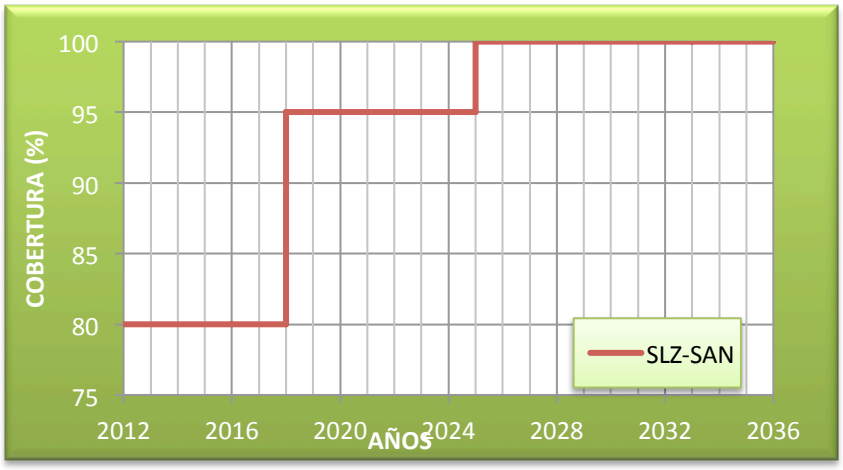
Fuente: Elaboración propia

2.2.2. San Lorenzo

En la actualidad, la cobertura del servicio de alcantarillado se encuentra en el rango del 80,0%.

Las coberturas de este estudio por quinquenio para el servicio de alcantarillado tanto para San Lorenzo como para las comunidades de Tarija Cancha Norte y Cancha Sur son los indicados en la siguiente Figura.

Figura 2.4: Coberturas de saneamiento por quinquenio – San Lorenzo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2. Coberturas de saneamiento por quinquenio – San Lorenzo

Años	Cobertura
	%
2012	90
2016	90
2021	95
2026	100
2031	100
2036	100

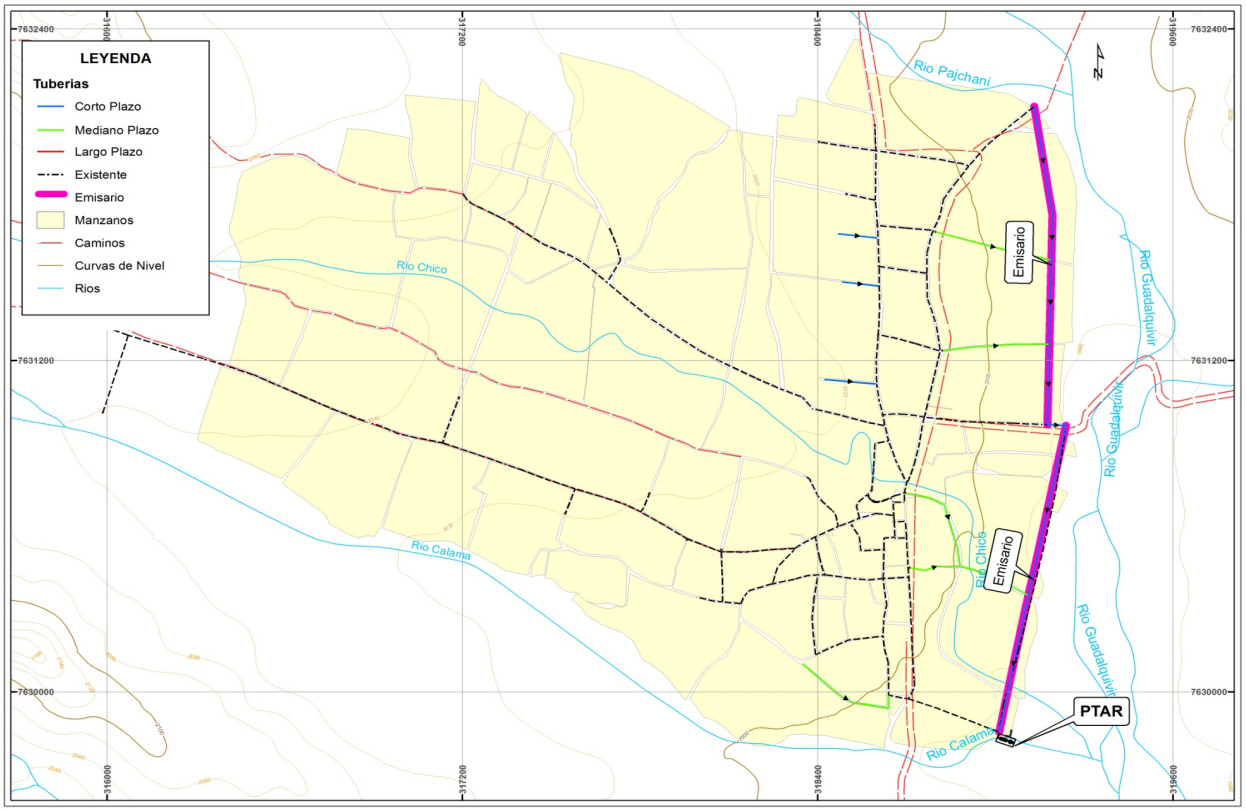
Fuente: Elaboración propia

Existe un sistema de alcantarillado sanitario que funciona por gravedad, y se hace notar que las comunidades de Tarija Cancha Norte y Tarija Cancha Sur por estar ubicadas en la parte superior noroeste de San Lorenzo, coadyuva en que el Municipio haya decidido incorporar a estas comunidades en la red de colectores y emisario hasta conducir estas aguas hasta la planta de tratamiento de aguas residuales.

En el Municipio de San Lorenzo existe una planta de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento desde el año 1998 aproximadamente y ubicado en la confluencia de los ríos Calama y Guadalquivir. Los terrenos son de propiedad del Gobierno Autónomo Municipal de San Lorenzo, por lo que se propone elegir el mismo lugar para la futura planta.

A continuación se muestra el esquema del sistema de alcantarillado con las obras a corto, medio y largo plazo.

Figura 2.5. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - San Lorenzo



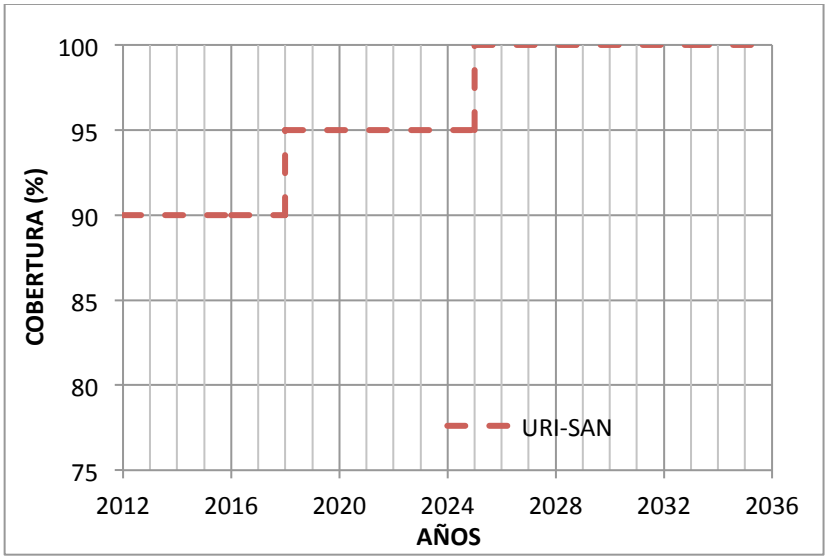
Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Uriondo

En la actualidad, la cobertura del servicio de alcantarillado se encuentra en el rango del 90,0%.

Las coberturas de este estudio por quinquenio para el servicio de alcantarillado para Uriondo son los indicados en la siguiente Figura.

Figura 2.6: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Uriondo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3: Coberturas de saneamiento por quinquenio – Uriondo

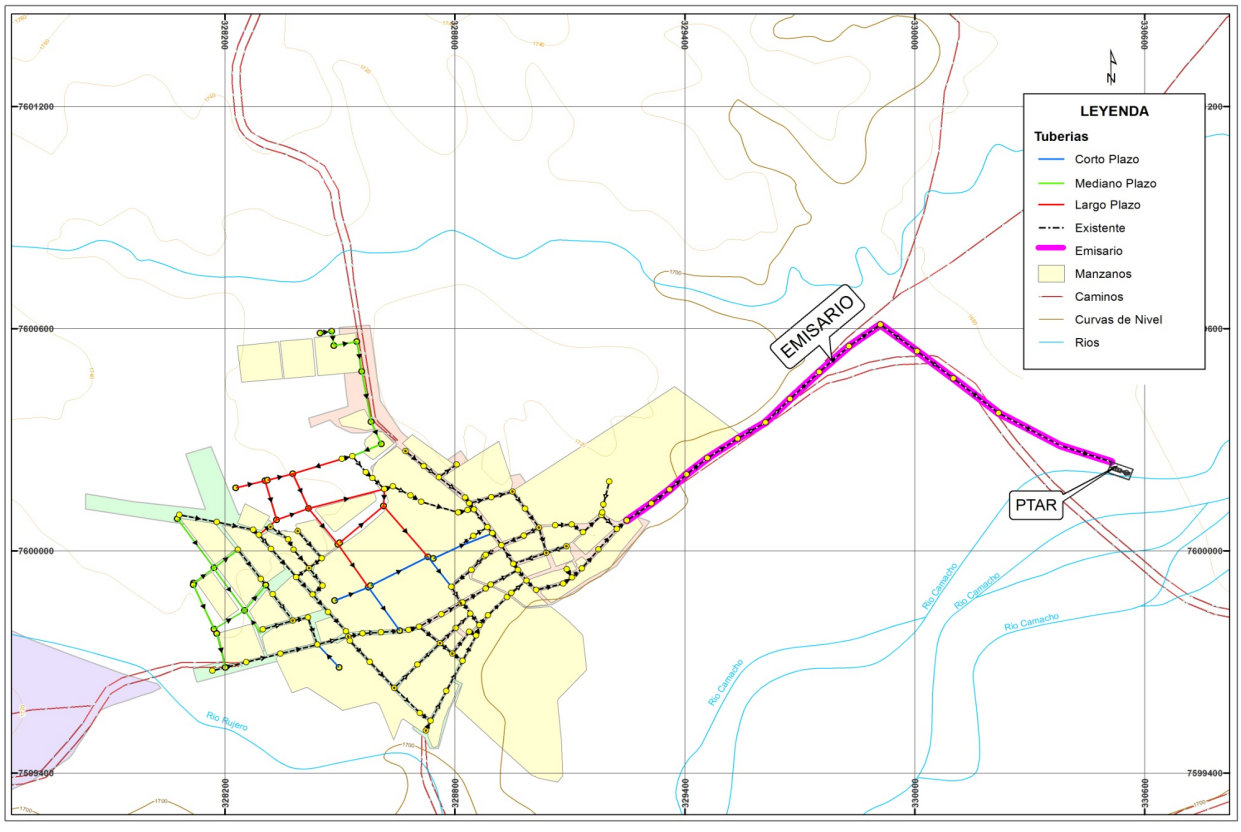
Años	Cobertura
	%
2012	90
2016	90
2021	95
2026	100
2031	100
2036	100

Fuente: Elaboración propia

Al contar ya con un terreno disponible donde se concentran todas las aguas residuales y su ubicación es adecuada para la futura PTAR. Con una extensión suficiente hace innecesaria la búsqueda de otros sitios para el tratamiento de las futuras aguas servidas producidas.

A continuación se muestra el esquema del sistema de alcantarillado con las obras a corto, medio y largo plazo.

Figura 2.7. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - Uriondo



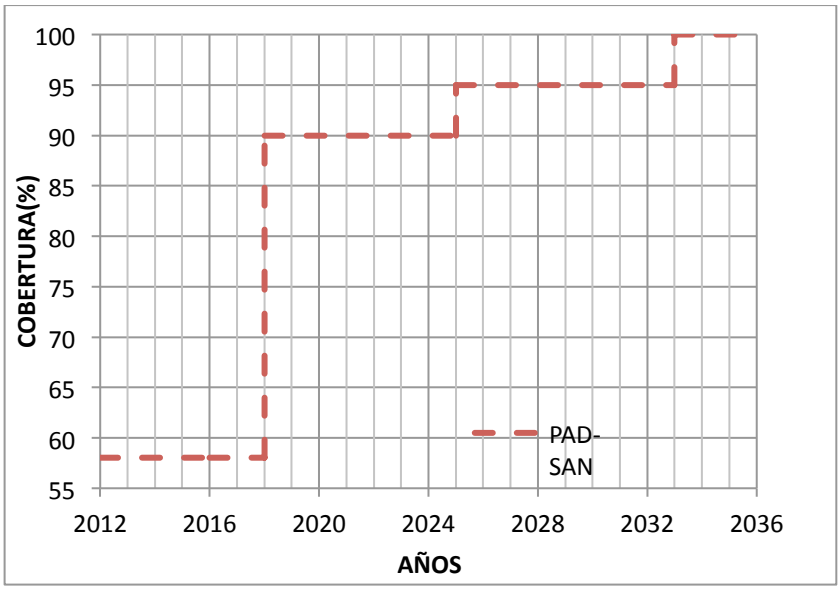
Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Padcaya

En la actualidad, la cobertura del servicio de alcantarillado se encuentra en el rango del 58%.

Las coberturas de este estudio por quinquenio para el servicio de alcantarillado para Padcaya son los indicados en la siguiente Figura.

Figura 2.8: Coberturas por quinquenio - Padcaya



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4: Coberturas de saneamiento por quinquenio - Padcaya

Años	Cobertura
	%
2012	58
2016	58
2021	95
2026	100
2031	100
2036	100

Fuente: Elaboración propia

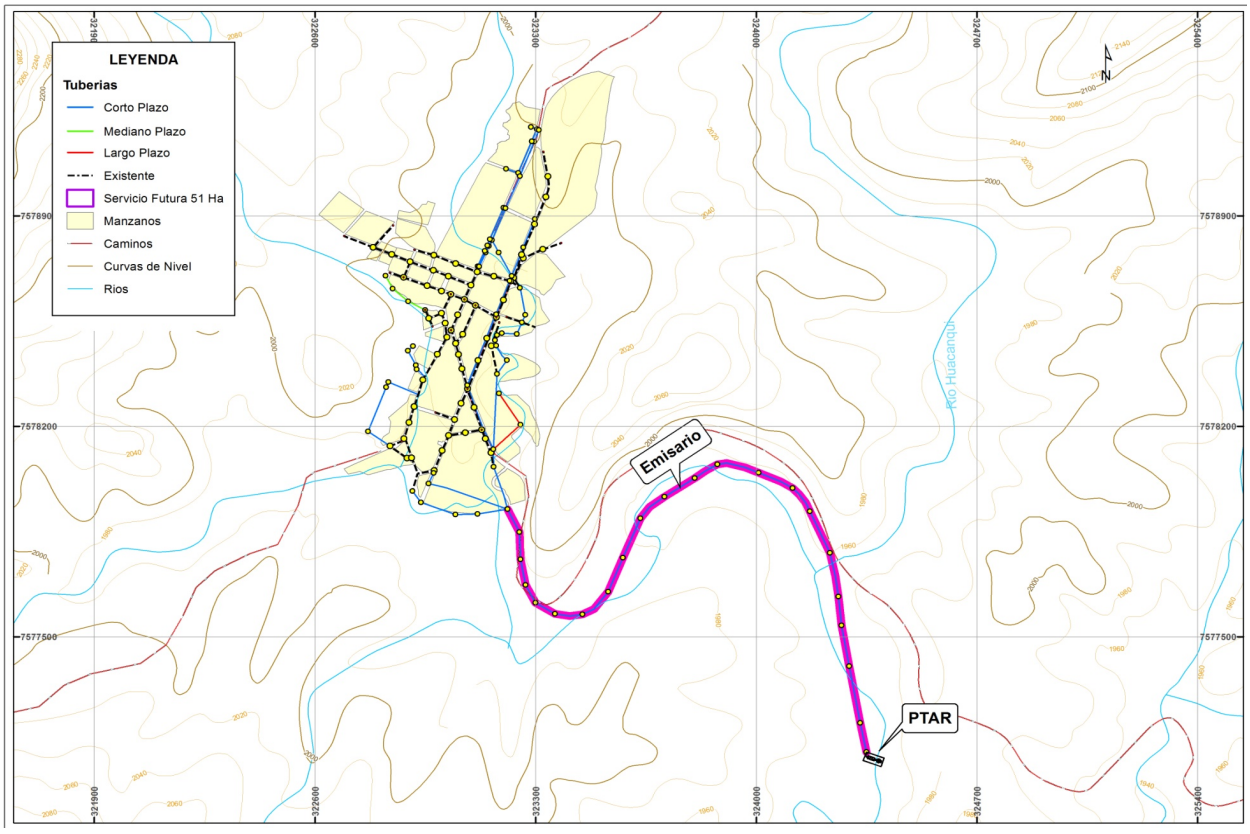
En Padcaya, no se cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales como tal, las aguas servidas llegan a 4 cámaras sépticas cuyos afluentes descargan en las quebradas El Puente y los Tacos (afluentes del rio Huacanqui); Lo cual genera condiciones de insalubridad en los alrededores de dichas descargas y contaminación de los recursos hídricos.

El drenaje natural de la escorrentía y por ende del alcantarillado es de norte a sur y de oeste a este; y sigue la pendiente hacia el sur según el recorrido del rio Huacanqui. Para evitar el bombeo de agua negras, lo recomendable es ubicar la estación depuradora siguiendo ese rumbo. En el programa Guadalquivir ya se había localizado un amplio terreno para la PTAR que se ha tomado en cuenta por reunir condiciones favorables en cuanto a distancia retirada del centro poblado y aprovechar el drenaje por gravedad; adicionalmente, habrían potenciales usuarios de la aguas tratadas en agricultura.

Para resolver la problemática de baja cobertura de la red de alcantarillado como también la prácticamente inexistente depuración de las aguas residuales, se han enfocado las alternativas en la optimización de la red existente orientada a proveer de red en la zona que actualmente no tienen así como aquellas áreas que se desarrollen urbanísticamente en el futuro, para lo cual se tiene la propuesta del crecimiento de la mancha urbana. Como base fundamental se debe tener en cuenta que las descargas de los efluentes que llegan a las cámaras sépticas deberán ser interceptadas para llevarlas hasta la planta de tratamiento futura.

A continuación se muestra el esquema del sistema de alcantarillado con las obras a corto, medio y largo plazo.

Figura 2.9. Sistema de alcantarillado sanitario actual y futuro - Padcaya



Fuente: Elaboración propia

3. ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3.1. SITUACIÓN ACTUAL

En la actualidad existen 3 PTARs en el área metropolitana de Tarija:

- PTAR de San Luis para la ciudad de Tarija
- PTAR de la ciudad de San Lorenzo
- PTAR en Uriondo

En la ciudad de Padcaya solo existen fosas sépticas.

3.1.1. PTAR de San Luis

La PTAR de San Luis fue construida hace cerca de 20 años, para un caudal de diseño aproximado de 210 l/s. Esta PTAR está constituida por un pre-tratamiento consistente en un canal Parshall sin sistema de medición ni registro continuo de caudales a la entrada, y después, un tratamiento biológico constituido por dos lagunas anaerobias en paralelo, una laguna de facultativa y finalmente una laguna de maduración.

Las lagunas anaerobias están llenas de arenas y fangos, y por otro lado, todas las conexiones entre las lagunas se encuentran corroídas debido al estado anaeróbico y séptico de las aguas.

El mantenimiento que ha tenido la PTAR a lo largo de su vida útil ha sido pobre. Se perciben muchos olores alrededor y dentro de la PTAR.

El efluente que se obtiene a la salida de la PTAR **no cumple** con los parámetros de menos 80 mg de DBO/l y 1.000 NPM/100 ml de Coliformes Fecales.

3.1.2. PTAR de San Lorenzo

La PTAR de San Lorenzo fue construida en 1998. Esta PTAR en un principio solo tenía tratamiento biológico constituido por un reactor anaerobio tipo RAP (Reactor Anaeróbico Pistón). Con posterioridad, en el año 2005 y a fin de utilizar las aguas para riego, se atravesó el río Calama mediante un sifón, y se construyó una pequeña laguna de almacenamiento en la margen derecha. Debido a una crecida del rio Guadalquivir se produjo un desmoronamiento de un talud de la laguna, originando así que el agua que se contiene en esta fluya hacia el rio Guadalquivir, por lo que el canal y la cámara de derivación también fueron destruidos. Recientemente ha sido reparado el talud y construido un gavión para protección del río, pero la laguna igual se encuentra en pésimas condiciones de funcionamiento.

Tanto los tratamientos biológicos del tanque anaerobio como el tratamiento terciario del humedal se encuentran en pobre estado. El mantenimiento que ha tenido la PTAR a lo largo de su corta vida ha sido pobre y casi inexistente. Se perciben muchos olores alrededor y dentro de la PTAR.

El efluente que se obtiene a la salida de la PTAR **no cumple** con los parámetros de menos de 80 mg de DBO/l y 1.000 NPM/100 ml de Coliformes Fecales.

3.1.3. PTAR de Uriondo

La PTAR de Uriondo fue construida en 2004. Esta PTAR está constituida por un pretratamiento de reja y desarenador, y posteriormente un tratamiento biológico constituido por un reactor anaerobio de flujo pistón (RAP), un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), y finalmente un humedal verde.

El reactor anaerobio se encuentra en muy mal estado debido a las grietas que ya existen. El FAFA no funciona como tal y las aguas residuales solamente fluyen superficialmente. El humedal verde nunca fue terminado de construir.

El mantenimiento que ha tenido la PTAR a lo largo de su corta vida ha sido pobre y casi inexistente. Se perciben muchos olores alrededor y dentro de la PTAR.

El efluente que se obtiene a la salida **no cumple** con los parámetros de menos de 80 mg de DBO/l y 1.000 NPM/100 ml de Coliformes Fecales.

3.1.4. Tratamiento en Padcaya

Se trata de un tratamiento consistente en simples cámaras sépticas, de las cuales la No 1 esta colmatada, la No 2 trabaja aún a la fecha, la No 3 elimina las aguas por las tapas de inspección, y la No 4 no se pudo evaluar al encontraras en una cancha de futbol.

El tratamiento aplicado es solo de nivel primario, y las 4 cámaras sépticas se encuentran en malas condiciones operativas

3.2. ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS SERVIDAS

3.2.1. Ley 1333 de Medio Ambiente

La Ley de Medio Ambiente 1333 para el tratamiento de aguas residuales fue aprobada en 1992.

En la Ley 1333 existe una clasificación de los cuerpos de aguas (Clase A, B, C y D) de acuerdo a su calidad. Según el Artículo 5 de dicha ley, se dice que los límites máximos de parámetros permitidos en cuerpos de agua son los indicados en el Cuadro Nº A-2 del Anexo A de dicho Reglamento. (Ver en el Anexo de Depuración). En dicho Anexo se observa que los valores limites en el efluente son de 80 mg DBO_5/l, 60 mg SST/l y 4 mg NH_4^+. Desde el punto de vista de tratamiento de aguas servidas, no es factible conseguir un efluente con 4 mg NH_4^+/l y un límite de 80 mg DBO_5/l. Para conseguir una eliminación del nitrógeno amoniacal, es necesario primero reducir la concentración de carbono en el afluente. Por tanto, se propondría **una revisión de las concentraciones límites al cuerpo receptor**. El Anexo de Depuración aparecen los Límites Máximo Permisibles (LMP) a los cuerpos receptores que son vigentes en este momento en Países colindantes a Bolivia.

El Anexo A-2 de la Ley 1333 expresa claramente que los tratamientos que se propusieran para las futuras PTAR deberían eliminar gran parte del carbono y del nitrógeno amoniacal. Debido a ello los diseños deberían realizarse para favorecer el proceso biológico de nitrificación, lo que requiere de ciertas condiciones que, por sí mismas, provocarán la eliminación de la contaminación orgánica muy por debajo de los 80 mg/l de DBO_5 marcados por la normativa. Estas condiciones provocarían un coste elevado tanto desde el punto de vista de inversión como de operación.

3.2.2. Estrategia para el tratamiento en etapas

En el presente Plan Maestro se proponen distintas alternativas para el tratamiento de las aguas servidas, es decir, para las futuras Plantas de Tratamiento, y mejoras en las Plantas existentes según las fases de construcción. Como ya se mencionó anteriormente, se considerarán las siguientes fases de construcción:

- Primera etapa: 2023
- Segunda etapa: 2036

La **primera etapa (2023)**, consistiría en eliminar el **Carbono** (valores menores a 80 mg DBO_5/l y 60 mg SST/l de acuerdo con la Ley 1333) y los Coliformes fecales (1000 NMP/100 ml de acuerdo con la Ley 1333) del afluente, y la **segunda etapa** implicaría incorporar la eliminación de nitrógeno amoniacal hasta 4 mg/l de acuerdo a la Ley 1333 – Anexo 2-A, ampliando el tratamiento secundario elegido.

Para hacer uso de las tecnologías más apropiadas y de menor coste se ha seguido la siguiente estrategia:

a) Caudales

Se ha realizado una división dentro de las PTAR a diseñar, la misma que consiste en una distinción entre PTAR pequeñas y grandes dependiendo del caudal de tratamiento que vaya a ser vertido en el cuerpo receptor. Se han considerado pequeñas PTAR aquellas que tienen un caudal menor a 25.000 m^3/d al horizonte del proyecto 2036, y grandes PTAR aquellas que superan el caudal mencionado.

b) Tratamiento para la Línea de Agua en la PTAR

Se han tomado los procesos de tratamiento en dos fases. La primera fase 2023, donde se propone llegar solo a la remoción de carbono; y la segunda fase 2036, donde se incorporaría la remoción del nitrógeno amoniacal respecto a la línea de agua.

c) Tratamiento para la Línea del Fango en la PTAR

No existe en Bolivia ninguna Norma o Ley relacionada con el tratamiento de fangos. Por tanto, se propone un tratamiento apropiado y de bajo coste pero al mismo tiempo que sea un producto final estabilizado que pueda utilizarse en la agricultura. De esta manera, reducir los costes económicos y problemas ambientales que conllevan el destino final del fango a un vertedero.

3.2.3. Reutilización de aguas servidas para regadío

En la actualidad, no existe en Bolivia ningún reglamento relacionado con la reutilización de aguas residuales servidas. Sería necesario tener un reglamento tratando este tema, ya que en breve Bolivia tendrá muchas PTARs funcionando cuyos efluentes generados podrían utilizarse para riego.

Se propondría que se estudiase hacer un reglamento, en la cual se definiera un tratamiento mínimo de dicho efluente dependiendo de su uso final de cultivo. Además dicha normativa debería promocionar su uso para reducir el uso de agua potable para regadíos.

Los tratamientos mínimos que se deberían proponer están expuestos en la siguiente Tabla.

Tabla 3.1: Usos y tratamiento para la reutilización de aguas servidas

Tipo de Regadío	Parámetros mínimos a conseguir	Tratamientos para conseguir dicha remoción
Cultivos tipo no restrictivo: árboles o siembras de tallo	Eliminación del carbono y de los coliformes fecales	Tratamiento biológico + decantación secundaria Tratamiento terciario: desinfección
Cultivos tipo restrictivo: hortalizas o similares	Eliminación de carbono, coliformes fecales y huevos helmintos	Tratamiento biológico + decantación secundaria Tratamiento terciario: desinfección + filtración

Fuente: Elaboración propia

Para este estudio de alternativas, se propone obtener un efluente apto para cultivos de árboles o cultivos de tallo alto.

Los tratamientos más eficientes y de bajo coste que se han evaluado son:

- **Tratamiento biológicos o secundarios**: Lagunas de estabilización, UASB, Filtros Percoladores, Fangos activos (con sus respectivos decantadores secundarios)
- **Tratamiento Terciario**: Desinfección
  - Química: mediante hipoclorito sódico o cálcico
  - Radiación: Lagunas de maduración, y
  - Filtración: humedales verdes

3.2.4. Tratamiento de fangos para uso agrícola

En la actualidad no existe en Bolivia ningún reglamento relacionado con el tratamiento de los fangos y su uso final. Sería necesario tener un reglamento tratando este tema, ya que en breve Bolivia tendrá muchas PTARs funcionando las cuales generarán mucho fango.

Se propondría que se estudiase hacer un reglamento en la cual se definiera un tratamiento mínimo de dicho fango dependiendo de su uso final. Además, dicho reglamento debería promocionar que el uso final del fango fuera agrícola o en aéreas forestales en vez del vertedero, para evitar todos los problemas económicos y ambientales relacionados con los vertederos.

Los tratamientos mínimos que se deberían proponer estarían expuestos en la siguiente Tabla.

Tabla 3.2: Usos y tratamientos para fangos

Usos finales del fango	Parámetros mínimos a conseguir	Tratamientos para conseguir dicho fango
Vertedero	Fango final deshidratado con un mínimo de 30% de sólidos secos	▪ Espesamiento: por gravedad o mecánico, y ▪ Deshidratación: eras de secado, centrifugas o filtros banda
Agricultura*	Fango estabilizado y deshidratado mínimo 30% de sólidos secos	▪ Espesamiento: por gravedad o mecánico, ▪ Deshidratación: eras de secado, centrifugas o filtros banda, y ▪ Estabilización: digestión anaerobia, digestión aerobia, pasteurización, química(inyección de cal), incineración o secado solar

Fuente: Elaboración propia

*Se asume que este fango es proveniente de aguas servidas domésticas, y por tanto, no contiene metales pesados

Para este estudio de alternativas se formula obtener un fango estabilizado y deshidratado, proponiendo como uso final la agricultura como abono.

Los tratamientos más eficientes y de bajo coste que se han evaluado son:

- Espesamiento: Espesadores por gravedad
- Deshidratación: Eras de secado, Filtros Bandas y Centrifugas
- Estabilización: Química mediante inyección de cal, digestión anaerobia y secado solar

A continuación se expone la producción anual de fangos por PTAR:

Tabla 3.3: Producción anual de fangos actual y futura

MUNICIPIO	PRODUCCIÓN DE FANGOS (Ton/año)	
	ETAPA 1 - 2023	ETAPA 2 - 2036
Tarija	2.833	3.926
San Lorenzo*	-	52.8
Uriondo*	-	18,6
Padcaya*	-	25,5

Fuente: Elaboración propia

* La PTAR se diseñó para el año 2036.

De acuerdo a la Tabla 3.3, se estima una cantidad total anual de fango de 2.930 Ton/año, teniendo en cuenta las 4 PTARs en funcionamiento.

Las EPSAS deberían hacer análisis del fango final para confirmar la no presencia de metales pesados, ya que en caso de existir, el fango no podría utilizarse como abono y su destino final sería un vertedero.

Al mismo tiempo, las EPSAS deberían promocionar su fango producido, de manera que semanalmente los agricultores fueran a recoger dicho fango a las PTARs.

3.2.5. Caracterización de las aguas residuales

En el Plan Maestro se realizó una campaña analítica de las aguas superficial de los ríos, afluente y efluente de las PTARs existentes. Después de analizar los resultados de la campaña analítica realizada en la Zona de Tarija y los pueblos de San Lorenzo, Padcaya y Uriondo se ha estudiado las concentraciones máximas de afluente que podrían tratarse en las futuras PTAR y en las existentes sin comprometer sus costes de inversión y explotación, considerándose estas de origen doméstico principalmente.

En la Tabla siguiente se observan los valores medios de concentración del afluente, tomados para el diseño de las futuras PTARs.

Tabla 3.4: Valores medios de las concentraciones del afluente para el diseño de PTARs

PARAMETROS	CONCENTRACIONES (mg/l)
DBO_5 (Demanda Biológica de Oxigeno)	400
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	450
NT (Nitrógeno Total)	55
Amonio como N	45

Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Caudales de diseño

En el Plan Maestro se realizó la proyección de la población para obtener los caudales de diseño a tratar, proveniente de las aguas servidas producidas. A continuación, se exponen los caudales de diseño medios y máximo para el diseño de las PTARs de Tarija, San Lorenzo, Uriondo y Padcaya.

Tabla 3.5: Caudales de diseño para la PTAR de San Luis

PTAR	ETAPA 1 - 2023		ETAPA 2 - 2036	
	Qmed (l/s)	Qmax (l/s)	Qmed (l/s)	Qmax (l/s)
PTAR San Luis	543,09	651,71	739,25	887,10

Fuente: Elaboración propia

Las siguientes Tablas exponen los caudales de diseño para la PTARs de San Lorenzo, Uriondo y Padcaya. Para estas PTARs no existen dos etapas de construcción, ya que la diferencia entre los caudales en dichas etapas es mínima.

Tabla 3.6: Caudales de diseño para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya - 2036

PTAR	SAN LORENZO		URIONDO		PADCAYA	
	Qmed (l/s)	Qmax (l/s)	Qmed (l/s)	Qmax (l/s)	Qmed (l/s)	Qmax (l/s)
Única etapa de construcción	9.41	11.30	3.20	3.84	4.54	5.45

Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Alternativas de tratamiento

3.2.7.1. Factores para la elección de las alternativas de tratamiento

Para la elección del tipo de tratamiento más adecuado se tendrá en cuenta los siguientes factores:

- Afluente a tratar
- Efluente a conseguir teniendo en cuenta la legislación vigente
- Incidencia del caudal de descarga en el cuerpo receptor
- Espacio disponible en la parcela de la futura PTAR
- Tratamientos que ya se usen en el país para su fácil explotación
- Menor costes de inversión y explotación
- Re-uso del efluente para riego
- Utilización del fango estabilizado (sin metales pesado) para uso de agricultura y/o zonas forestales
- Mitigar olores y mosquitos
- Aceptación social y gubernamental

3.2.7.2. Alternativas de tratamiento estudiadas y su grado de mecanización

Los tipos de tratamiento estudiados, parámetros de diseño, ventajas-desventajas y su grado de mecanización se exponen en las siguientes Tablas.

Tabla 3.7: Tratamientos estudiados

TRATAMIENTO	CARACTERÍSTICAS
Pre-tratamiento	Rejas de gruesos, rejas de finos, desarenador y canal de Parshall con medidor ultrasónico Mecanizado medio-alto dependiendo del tipo de reja y desarenador
Tratamiento Primario	Decantador primario Mecanizado Alto
Tratamiento secundario	Lagunas (lagunas anaerobias-cerradas + lagunas facultativa con mezcla mecánica + laguna maduración con mezcla mecánica) : Mecanización Media UASB (reactor anaerobio de flujo ascendente) + Quema de biogás : Mecanización Alta Filtros Percoladores (de piedra y plástico) + Decantación secundaria: Mecanización Alta Fangos activos (de aireación prolongada y de tipo convencional + Decantación secundaria: Mecanización Alta
Tratamiento Terciario (desinfección)	Tanque de contacto e inyección de cloro: Mecanización Alta Laguna de maduración: Mecanización Baja Humedales verdes: Mecanización Baja
Tratamiento de Fangos	Espesador gravitacional de fangos: Mecanización Alta Deshidratación (filtros banda, centrifugas y eras de secado de fangos): Mecanización Alta Estabilización del fango mediante inyección de cal: Mecanización baja-media

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Parámetros de diseño principales para el pretratamiento (para todas las alternativas)

PRETRATAMIENTO	PTAR PEQUEÑAS* (<25.000 m^3/d)	PTAR GRANDES* (>25.000 m^3/d)
Rejas gruesas	Espesor barrotes: 30 mm Velocidad de paso a Qmax y colmatación del 30%: < 1.4 m/s Sistema de limpieza de rejas manual	Espesor barrotes: 30 mm Velocidad de paso a Qmax y colmatación del 30%: < 1.4 m/s Sistema de limpieza de rejas automático Extracción de residuos: tornillo-compactador de residuos
Rejas finas	Espesor barrotes: 10 mm Velocidad de paso a Q_{max} y colmatación del 30%: < 1.4 m/s Sistema de limpieza de rejas manual	Espesor barrotes: 10 mm Velocidad de paso a Q_{max} y colmatación del 30%: < 1.4 m/s Sistema de limpieza de rejas automático Extracción de residuos: tornillo-compactador de residuos
Desarenador-desengrasador	Tiempo de retención hidráulica (TRH): 1 min a Q_{max} Carga hidráulica <70 $m^3/m^2/h$	Tiempo de retención hidráulica: 5 min a Q_{max} Carga hidráulica <70 $m^3/m^2/h$
Medidor de caudal	Canal Parshall + caudalímetro ultrasónico	Canal Parshall + caudalímetro ultrasónico

*Fuente: Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Metcalft&Eddy. 4th Edition

La función del pre-tratamiento es la eliminación de sólidos, arenas, grasas, etc. El diseño de un buen pre-tratamiento mejorará el rendimiento del resto de los tratamientos en la PTAR.

Tabla 3.9: Parámetros de diseño principales para el tratamiento primario

TRATAMIENTO PRIMARIO	PTAR PEQUEÑAS* (<25.000 m^3/d)	PTAR GRANDES* (>25.000 m^3/d)
Decantación primaria	Carga superficial: 1,3 – 2,0 m/h a Q_{med} TRH >2 h Reducción de SS (%): 50 Reducción de DBO (%): 25 Tipo Dormund	Carga superficial: 1,3 – 2,0 m/h a Q_{med} TRH >2 h Reducción de SS (%): 50 Reducción de DBO (%): 25

*Fuente: Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Metcalft&Eddy. 4th Edition

Tabla 3.10: Parámetros de diseño principales para el tratamiento secundario

TRATAMIENTO SEGUNDARIO	PTAR PEQUEÑAS* (<25.000 m^3/d)	PTAR GRANDES* (>25.000 m^3/d)	Ventajas/Desventajas
UASB	TRH = 8 h Tª mínima: 12ºC Altura del tanque: 4 m	TRH = 8 h Tª mínima: 12ºC Altura del tanque: 4 m	Es sensible a Tª bajas Producen olores Generan biogás Eliminación elevada de Carbono
Filtros percoladores (grava)	H< 4 metros Carga hidráulica: 8-30 m^3/m^2d Carga orgánica: 0,4-1,8 kg/m^3d Recirculación: intermitente	No aplica en este estudio	No pueden eliminar nitratos/nitritos ni fosforo por si solos Costes de explotación menores que los fangos activos La grava tiene menor superficie especifica que el plástico

TRATAMIENTO SEGUNDARIO	PTAR PEQUEÑAS* (<25.000 m^3/d)	PTAR GRANDES* (>25.000 m^3/d)	Ventajas/Desventajas
Filtros percoladores (plástico)	H > 4 metros Carga hidráulica: 10-50 m^3/m^2d Carga orgánica: 0,5-3 kg/m^3d Recirculación: continua	H > 4 metros Carga hidráulica: 10-50 m^3/m^2d Carga orgánica: 0,5-3 kg/m^3d Recirculación: continua	No pueden eliminar nitratos/nitritos ni fosforo por si solos Costes de explotación menores que los fangos activos
Fangos activos – Aireación Prolongada	Concentración de sólidos (MLSS): 3000-4500 mg/l Edad de fangos: 20 días (se elimina carbono y nutrientes) a 12ºC Carga másica: 0,3 -0,5 Recirculación: 150-100% el Q_{med}	No aplica en este estudio	Generan un fango semi-digerido Eliminan carbono y nutrientes Altos costes de explotación
Fangos activos – Convencional	No aplica en este estudio	Concentración de sólidos (MLSS): 2500-4000 mg/l Edad de fangos: mínimo 8 días (eliminación de carbono) a 12ºC Edad de fangos: mínimo 12 días (eliminación de carbono y nutrientes) a 12ºC Carga másica: <0,1 Recirculación: 75-100% el Q_{med}	Pueden eliminar nutrientes dependiendo de la Edad del Fango Altos costes de explotación
Decantación Secundario	Carga superficial: 0,5-0,8 m/h a Q_{med} TRH = 3 h Calado cilíndrico > 3 m Tipo Dortmund	Carga superficial: 0,5-0,8 m/h a Q_{med} TRH = 3 h Calado cilíndrico > 3 m	

*Fuente: Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Metcalft&Eddy. 4th Edition

Tabla 3.11: Parámetros de diseño principales para el tratamiento terciario

TRATAMIENTO TERCIARIO (desinfección)	PTAR PEQUEÑAS* (<25.000 m^3/d)	PTAR GRANDES* (>25.000 m^3/d)	Ventajas/Desventajas
Tanque de cloración + inyección de cloro	Dosificación: 5 ppm a Q_{max} Capacidad de almacenamiento: 15 días Tiempo de contacto: 20 min a Q_{med}	Dosificación: 5 ppm a Q_{max} Capacidad de almacenamiento: 15 días Tiempo de contacto: 20 min a Q_{med}	Se consigue buena desinfección siempre que las concentraciones de sólidos no sean muy elevadas. Ocupa poco espacio Costes de explotación más caros que un lagunas de maduración o humedales verdes
Lagunas de Maduración	TRH: mínimo 6 días Tirante de agua: 0,8 m	No suelen caber en el área disponible	Ocupan mucho espacio El rendimiento de este tratamiento no es del todo fiable
Humedales verdes	Carga hidráulica: 4-7 cm/día TRH: 6-8 días Macrófitas: 10 ud/m^2	No suelen caber en el área disponible	Ocupan mucho espacio Sensible a la Tª El rendimiento de este tratamiento no es del todo fiable

*Fuente: Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Metcalft&Eddy. 4th Edition

Tabla 3.12: Parámetros de diseño principales para el sistema de lagunas

LAGUNAJE	PTARs**	Ventajas/Desventajas
Laguna anaerobia	Carga 120 gr DBO/m^3 TRH: 10-50 días Tirante de agua: 3-6 m	Ocupan mucho espacio No es fácil la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) Bajos costes de explotación
Laguna facultativa	Carga 450 kg DBO/ha*día (para mezcladores) y 50-200 kg DBO/ha*día (sin mezcladores) TRH: 6-30 días Tirante de agua: 1-2.5 m	
Laguna de Maduración	Carga 250 kg DBO/ha*día (para mezcladores) y 40-120 kg DBO/ha*día (sin mezcladores) TRH: 4-12 días Tirante de agua: 0,6-1,2 m	
Producción biogás (laguna anaerobia)	13.8 l/hab*día	

**Fuente: SAGUAPAC

Tabla 3.13: Parámetros de diseño principales para el tratamiento fangos

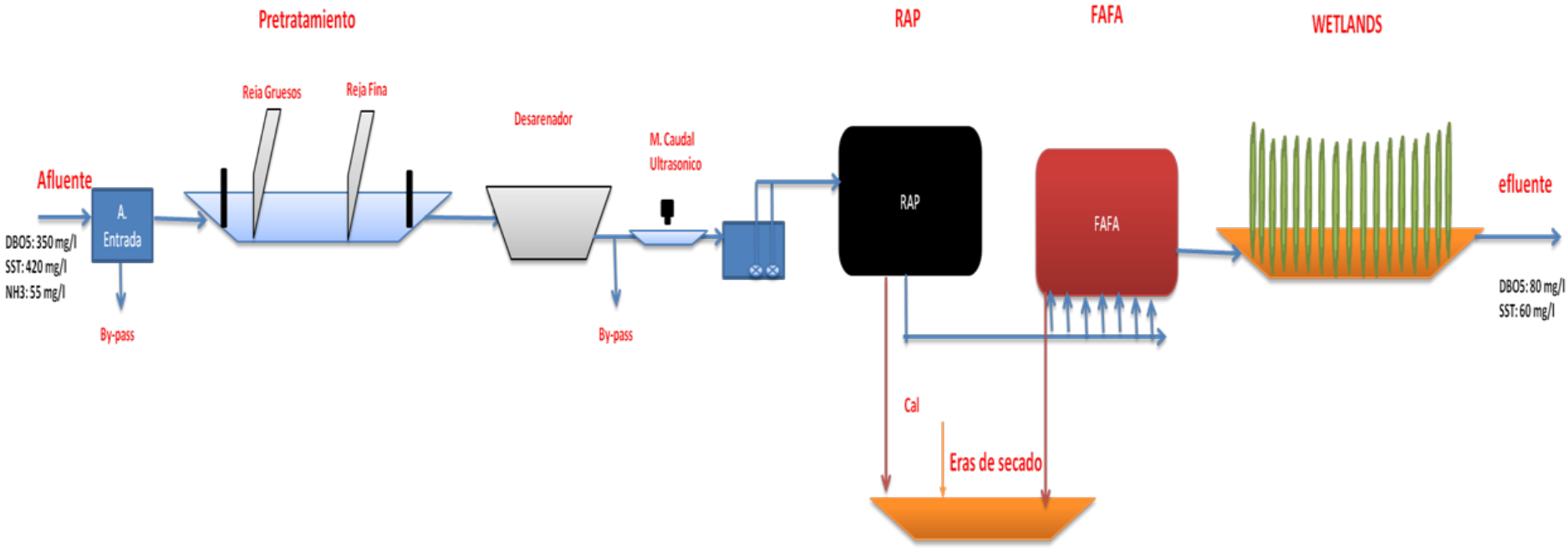
TRATAMIENTO DE FANGOS	PTARs*
Espesador de gravedad	Tiempo de retención > 24 horas Carga sólidos (f. primario) < 130 kg/m^2/d Carga sólidos (f. secundario) < 35 kg/m^2/d Carga sólidos (f. mixto) < 70 kg/m^2/d
Deshidratación (centrifugas, filtros banda)	Poli-electrolito: 2-4 Kg/Tm MS
Inyección de Cal	30% de la materia seca
Digestión anaeróbica	75 días a 12ºC (sin mezcla ni recirculación ni control de temperatura) 12 días a 35ºC
Eras de secado	Carga unitaria < 120 kg/m^2/año Espesor 25 cm

*Fuente: Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Metcalft&Eddy. 4th Edition

Es importante comentar que para las pequeñas PTARs de San Lorenzo, Uriondo y Padcaya, el grado de mecanización propuesto es el mínimo posible. La mecanización estaría ubicada en los bombeos de fangos principalmente. Los decantadores son de tipo Dormund con escasa mecanización, así como los filtros percoladores y los digestores anaerobios propuestos.

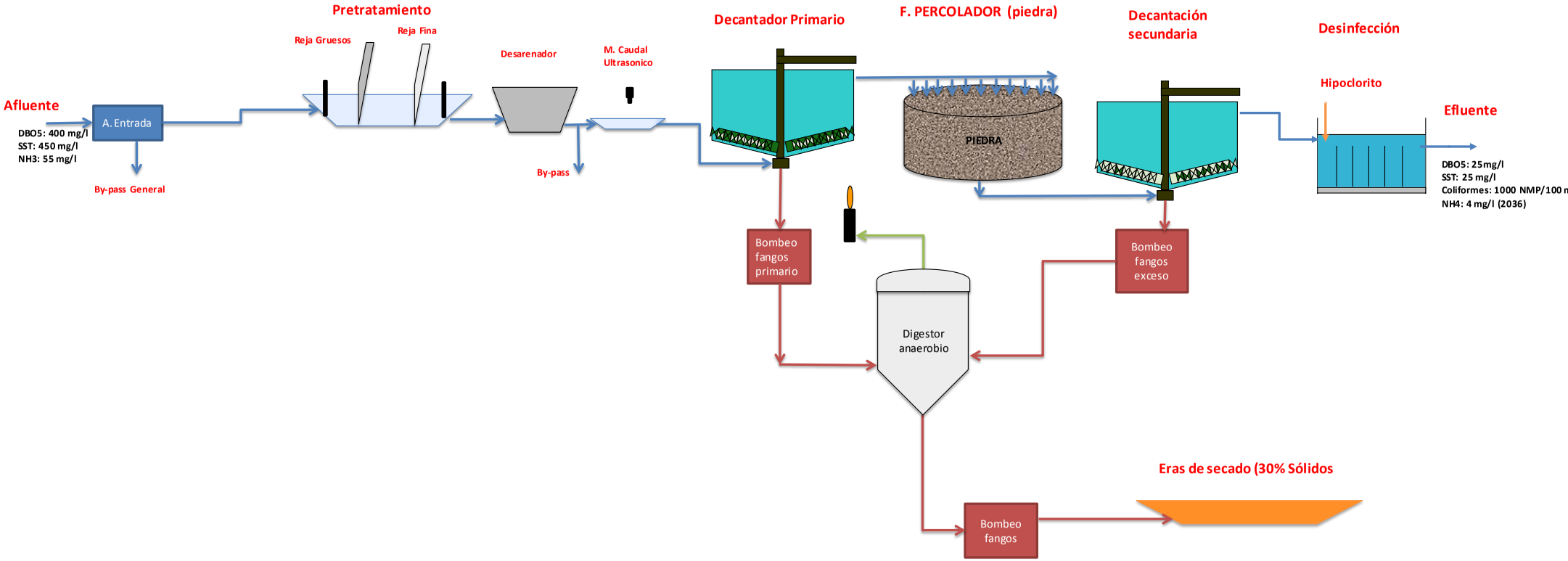
3.2.7.3. Diagramas de flujo de las alternativas estudiadas para las PTARs

Figura 3.1: Alternativa 1 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya



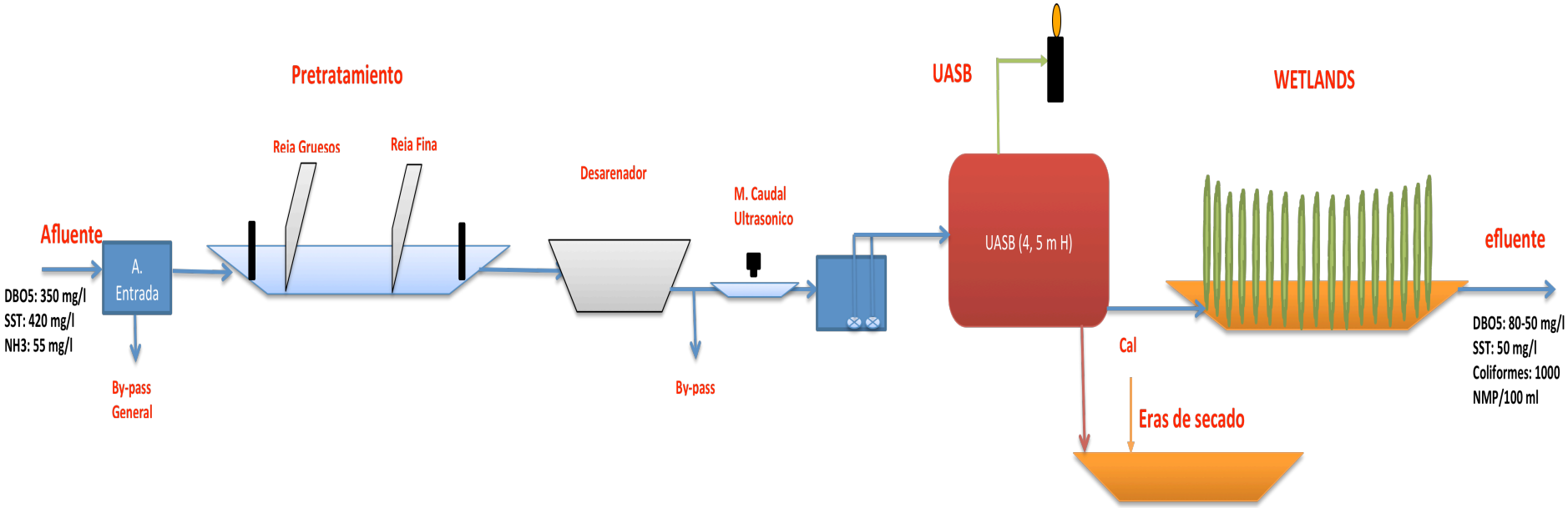
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2: Alternativa 2 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya



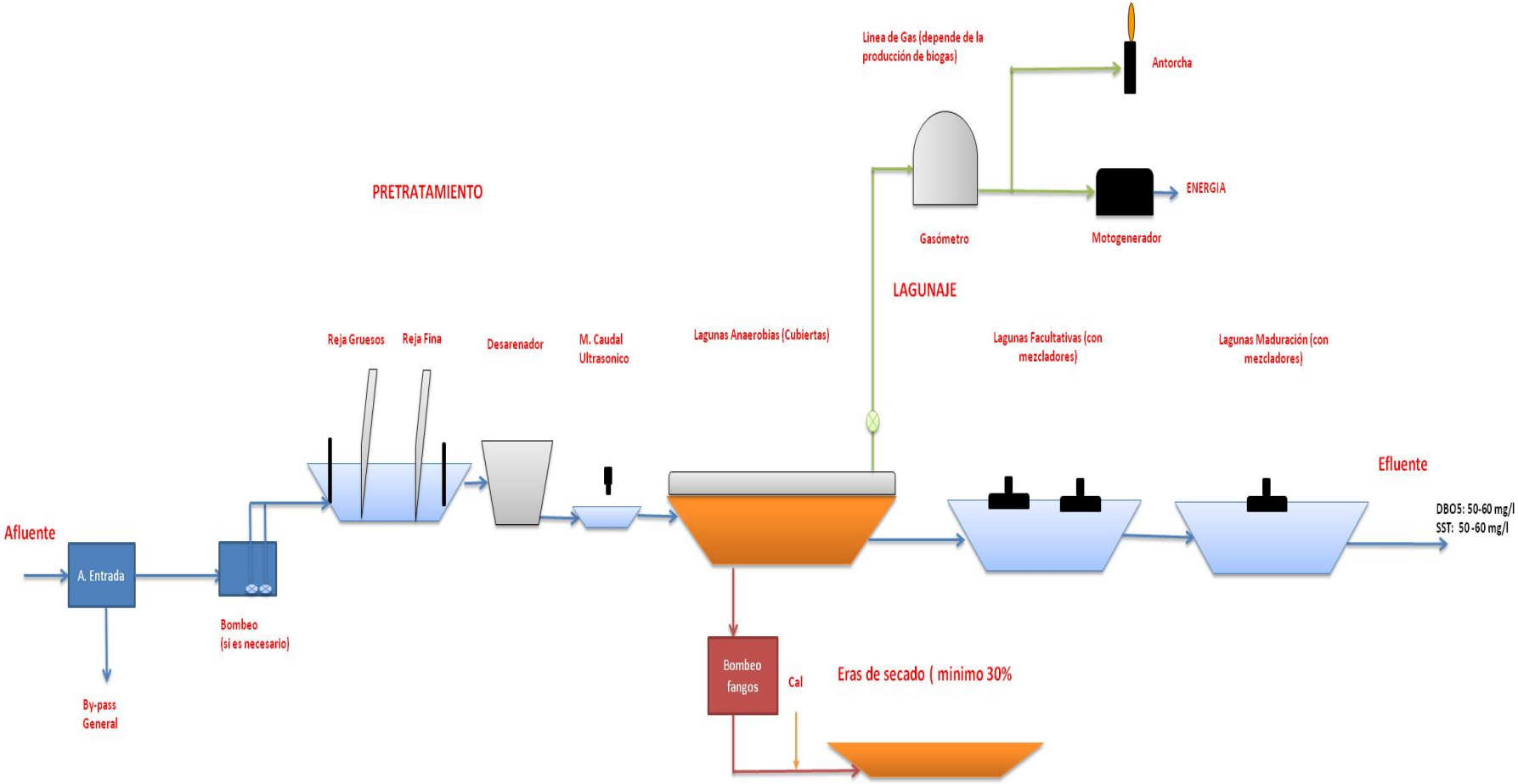
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3: Alternativa 3 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya



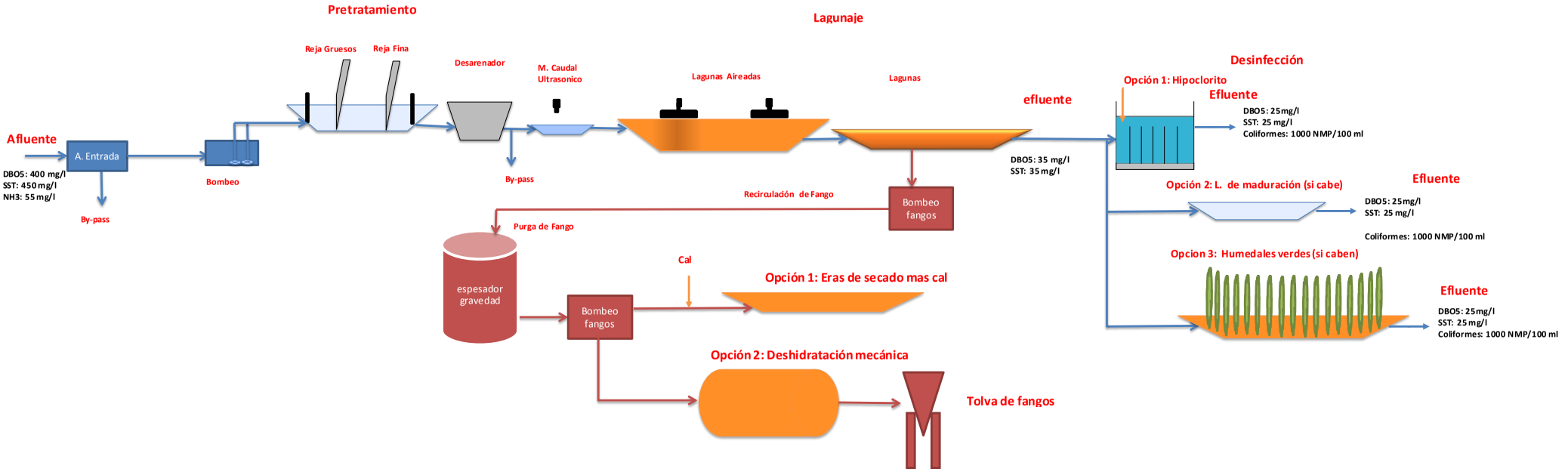
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4: Alternativa 4 para San Lorenzo, Uriondo y Padcaya



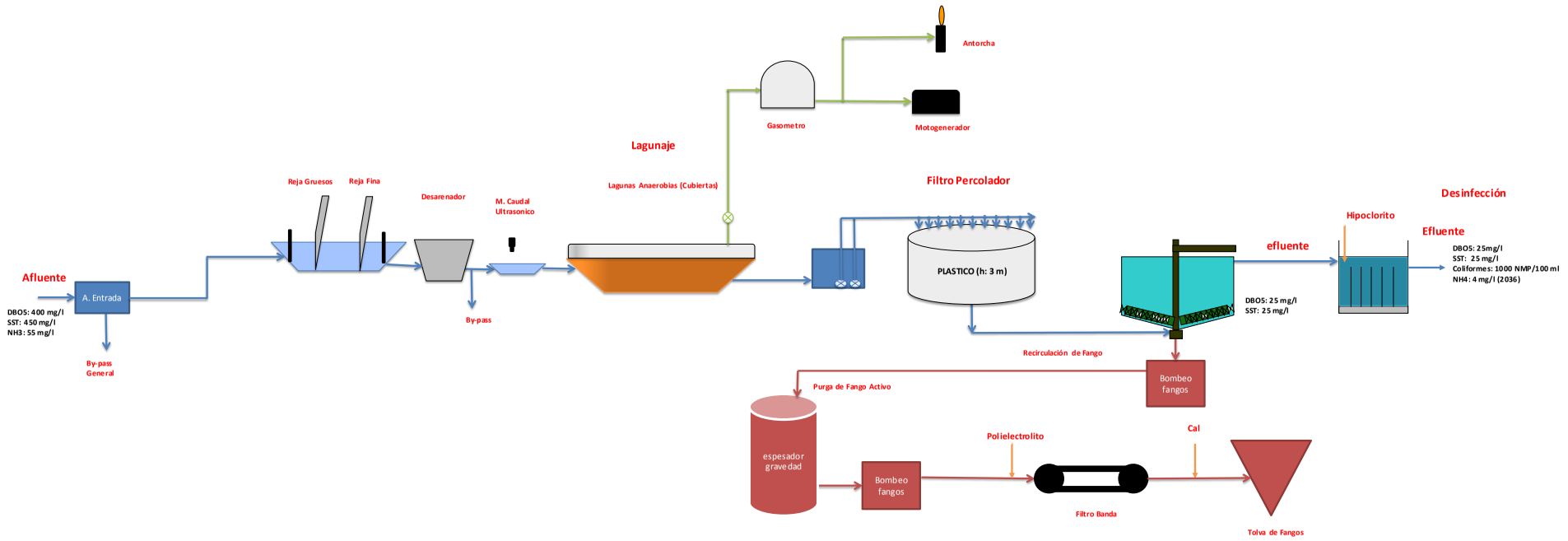
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Alternativa 1 – C1: Mejoras para la PTAR de San Luis



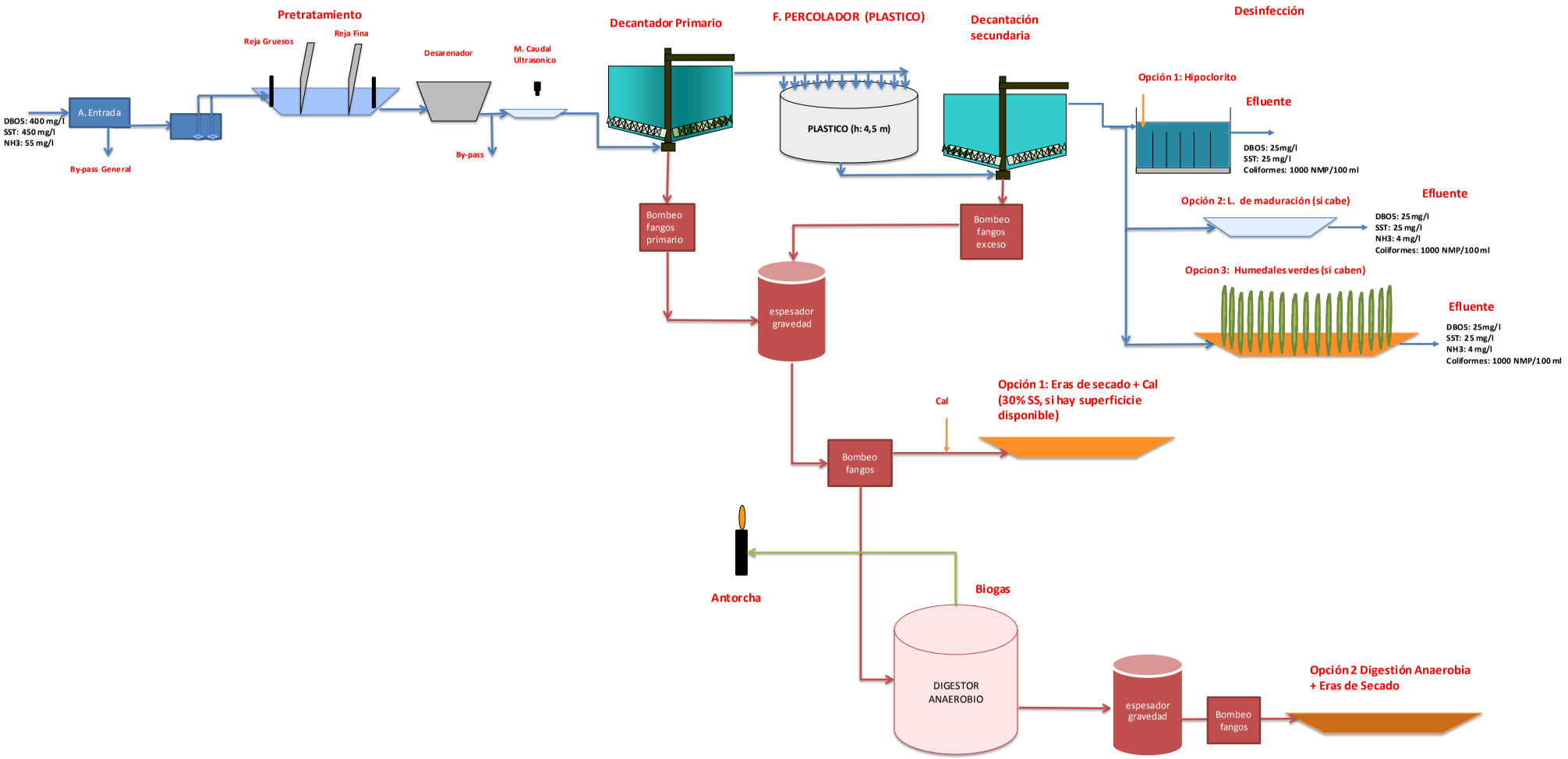
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6: Alternativa 2 – C2: Mejoras para la PTAR de San Luis



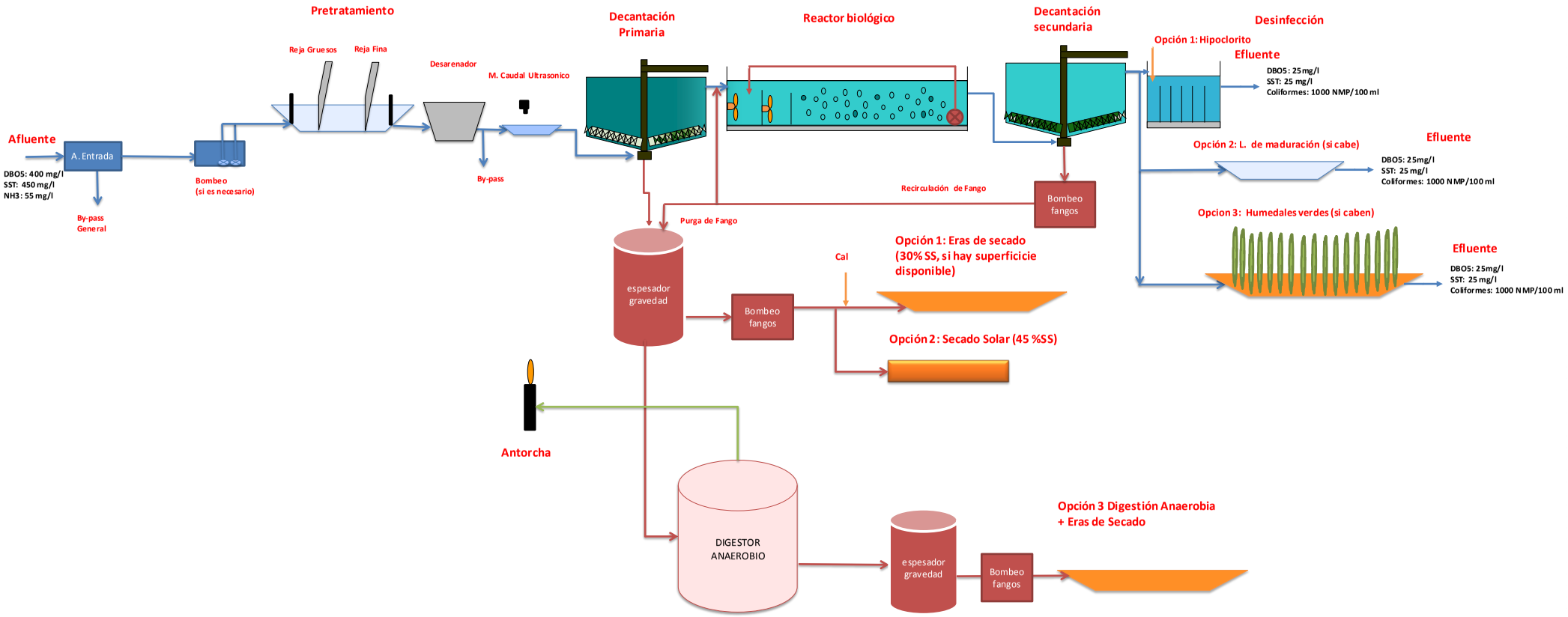
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Alternativa 3 – B1: PTAR nueva para San Luis



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8: Alternativa 4 – B2: PTAR nueva para San Luis



Fuente: Elaboración propia

3.2.8. Descripción de las alternativas estudiadas para cada PTAR

Todas las alternativas de tratamiento para las PTAR tendrían en común el mismo pre-tratamiento. El pretratamiento se considera muy importante dentro del buen funcionamiento de toda planta de tratamiento, ya que reduce la cantidad de residuos sólidos (arenas, piedras, grasas, etc.) que pueden dañar o disminuir el rendimiento del tratamiento posterior. El pre-tratamiento consistiría en los siguientes componentes:

- Arqueta de entrada a la PTAR y bypass general
- Desbaste de rejas gruesas y finos
- Desarenador-desengrasador
- Medición de caudal mediante un canal parshall y un medidor ultrasónico

A continuación un descripción de cada una de las alternativas de tratamiento estudiadas y expuestas anteriormente en los diagramas de flujo.

3.2.8.1. Diseño de PTARs para San Lorenzo, Padcaya y Uriondo PTARs

Las alternativas de tratamiento estudiadas para las PTARs de San Lorenzo, Padcaya y Uriondo, son las siguientes:

Alternativa 1: A1

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento:

- **Línea de Agua,** con el siguiente efluente: 80-50 mg DBO_5/l, 60 mg SST/l y Coliformes Fecales 1000 NMP/100 ml (en 2023)
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall
  - Tratamiento Biológico: reactor UASB o RAFA + FAFA (filtro anaerobio de flujo ascendente)
  - Tratamiento Terciario: Humedales verdes
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Eras de Secado con inyección de cal

Alternativa 2: A2

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento:

- **Línea de Agua**, con el siguiente efluente: 25 mg DBO_5/l, 25 mg SST/l y Coliformes Fecales 1,000 NMP/100 ml (en 2023). Se añadiría recirculación del efluente clarificado hacia Filtros Percoladores en 2023 para alcanzar 4 mg NH_4^+/l
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall
  - Tratamiento Biológico: decantador primario + Filtro Percolador (soporte: piedra) + decantador secundario
  - Tratamiento Terciario: tanque de cloración
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Bombeo de Fangos primarios a digestor anaerobio
  - Bombeo de fangos secundarios a digestor anaerobio
  - Digestor anaerobio (sin mezcla ni recirculación ni control de temperatura)
  - Eras de Secado

Alternativa 3: A3

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua**, con el siguiente efluente: 80-50 mg DBO_5/l, 60 mg SST/l y Coliformes Fecales 1,000 NMP/100 ml (en 2023)
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
  - Tratamiento Biológico: reactor UASB o RAFA
  - Tratamiento Terciario: humedales verdes
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Eras de Secado con inyección de cal

Alternativa 4: Lagunaje

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua**, con el siguiente efluente: 80-50 mg DBO_5/l, 60 mg SST/l y Coliformes Fecales 1,000 NMP/100 ml (en 2023)
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
  - Tratamiento Biológico: Lagunas anaerobias (cerradas) + Lagunas facultativas (con y sin equipos de mezclado)
  - Tratamiento Terciario: lagunas de maduración (con y sin equipos de mezclado)
- **Línea de Fangos**, consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Eras de Secado con inyección de cal

La alternativa 4 no se puedo evaluar porque se necesitaba mucho espacio, el cual no era disponible.

3.2.8.2. PTAR San Luis – Tarija

Todas las alternativas de tratamiento para la PTAR de San Luis (Tarija) se describen a continuación. Primero se proponen alternativas de tipo mejoras de la PTAR existente (C1, C2) y luego alternativas que consisten en una PTAR completamente nueva (B1, B2).

Alternativa 1: C1

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua,** con el siguiente efluente: 25 mg DBO_5/l, 25 mg SST/l y Coliformes Fecales 1000 NMP/100 ml
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
  - Tratamiento Biológico:
    - Convertir las dos lagunas anaerobias en Lagunas aireadas
    - Convertir la laguna de maduración en Laguna de sedimentación
  - Tratamiento Terciario: lagunas de maduración
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Purga de fangos
  - Espesador de fangos
  - Eras de Secado con inyección de cal

Alternativa 2: C2

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua,** con el siguiente efluente: 25 mg DBO_5/l, 25 mg SST/l y Coliformes Fecales 1000 NMP/100 ml
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
    - Tratamiento Biológico:
    - Limpiar, vaciar, profundizar y poner capa geotextil en las lagunas anaerobias existentes.
  - Nuevos tratamientos: Filtros percoladores (soporte: plástico) + decantador secundario
  - Tratamiento Terciario: tanque de cloración
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Recirculación de aguas tratada a los filtros percoladores
  - Purga de fangos
  - Espesador de fangos
  - Deshidratación mecánica con inyección de cal.
- **Línea de Gas,** donde el biogas producido se quemaría en una antorcha.

Alternativa 3: B1

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua,** con el siguiente efluente: 25 mg DBO_5/l, 25 mg SST/l y Coliformes Fecales 1000 NMP/100 ml en 2021. Se añadiría más Filtros Percoladores en 2036 para alcanzar 4 mg NH_4^+/l.
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
  - Tratamiento Primario: Decantador primario
  - Tratamiento Biológico: filtros percoladores (soporte: plástico) + decantador secundario
  - Tratamiento Terciario: tanque de cloración
- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Recirculación y purga de fangos
  - Espesador de fangos
  - Digestión anaerobia,
  - Eras de secado o deshidratación mecánica.

Alternativa 4: B2

Esta Alternativa consiste en los siguientes procesos de tratamiento.

- **Línea de Agua,** con el siguiente efluente: 25 mg DBO_5/l, 25 mg SST/l y Coliformes Fecales 1000 NMP/100 ml en 2021. Se añadiría más volumen en los tanques biológicos en 2036 para alcanzar 4 mg NH_4^+/l.
  - Pretratamiento: arqueta de entrada + rejas + desarenador + canal parshall)
  - Tratamiento Primario: Decantador primario
  - Tratamiento Biológico: reactor biológico de Fangos Activos tipo convencional + decantador secundario
  - Tratamiento Terciario: tanque de cloración

- **Línea de Fangos,** consistente en los siguientes tratamientos obteniendo un fango estabilizado y con un mínimo de 30% de sólidos secos.
  - Recirculación y purga de fangos
  - Espesador de fangos
  - Digestión anaerobia,
  - Eras de secado o deshidratación mecánica.

3.3. SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para la selección de la alternativa más apropiada se sigue la metodología del BID, la cual consiste en la elección de la alternativa de tratamiento más barata. La alternativa más barata es aquella que tiene menor coste de inversión y de explotación a lo largo de toda su vida útil.

3.3.1. Costes de inversión y explotación de todas las alternativas

Se ha realizado un pre-diseño para todas las alternativas expuestas. Con el pre-diseño se han estimado las mediciones tanto de obra civil, mecánica, eléctrica, de automatismo e instrumentación, lo que proporciona el coste de inversión. Por otra parte, se ha estimado también los costes de explotación para cada alternativa. Los costes de explotación consisten en: personal, administrativos, energía, insumos y residuos (fangos, arenas, etc.).

A continuación se expone una tabla donde se puede apreciar los costes de inversión (Bs) y costes de explotación (Bs) para cada alternativa y PTAR para toda su vida útil.

Tabla 3.14: Alternativas con costes de inversión y explotación - Tarija

PTAR	ALTERNATIVA SELECCIONADA	TIPO DE TRATAMIENTO*	COSTE INVERSION (Bs)	COSTE EXPLOTACIÓN (Bs)
San Luis	Alternativa 1: C1	L. Agua: L.Aireada+L.Sedimentación+Desinfección L. Fangos: Purga de fangos + Espesador + Deshidratación mecánica + inyección de cal	98,000,000.00	272,839,429
	Alternativa 2: C2	L. Agua: L.Anaerobia+F. Percolador+Desinfección L. Fangos: Purga de fangos + Espesador + Deshidratación mecánica + inyección de cal	99,547,238.58	88,598,859
	Alternativa 3: B1	L. Agua: Decantación 1ª + F.Percolador + Desinfección L. Fangos: Purga de fangos + Espesador + Deshidratación mecánica + inyección de cal	167,983,116.00	93,837,054
	Alternativa 4: B2	L. Agua: Decantación 1ª + Fangos Activos Convencionales+ Desinfección L. Fangos: Purga de fangos + Espesador + Deshidratación mecánica + inyección de cal	159,000,000.00	310,884,885

Fuente: Elaboración propia

**Todas las PTAR tienen pre-tratamiento*

Tabla 3.15: Alternativas con costes de inversión y explotación – San Lorenzo

PTAR	ALTERNATIVA SELECCIONADA	TIPO DE TRATAMIENTO*	COSTE INVERSION (Bs)	COSTE EXPLOTACIÓN (Bs)
San Lorenzo	Alternativa 1: A1	L. Agua: RAF+FAFA+humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	3,325,890.00	873,305
	Alternativa 2: A2	L. Agua: S. Primario+F. Percolador+Desinfección L. Fangos: Digestor anaerobio + Lechos de secado	2,616,692.00	1,895,667
	Alternativa 3: A3	L. Agua: UASB + humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	2,826,272.11	826,782

Fuente: Elaboración propia

**Todas las PTAR tienen pre-tratamiento*

A pesar de que la alternativa 2 no fue la más barata sumando los costes de inversión y los de operación durante toda su vida útil, dicha alternativa tiene las siguientes ventajas, las cuales fueron decisión para su selección:

- Menor espacio necesario para el tratamiento. Existe la parcela donde está ubicada la PTAR existente. Se ha considerado dicha parcela para la ubicación de la PTAR futura. Las alternativas 1 y 3 necesitan muchos más espacio del disponible.
- Capacidad de ampliar el tratamiento en la etapa 2 (2036) con la introducción de la eliminación de nitrógeno-amoniacal, y
- La producción de olores de esta alternativa es menor que las otras dos.

Tabla 3.16: Alternativas con costes de inversión y explotación – Uriondo

PTAR	ALTERNATIVA SELECCIONADA	TIPO DE TRATAMIENTO*	COSTE INVERSION (Bs)	COSTE EXPLOTACIÓN (Bs)
Uriondo	Alternativa 1: A1	L. Agua: RAF+FAFA+humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	2,399,824.12	387,463
	Alternativa 2: A2	L. Agua: S. Primario+F. Percolador+Desinfección L. Fangos: Digestión anaerobia +Lechos de secado	1,402,922.34	814,198
	Alternativa 3: A3	L. Agua: UASB + humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	2,051,266.89	377,833

Fuente: Elaboración propia

**Todas las PTAR tienen pre-tratamiento*

Tabla 3.17: Alternativas con costes de inversión y explotación – Padcaya

PTAR	ALTERNATIVA SELECCIONADA	TIPO DE TRATAMIENTO*	COSTE INVERSION (Bs)	COSTE EXPLOTACIÓN (Bs)
Padcaya	Alternativa 1: A1	L. Agua: RAF+FAFA+humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	2,655,525.50	578,060
	Alternativa 2: A2	L. Agua: S. Primario + F. Percolador+Desinfección L. Fangos: Digestión anaerobia + Lechos de secado	1,428,032.36	1,258,907
	Alternativa 3: A3	L. Agua: UASB + humedal verde L. Fangos: Eras de secado + inyección de cal	1,811,103.53	965,571

Fuente: Elaboración propia

**Todas las PTAR tienen pre-tratamiento*

La alternativa 4 de Lagunaje no fue evaluada ya que no había suficiente área disponible en la parcela de las PTARs.

3.3.2. Alternativas seleccionadas para cada PTAR

A continuación se expone en las siguientes Tablas, las alternativas seleccionadas y las dimensiones para cada PTAR.

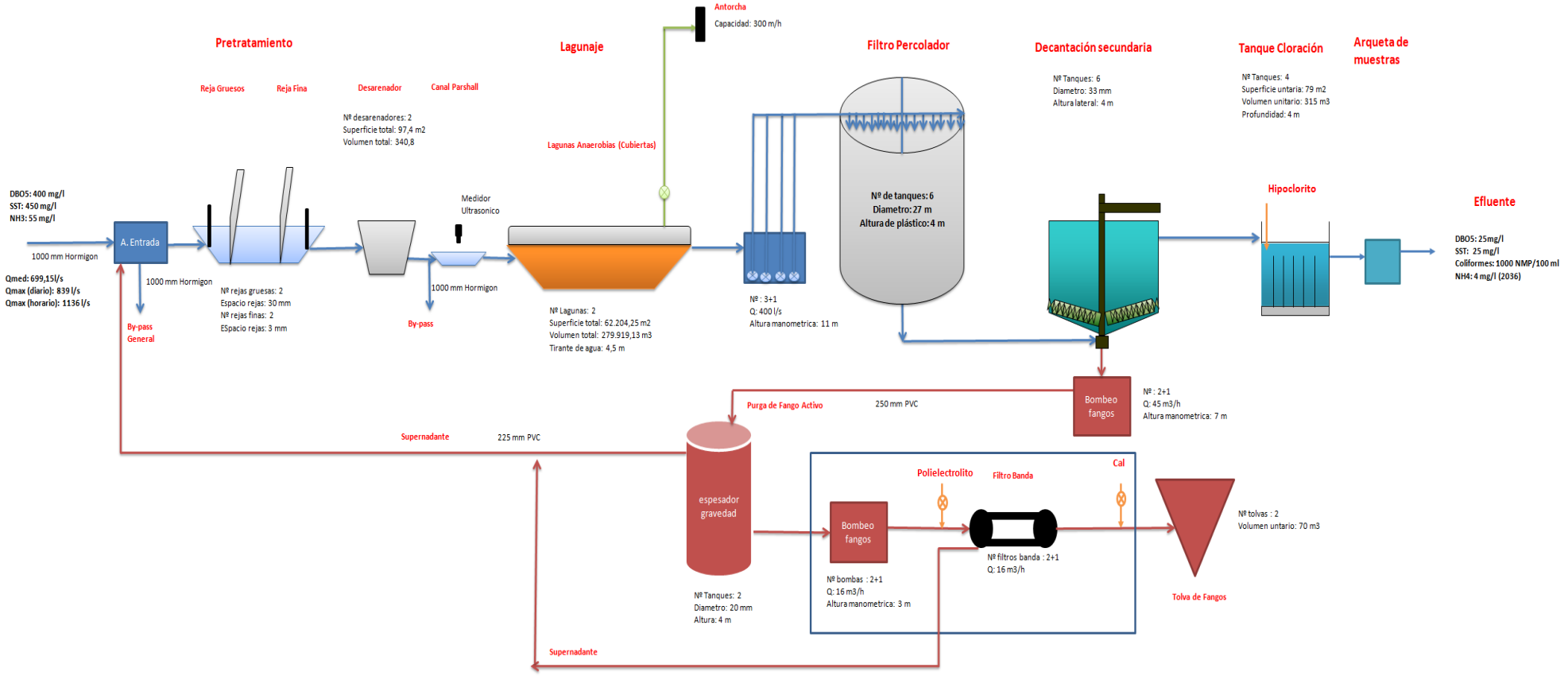
Tabla 3.18: Alternativas seleccionadas

PTAR	ALTERNATIVA SELECCIONADA	TIPO DE TRATAMIENTO	EFLUENTE & FANGO (2023)
San Luis	**Alternativa 2: C2**	L. Agua: Pre-tratamiento + L. anaerobia (cerrada) + F. Percolador (plástico) + Decantación 2ª + Desinfección L. Fangos: Espesamiento gravitacional + Deshidratación mecánica + inyección de Cal	Efluente: < 30 mg DBO/l < 1000 NMP/100 ml Fango: estabilizado con un 30 % de sólidos secos como mínimo
San Lorenzo	**Alternativa 2**	L. Agua: Pre-tratamiento + Decantación 1ª + F. Percolador (piedra) + Decantación 2ª + Desinfección L. Fangos: Digestión anaerobia + Eras de secado	
Uriondo	**Alternativa 2**		
Padcaya	**Alternativa 2**		

Fuente: Elaboración propia

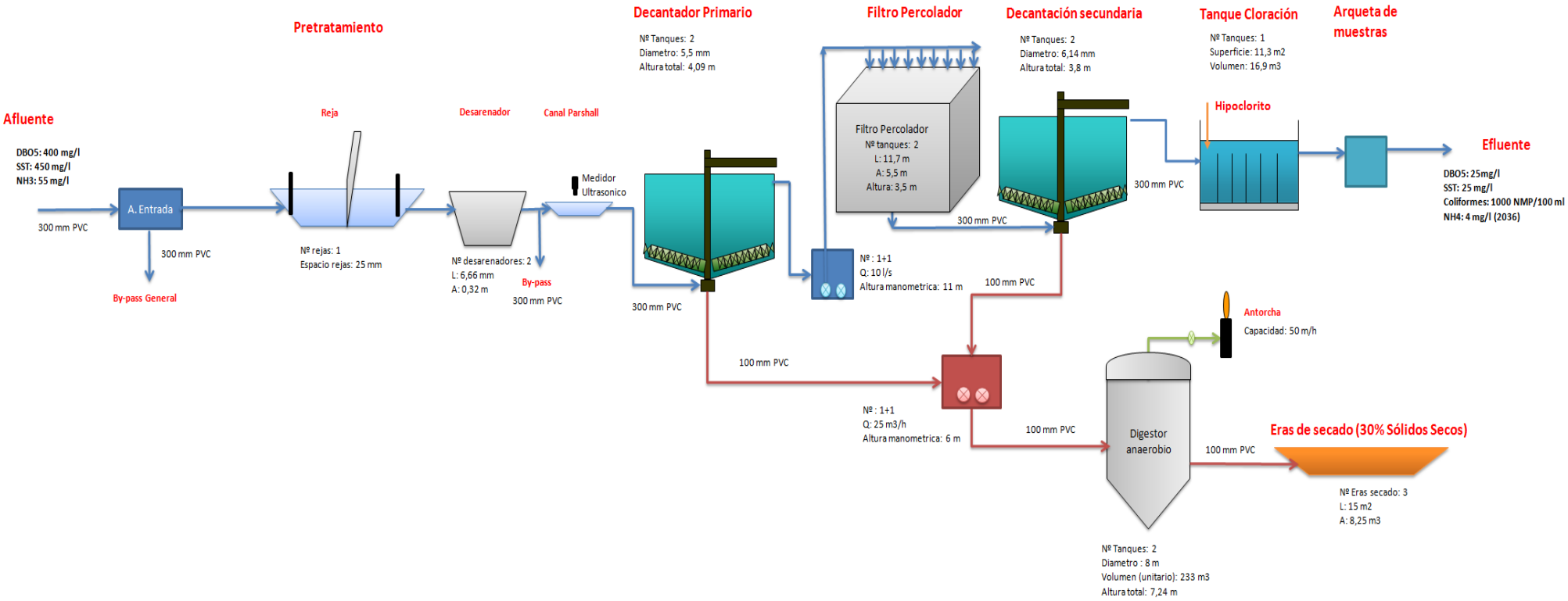
A continuación se expondrá en las siguientes ilustraciones, el diagrama de flujo de las alternativas seleccionadas con sus correspondientes dimensiones.

Figura 3.9. Alternativa elegida: Alternativa 2: C2 – PTAR de San Luis



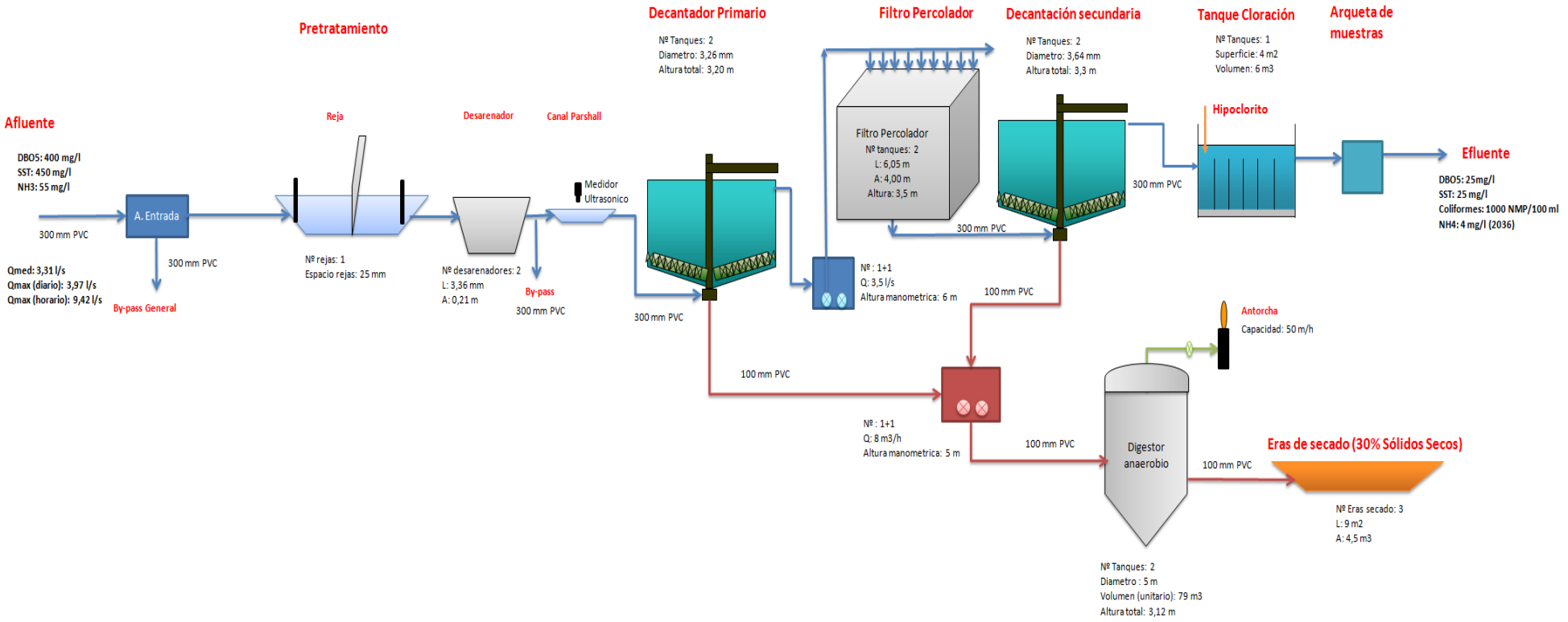
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de San Lorenzo



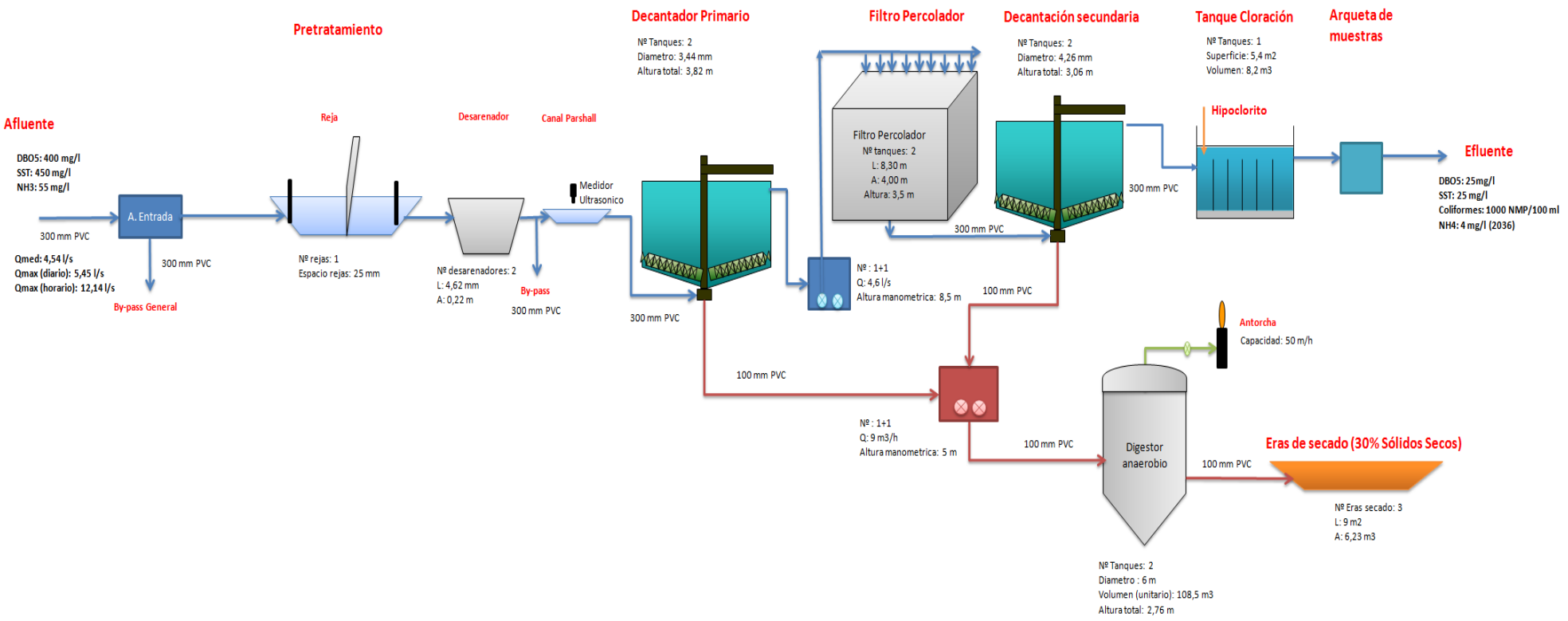
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de Uriondo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12. Alternativa elegida: Alternativa 2: A2 – PTAR de Padcaya



Fuente: Elaboración propia

4. RIO GUADALQUIVIR

4.1. USOS DE LAS AGUAS DEL RÍO GUADALQUIVIR

Con base en un recorrido realizado a lo largo de todo el río Guadalquivir desde el Municipio de San Lorenzo, hasta el municipio de Tarija, se ha podido observar los usos que se le viene dando a las aguas del río, descritos a continuación.

4.1.1. Río Guadalquivir - Tramo población San Lorenzo

En el Tramo de San Lorenzo se han identificado las siguientes actividades:

- Aguas arriba en lecho del río se da la extracción de áridos, como ser arena, piedra y grava, y para ello han instalado una serie de tamices, donde con maquinarías y equipo proceden a su selección, almacenamiento y transporte, la Empresa a cargo de explotación es la OAS que tiene a cargo la construcción de la carretera Potosí – Tarija.

Fotografía 4.1. Explotación de áridos, movimiento de maquinaria y equipo

- Se han identificado obras de toma de agua para riego, en operación y en fase de construcción, la toma se realiza a través de galerías filtrantes que se vienen y se han construido en distintos puntos del río, el agua es utilizada para la producción de hortalizas principalmente en zonas relativamente extensas que están ubicadas aguas debajo de la población.

Fotografía 4.2. Galería filtrante en construcción, agua para riego

4.1.2. Río Guadalquivir - Tramo ciudad de Tarija

En este tramo de la ciudad, por lo general tiene prohibida la explotación de áridos, pero se observa aguas debajo de la población, la explotación de áridos está dada por empresas privadas que cuentan con la autorización del municipio, extraen áridos con retroexcavadoras y los transportan a las orillas del río donde acopian todo el material y lo clasifican para su comercialización en la ciudad.

También se puede observar que las aguas del río, le dan uso personas que se dedican al lavado de la ropa (altura Puente Tomatitas) y otras personas hacen uso de las playas para bañarse (Miraflores), en la zona de San Blas las aguas se utilizan para riego, y al final del área urbana, el represamiento de las aguas para la generación de energía eléctrica de San Luis.

Aguas abajo de la población, el río llega hasta Uriondo donde se une con el Río Camacho, en este tramo, las aguas son utilizadas para riego intensivo.

Fotografía 4.3. Lavado de ropa y bañistas, aguas arriba altura puente de Tomatitas

Fotografía 4.4. Explotación de áridos, aguas abajo del rio, altura de San Blas

Fotografía 4.5. Almacenamiento de áridos clasificados para su comercialización, al frente de San Luis

Fotografía 4.6. Represa para la generación de energía eléctrica de San Luis

Por tanto las actividades son varias las que se realizan con las aguas del río Guadalquivir, consideramos que la de mayor importancia es el uso para riego.

4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA

4.2.1. Campaña de Muestreo

Para la caracterización de las aguas que escurren por los ríos, se ha procedido de la siguiente manera:

(i) Se han identificado puntos donde se espera que la calidad el agua se haya modificado por el aporte de las aguas servidas ya sean crudas o tratadas,

(ii) Se han determinado los parámetros básicos a analizarse en cada punto considerando el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica - RMCH, el tipo de contaminación que puedan estar recibiendo, como ser aguas servidas, descargas industriales y otros que puedan provenir de los campos de cultivo. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- Coliformes Totales
- Conductividad

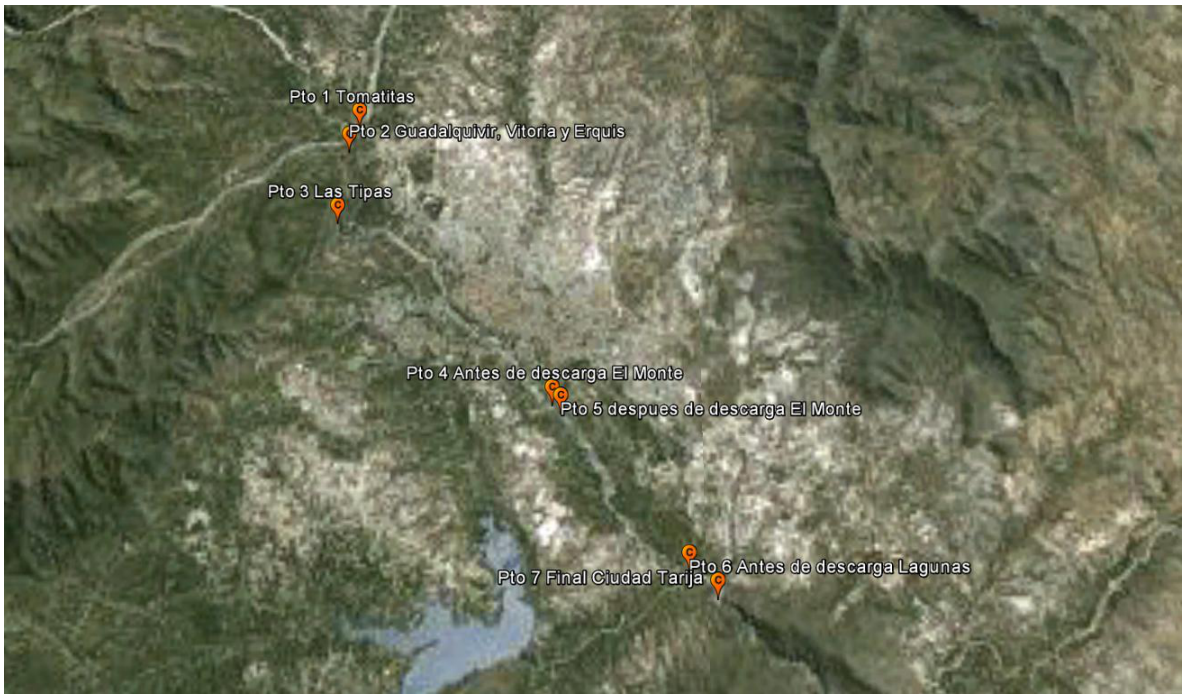
- Cromo Hexavalente
- DBO5
- DQO
- Escherichia Coli
- Nitrógeno Total
- Oxígeno Disuelto
- pH
- Sólidos Totales Disueltos
- Sólidos Suspendidos Totales
- Temperatura

(iii) Las muestras se han determinado en la primera semana de noviembre del 2012, considerada como época de estiaje, muestras simples, tanto la toma como de los análisis estuvo a cargo el Laboratorio de Aguas Tarija Zona San Luis de COSAALT.

(iv) Para determinar la clasificación de los cuerpos de agua se ha tomado en cuenta los valores del Cuadro No. A-1 Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores del RMCH, así como del Art. 4, de la clasificación de los cuerpos de aguas, y también estudios realizados por el Gobierno Municipal y la Gobernación.

A continuación se muestran los puntos donde se realizó el muestreo.

Figura 4.1. Puntos de muestreo en el río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia en Google Earth

4.2.1.1. Rio Guadalquivir Zona San Lorenzo

Con base en la información recopilada de otras fuentes y producto de los análisis de aguas realizadas en los distintos puntos de los ríos, se tiene lo siguiente:

Según el PMOT del Gobierno Municipal de la Primera Sección Provincia Méndez, San Lorenzo, señala lo siguiente: que en los esquemas de clasificación de las aguas del río Guadalquivir se observa que en general el río está como clase C en casi todos los tramos, **excepto los de San Lorenzo a Obrajes y de Torrecillas al Angosto, que supera los límites de la clase C y se ubican como clase D**. En esta clasificación tiene un mayor peso la presencia de coliformes fecales.

El grado de contaminación por heces fecales, de los cursos de agua superficiales es alarmante desde el punto de vista de la salud pública, de hecho los principales cursos de agua, pueden ser considerados de Clase D, según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333, con serias limitaciones para su uso.

Con base en los reportes de laboratorio de COSAALT, efectuados para el Río Guadalquivir, se tiene los siguientes valores:

Tabla 4.1 Valores de caracterización del río Guadalquivir – San Lorenzo

PARAMETROS	Unidad	PTO. 1	CLASE	PTO. 3	CLASE
Coliformes Totales	NMP/100 ml	3.60E+01		3.60E+01	
Conductividad	uS/cm	178.7		193	
Cromo Hexavalente	mg/l	0.002	A	0.009	A
DBO5	mg/l	0.54	A	1.88	A
DQO	mg/l	1.3	A	4	A
Escherichia Coli	NMP/100 ml	3.60E+01		ausencia	
Nitrógeno Total	mg/l	0.11	A	0.11	A
Oxígeno Disuelto	mg/l	5.82		6.68	
pH		7.37	A	7.17	A
Sol. Totales Disueltos	mg/l	92.6	A	100.4	A
Sol. Suspendidos totales	mg/l	2.8		2	
Temperatura	ºC	23.2		23	

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el Río Guadalquivir en el tramo de San Lorenzo, presenta aguas de “Clase A”, aguas de máxima calidad solo requieren de una desinfección, esta clasificación de alguna manera es diferente a lo señalado por el PMOT, Clase D. Como se señaló anteriormente, el uso que se le viene dando a estas aguas es de riego y según el Reglamento deberíamos tener una clase B. Aguas de utilidad general.

4.2.1.2. Rio Guadalquivir Zona Tarija

Los resultados de laboratorio encontrados, producto de la toma de muestras en esta zona del Río Guadalquivir, son los mostrados en la Tabla siguiente.

Tabla 4.2 Valores de caracterización del río Guadalquivir – Tarija

PARAMETROS	Unidad	PTO. 1	CLASE	PTO 2	CLASE	PTO. 3	CLASE	PTO. 4	CLASE	PTO. 5	CLASE	PTO. 6	CLASE	PTO.7	CLASE
Coliformes Totales	NMP/100 ml	2.20E+02		9.10E+01		9.10E+01		9.30E+02		7.50E+02		4.30E+03		4.30E+03	
Conductividad	uS/cm	112		124.5		127.6		158		187		201		183.2	
Cromo Hexavalente	mg/l	0.005	A	0.001	A	0.012	A	0.013	A	0.002	A	n.d.	A	0.012	A
DBO5	mg/l	0.66	A	0.37	A	4.8	B	7.21	C	8.62	C	4.64	B	16.06	C
DQO	mg/l	1.5	A	0.8	A	7.7	B	15.39	C	15.39	C	10	B	30.78	C
Escherichia Coli	NMP/100 ml	2.20E+02		9.10E+01		9.10E+01		9.30E+02		7.50E+02		4.30E+03		4.30E+03	
Nitrógeno Total	mg/l	0.22	A	0.22	A	0.6	A	0.33	A	0.16	A	0.38	A	1.2	A
Oxígeno Disuelto	mg/l	4.86		5.79		5.52		5.19		4.99		4.56		4.26	
pH		7.43	A	7.51	A	7.2	A	7.03	A	7.37	A	7.64	A	7.1	A
Sol. Totales Disueltos	mg/l	87	A	64.3	A	66.1	A	111	A	151	A	225	A	173	A
Sol. Suspendidos Totales	mg/l	10		16.00		27.9		41		87		288		150	
Temperatura	°C	23.4		23.30		23.4		23		23.1		23.2		22.5	

Fuente: Elaboración prop

PTO1 Inicio, altura Puente Tomatitas

PTO.2 Después confluencia Río Vitoria y Erquis

PTO 3 Obra de Toma Las Tipas

PTO. 4 Antes descarga Quebrada El Monte

PTO. 5 Después descarga Quebrada El Monte

PTO. 6 Antes de la descarga PTAR

PTO. 7 Final Ciudad Tarija

Con base en los datos de la Tabla anterior, se concluye que el río Guadalquivir en sus inicios, límite con el Municipio de San Lorenzo, las aguas se presentan de Clase A, para ir progresivamente pasando a una Clase B y en las afueras de la mancha urbana presenta una Clase C.

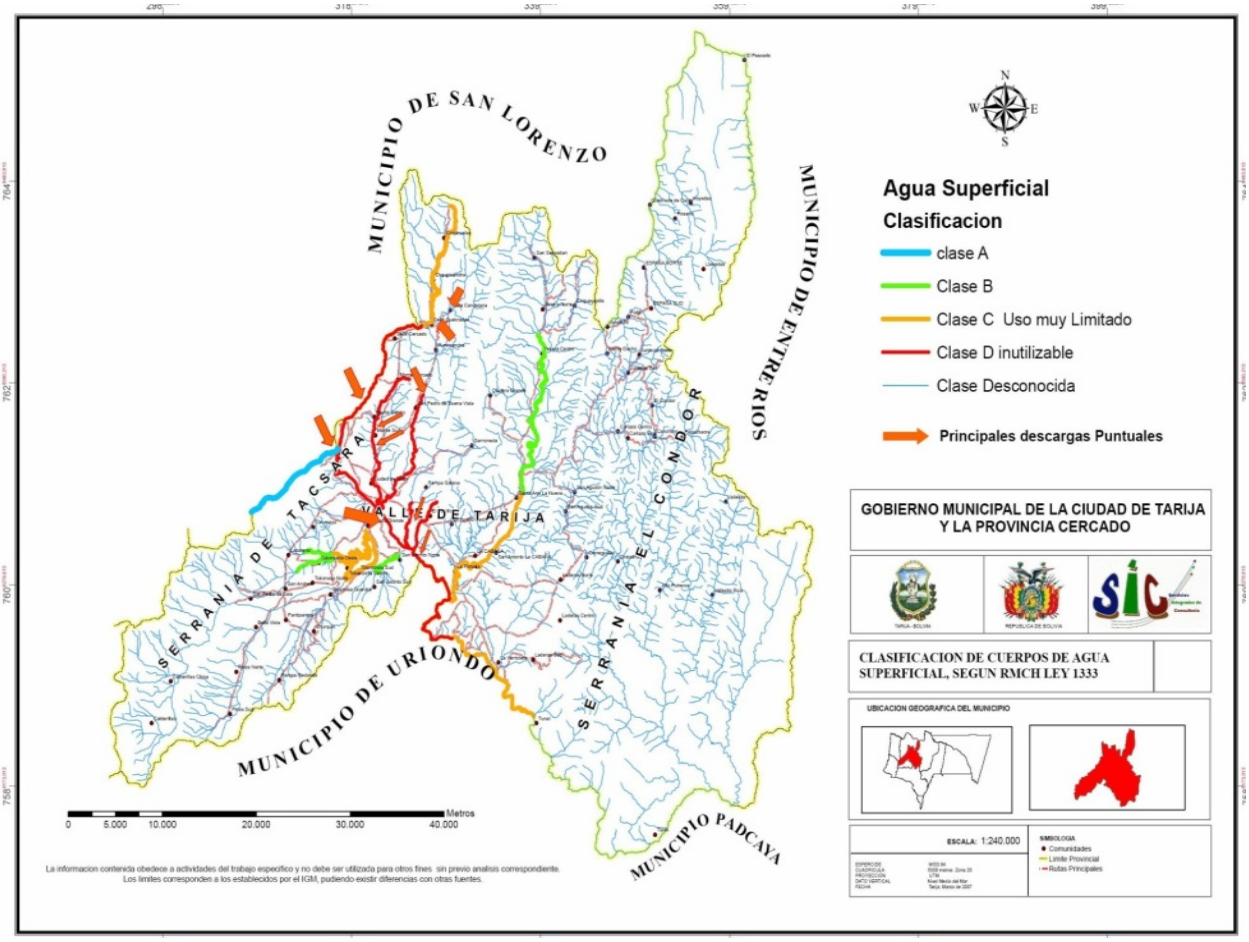
4.2.2. Clasificación para el río Guadalquivir

Según el Plan Municipal de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Cercado, se señala lo siguiente:

Para la determinación del grado de contaminación han adoptado los mismos criterios para clasificación de cuerpos de agua según su uso de acuerdo a la Reglamentación en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333, donde se establece las siguientes clases de agua según su objeto de uso.

Una clasificación por tramos de cursos de agua y su grado de contaminación se representa en la Figura siguiente, con tramos de diferentes colores para las clases de agua A, B, C y D, según su objeto de uso.

Figura 4.2 Clasificación de cuerpos de agua superficiales según RMCH – Ley 1333



Fuente: RMCH – Ley 1333

De acuerdo a la Gráfica y el RMCH de la Ley 1333, los principales cursos y cuerpos de agua superficiales de la Provincia Cercado, están clasificados como de Clase C y D, con serias limitaciones para su uso en:

- Abastecimiento para agua potable
- Para recreación con contacto primario
- Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella

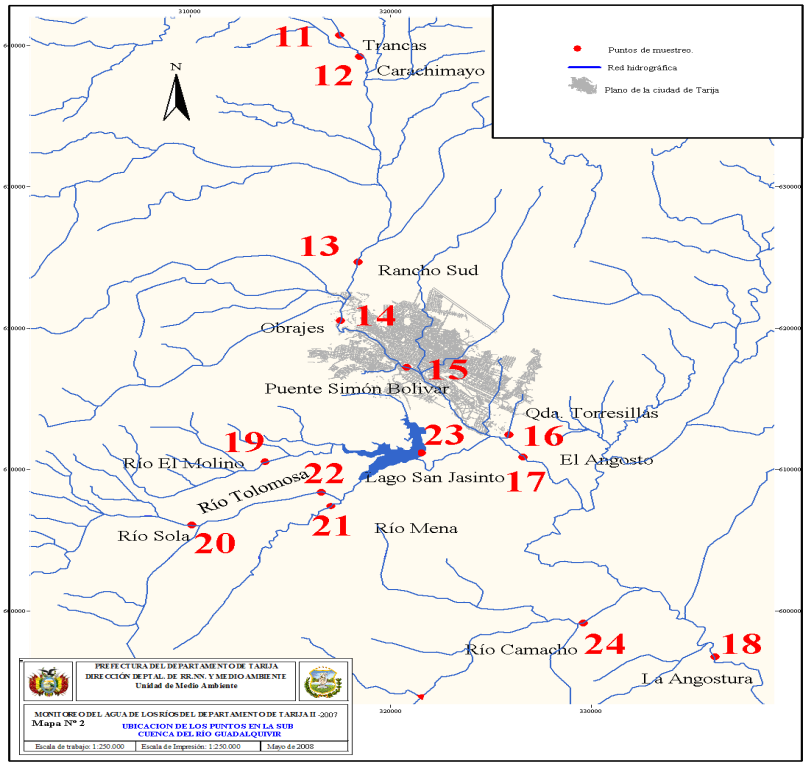
Se realizaron muestreos de agua en 14 puntos fijos ubicados en la cuenca del Guadalquivir, como se indica en la Tabla 4.3 y el siguiente mapa.

Tabla 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca del río Guadalquivir

N°	SUBCUENCA RIO GUADALQUIVIR	UBICACIÓN
11	Río Guadalquivir	Trancas cabecera Río Guadalquivir
12	Río Guadalquivir	Puente ruta a Carichimayo
13	Río Guadalquivir	Rancho Sud Altura Planta Betonmix
14	Río Guadalquivir	Estación Hidrométrica Obrajes-Tipas
15	Río Guadalquivir	A la altura del Puente Bolívar
16	Quebrada Torrecillas	A la altura del puente-San Luís
17	Río Guadalquivir	El Angosto-San Luís
18	Río Guadalquivir	Estación Hidrométrica la Angostura
19	Río EL Molino	A la altura del puente-San Andrés
20	Río Sola	En la toma de agua
21	Río Mena	Cruce del camino
22	Río Tolomosa	Cruce del camino viejo
23	Lago San Jacinto	Toma de agua
24	Río Camacho	500 mt abajo de Juntas

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca del río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia

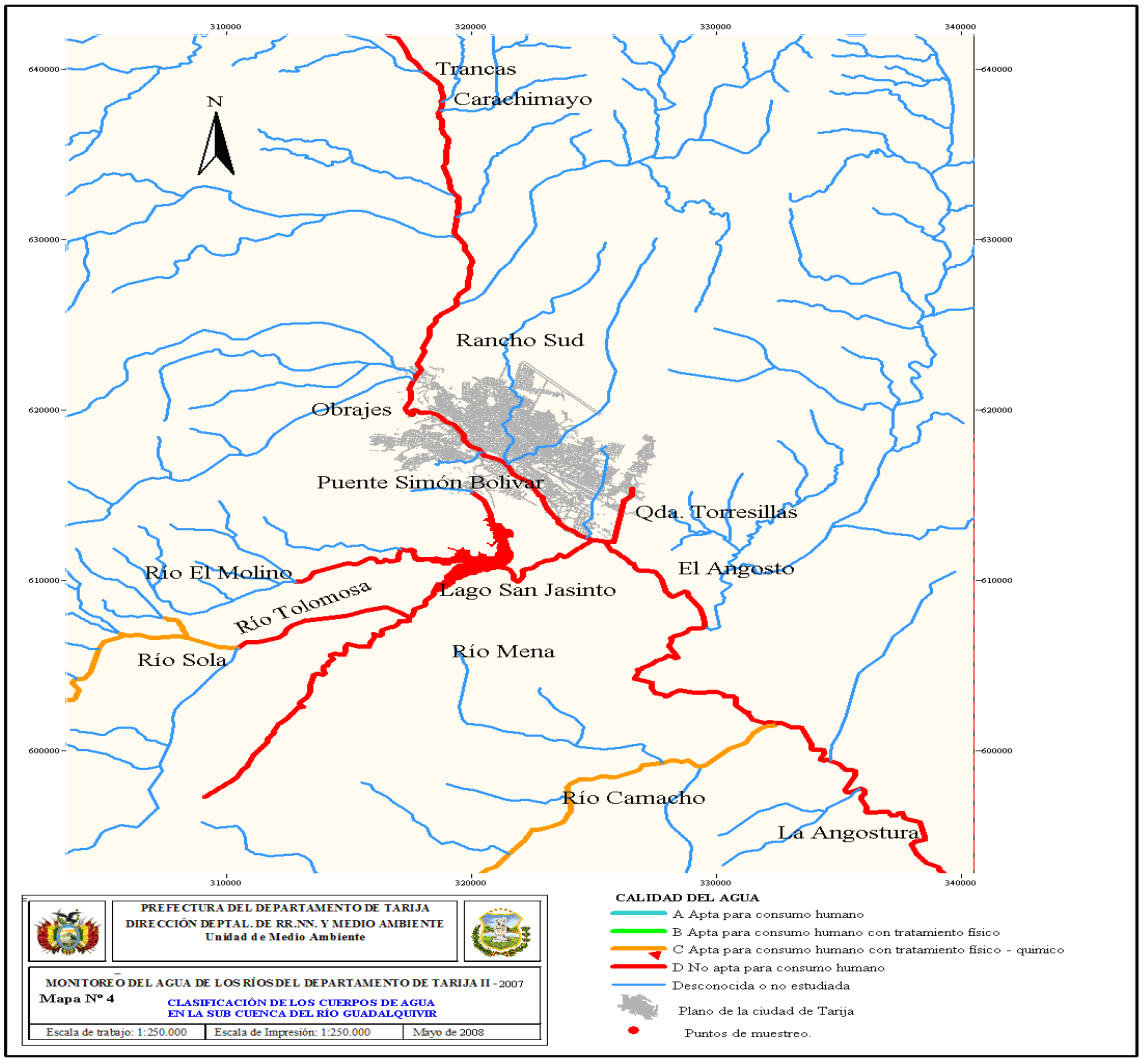
Con base en los análisis y los resultados que se reporta del Informe, Anexo 1-B Clasificación cuenca Río Guadalquivir, señala lo siguiente:

- Se tienen valores de **Fosfato total** de **CLASE D** en la Quebrada de Torrecillas, rió Guadalquivir en el Angosto de San Luís, rió Mena, y en Lago San Jacinto, estos valores altos son a consecuencia del uso de los distintos fertilizantes que contienen fósforo y que se utilizan en la actividad agrícola, fósforo que va a formar parte de los nutrientes del suelo y que por escorrentías causadas en épocas de lluvias se depositan en los distintos ríos de la Cuenca del Guadalquivir.
- Analizados los parámetros de Metales Pesados en la cuenca del rió Guadalquivir compuesta por los ríos que se muestrearon los ríos: Guadalquivir, El Molino, Sola, Tolomosa, Mena, Tolomosita y Camacho y Quebrada Torrecillas, ríos que de acuerdo a los análisis se encontraron los siguientes metales pesados :
- **Hierro** en lo que respecta al río Guadalquivir en los puntos Trancas y Puente Carichimayo, son de **CLASE C** y desde el Rancho Sud, Tipas, Puente Bolívar, Quebrada Torrecillas, El Angosto y La Angostura es de **CLASE D**, el Lago San Jacinto es de **CLASE D** y el rió Camacho **CLASE C**, es de hacer notar que los valores de Hierro se excedieron a los valores admisibles de **CLASE D** en el lago San Jacinto**.**
- **Sodio**, en los puntos de muestreo de la Quebrada de Torrecillas y el Angosto de San Luís se tienen altos valores que sobrepasan los valores máximos permitidos de **CLASE D**, estos valores se manifiestan en las épocas de las grandes avenidas sobre todo en los meses de Noviembre-Diciembre .
- Los demás valores de metales pesados considerados en los análisis como ser: POTASIO, MERCURIO, COBRE, MANGANESO, ZINC Y PLOMO se encuentran dentro de los valores admisibles.
- Desde la parte alta del Río Guadalquivir o sea desde Trancas que es el primer punto hasta el último punto ubicado en La Angostura ,de acuerdo a la clasificación de los cuerpos de agua es de **CLASE D,** esto debido principalmente al alto contenido de carga orgánica del Río Guadalquivir y sus principales afluentes a consecuencia de una intensa actividad agrícola ganadera en la zona y por la presencia de poblaciones importantes como ser : Canasmoro, San Lorenzo, Tomatitas y principalmente de la Ciudad de Tarija que vierten sus aguas residuales sin el tratamiento adecuado y en algunos casos sin ningún tratamiento, además en esta zona sobre todo en la margen izquierda del río Guadalquivir se encuentran emplazadas la mayoría de las industrias que vierten sus aguas industriales con alta carga orgánica al río Guadalquivir que en la mayoría de los casos, estas agua están fuera de los límites admisibles de acuerdo al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 de Medio Ambiente y que se determinan generalmente por los parámetros siguientes : Demanda Química de Oxigeno **DQO** Demanda Bioquímica de Oxigeno **DBO5**, Coliformes Fecales **CF /100** , y Oxígeno Disuelto **OD** y que de acuerdo al RCH son parámetros fundamentales (O sea estos parámetros determinan la clase de agua según su aptitud de uso humano) y que a la vez la variación de estos parámetros producen la variación de la carga orgánica.
- Uno de los afluentes más importantes de la margen derecha del Río Guadalquivir es el río Sola y que de acuerdo a los resultados de los análisis es de **CLASE C,** esta clasificación es a consecuencia de que este río se encuentran en la parte intermedia de la zona y en la misma existen poblaciones de baja densidad, las mismas vierten sus aguas residuales a estos ríos sin ningún tratamiento además de los aportes orgánicos de la actividad agrícola y ganadera en esa zona.
- El Río de Tolomosa es de **CLASE D,** a consecuencia de la presencia de varias poblaciones como ser : San Andrés, Tolomosita Oeste, etc., que vierten sus aguas residuales a este Río sin ningún tratamiento además de los aportes orgánicos de una actividad agrícola y ganadera mas intensa que en la zona intermedia anteriormente mencionada.

- El Río Camacho es de **CLASE C**, atribuible a la actividad vitivinícola y ganadera de la zona y a la presencia de varias poblaciones como ser: Camacho, Cañas, Cañahuayco, Chaguaya, etc., que vierten sus aguas residuales a este Río sin ningún tratamiento.
- El Río Mena de acuerdo a la interpretación de los análisis de las muestras en base a la clasificación de la reglamentación que corresponde es de **CLASE D** , probablemente esto sea a consecuencia de además la alta actividad agrícola y ganadera en esta zona y debido a que las aguas residuales de la población de Tolomosa se vierten a este Río sin ningún tratamiento
- Es evidente, entretanto, que los bajos niveles de OD encontrados en la Quebrada Torrecillas (salida de las lagunas de tratamiento de COSAALT)) , anticipan un fuerte grado de contaminación orgánica de sus aguas, además, se verifica un fuerte aumento de la DQO (198 mg/lt de acuerdo a los análisis) y que debido al sub dimensionamiento de las lagunas de oxidación la eficiencia de la remoción de la carga orgánica ha bajado de índices de efectividad de aproximadamente el 50%,realizando un alto aporte de carga orgánica diaria al río Guadalquivir.
- En general se puede evidenciar una mala calidad bacteriológica de las aguas en todo el trayecto en estudio del río Guadalquivir, registrando un aumento aguas abajo en lo que respecta a Coliformes Fecales a consecuencia de las heces fecales sobre todo de origen humano que aportan los habitantes de la ciudad y que se vierten directamente al río por la falta de colectores y a consecuencia de la baja efectividad de remoción de las lagunas de oxidación, comprobando la existencia de una acentuada contaminación bacteriológica proveniente de aguas residuales de origen doméstico.

A continuación se muestra el mapa donde se señalan la clasificación de los cuerpos de agua, del Informe.

Figura 4.4. Clasificación del río Guadalquivir



Fuente: Gobernación de Tarija

De la Figura anterior se puede señalar que el río Guadalquivir, en el tramo de la ciudad, presenta una Clase D. Con base en la **información de la Gobernación** que es un producto de varias muestras y en diferentes periodos, se puede asumir como lo señala una Clase D, aguas de calidad mínima.

4.3. DESCARGAS DE AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS AL RÍO GUADALQUIVIR

De igual manera, para la caracterización de las aguas crudas, se han tomado muestras de agua de las descargas del alcantarillado sanitario al Río Guadalquivir, durante la segunda semana del mes de noviembre, que aún no se había iniciado las lluvias, muestras simples y el análisis a cargo de COSAALT.

En cuanto a la descarga de las aguas servidas domésticas al Río Guadalquivir, se puede señalar que el margen derecho de la ciudad de Tarija, o del río Guadalquivir, se viene descargando las aguas servidas de los Barrios San Martin, Méndez Arcos, San Antonio, La Tabladita, Tabladita I y II, directamente sus aguas al río Guadalquivir a la altura del Mercado Bolívar, sin ningún tipo de tratamiento, y las características físicas químicas y bacteriológicas se muestran en la Tabla 4.1

Las aguas servidas que se generan en el margen izquierdo de la ciudad de Tarija gran parte de ellas, como ser Luis Espinal, San Gerónimo, descargan a las cámaras sépticas y los efluentes de estas cámaras descargan a la Quebrada San Pedro, que es afluente del Río Guadalquivir y otros Barrios como El Tejar descargan a una cámara séptica y de este directamente al Río Guadalquivir, se ha tomado una muestra de esta quebrada cuyos resultados se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 4.4 Caracterización de las aguas servidas - Tarija

PARAMETROS	Unidad	A.C.1	A.C.2
Cloruros	mg/l	52.81	39.61
Coliformes Totales	NMP/100 ml	3.40E+04	9.30E+07
Conductividad	uS/cm	758	518
Cromo Hexavalente	mg/l	0.015	0.028
DBO5	mg/l	49.6	250
DQO	mg/l	96.2	410.45
Escherichia Coli	NMP/100 ml	3.40E+04	9.30E+07
Fósforo Total	mg/l	0.14	0.64
Grasas y Aceites	mg/l	4	23
Nitrógeno Total	mg/l	0.96	9.49
Oxígeno Disuelto	mg/l	2.97	n.d.
pH		8.21	8.56

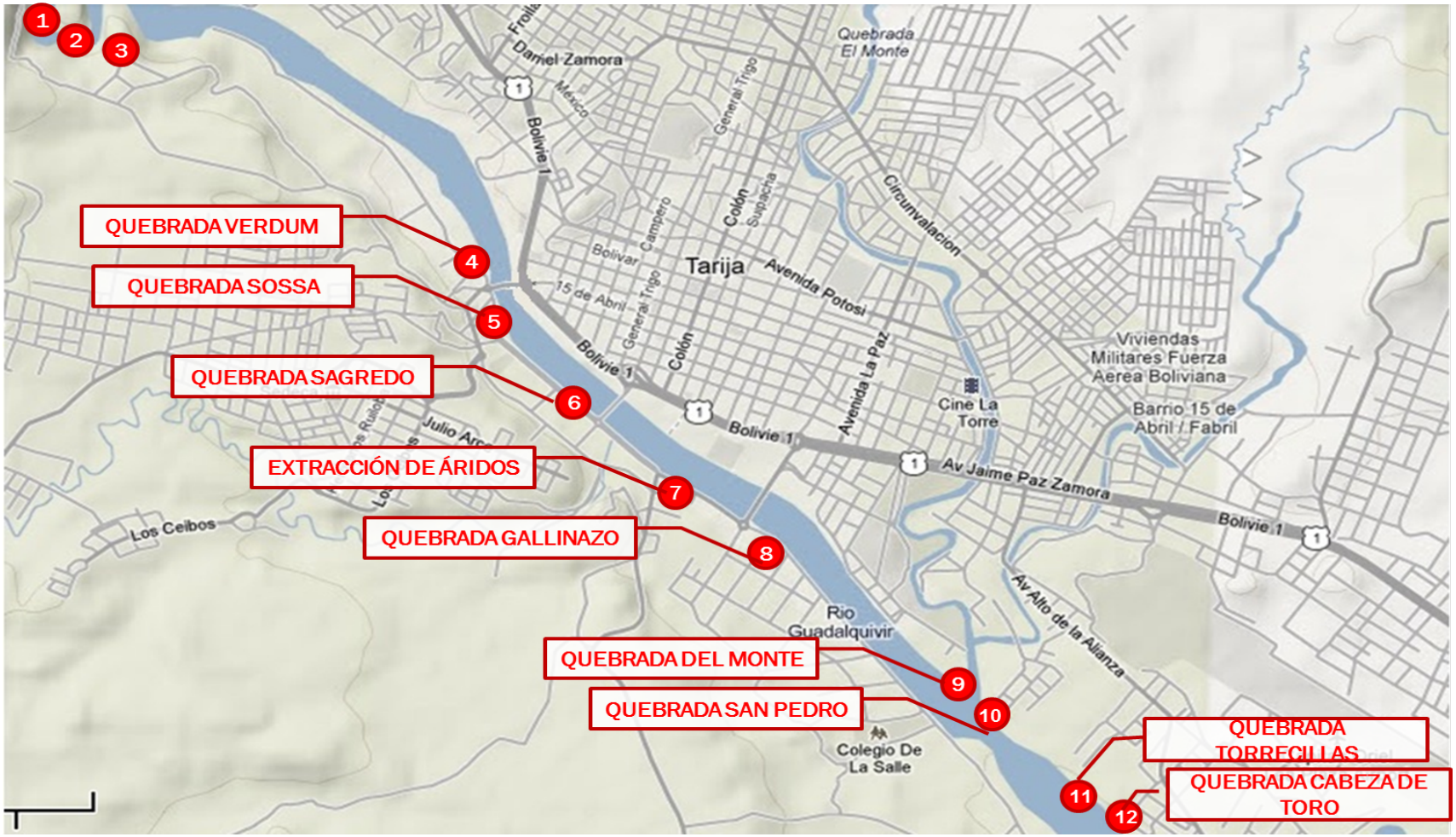
Fuente: Elaboración propia

A.C. 1: Aguas crudas, Confluencia del Río San Pedro y El Monte

A.C. 2 Aguas crudas, descarga Barrio SENAC

A continuación se presenta el Plano de la ciudad de Tarija con las redes de alcantarillado sanitario y los puntos de descarga al Río Guadalquivir.

Figura 4.5. Ubicación de las descargas al río Guadalquivir – Zona Tarija



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.7. Descarga del margen derecho de las aguas residuales al Río Guadalquivir

Fotografía 4.8. Descarga de una cámara séptica a la quebrada San Pedro

4.4. DESCARGAS DE AGUAS INDUSTRIALES AL RÍO GUADALQUIVIR

Las industrias en su mayoría se encuentran asentadas en la zona de El Aeropuerto de la ciudad de Tarija, que son seis las que están registradas por COSAALT y las descargas industriales lo realizan al alcantarillado sanitario de la zona, por lo que no se tiene una descarga directamente al río Guadalquivir, estas aguas van directamente a la Planta de Tratamiento de San Luis.

Las industrias que tienen un convenio con COSAALT son las siguientes:

- Bodegas MILCAST Corp.
- PIL Tarija (Lácteos)
- EMBOL S. A. (Embotelladora Boliviana de Coca Cola)
- CBN S. A. (Cervecería Boliviana Nacional)
- Cascada del Sur
- Avícola Pollo Pintón

COSAALT solo monitorea a las industrias mencionadas, para su conocimiento de cuanto están emitiendo, cuyos resultados se señalan de forma trimestral:

Tabla 4.5: Industria Bodegas Milcast Corp.

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS (mg/l)				Anexo 2 RMCH
		mar-12	jun-12	sep-12	dic-12	
Temperatura	°C	18,00	17,40	32,00	36,60	
pH		6,32	11,50	12,91	11,05	6 - 9
Turbiedad	UNT	470,00	286,00	184,00	22,80	
Color	u.c.	30,00	>70,00	>70,00	40,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	360,00	163,00	234,00	26,00	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	0,70	0,50	2,40	0,30	
Sólidos Totales	mg/l	1020,00	2410,00	10620,00	1744,00	
DBO5	mg/l	1695,00	3354,00	1398,00	345,68	80,00
DQO	mg/l	3168,32	6797,44	3009,90	615,68	250,00

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

Los valores de las descargas no cumplen con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a Sólidos suspendidos, pH, SST, DBO5 y DQO.

Tabla 4.6: Industrias PIL Tarija

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS (mg/l)				Anexo 2 RMCH
		mar-12	jun-12	sep-12	dic-12	
Temperatura	°C	22,70	21,40	25,00	32,30	
pH		5,94	9,30	6,80	4,75	6 - 9
Turbiedad	UNT	118,00	61,00	84,90	110,00	
Color	u.c.	20,00	10,00	20,00	40,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	72,00	46,00	80,00	36,00	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	<0,10	0,20	0,30	0,10	
Sólidos Totales	mg/l	672,00	390,00	510,00	556,00	
DBO5	mg/l	358,00	166,20	282,74	366,72	80,00
DQO	mg/l	475,25	339,87	336,00	590,03	250,00
Cloruros	mg/l	11,79	16,03	16,50	15,09	

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

Los valores de las descargas no cumplen con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a pH, Sólidos suspendidos, pH, SST DBO5 y DQO.

Tabla 4.7: Industrias EMBOL S.A

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS (mg/l)				Anexo 2 RMCH
		mar-12	jun-12	sep-12	dic-12	
Temperatura	°C	24,00	20,90	25,50	34,10	
pH		11,08	12,08	11,70	10,07	6 - 9
Turbiedad	UNT	55,00	32,40	71,70	366,00	
Color	u.c.	>70,00	35,00	>70,00	>70,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	524,00	87,00	86,00	1336,00	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	0,35	0,60	1,00	3,80	
Sólidos Totales	mg/l	2754,00	2834,00	3030,00	7604,00	
DBO5	mg/l	644,00	685,00	1309,57	4809,40	80,00
DQO	mg/l	1425,74	1568,64	2693,07	10004,80	250,00

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

Los valores de las descargas no cumplen con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a pH, Sólidos suspendidos, DBO5 y DQO.

Tabla 4.8: Industrias CBN

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS				Anexo 2 RMCH
		mar-12	jun-12	sep-12	dic-12	
Temperatura	°C	23,70	17,30	25,00	33,40	
pH		6,25	6,24	6,95	6,30	6 - 9
Turbiedad	UNT	306,00	102,00	91,80	65,00	
Color	u.c.	>70,00	20,00	20,00	50,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	2102,00	1766,00	1750,00	1348,00	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	606,00	26,00	91,80	14,00	
Sólidos Totales	mg/l	4,60	<0,1	<0,10	0,10	
DBO5	mg/l	636,00	756,00	1011,94	135,26	80,00
DQO	mg/l	1267,33	1568,64	1900,98	230,88	250,00

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

Los valores de las descargas no cumplen con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a Sólidos suspendidos, DBO5 y DQO.

Tabla 4.9: Industria Cascada del Sur

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS (mg/l)				Anexo 2 RMCH
		feb-12	jun-12	sep-12	nov-12	
Temperatura	°C	24,50	17,50	22,00	22,20	
pH		5,52	5,07	6,68	5,67	6 - 9
Turbiedad	UNT	17,90	72,10	40,80	19,40	
Color	u.c.	25,00	35,00	40,00	>70,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	40,00	35,00	7,00	10,00	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	830,00	694,00	378,00	506,00	
Sólidos Totales	mg/l	0,40	6,50	<0,10	<0,10	
DBO5	mg/l	336,00	370,20	96,73	190,37	80,00
DQO	mg/l	475,25	575,17	158,42	307,84	250,00

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

Los valores de las descargas no cumplen con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a pH, DBO5 y DQO.

Tabla 4.10: Industria Avícola Pollo Pintón

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADO (mg/l)	Anexo 2 RMCH
		nov-12	
Temperatura	°C	32,90	
pH		6,02	6 - 9
Turbiedad	UNT	156,00	
Color	u.c.	925,00	
Sólidos en Suspensión (SST)	mg/l	556,09	60,00
Sólidos Sedimentables	ml/l	1154,40	
Sólidos Totales	mg/l	77,00	
DBO5	mg/l	0,23	80,00
DQO	mg/l	25,00	250,00

Fuente: Elaboración propia con datos de COSAALT

El valor de la única descarga dada no cumple con el Anexo 2, Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, en lo que respecta a Sólidos suspendidos.

COSAALT requiere la aprobación de su reglamento interno por parte de la AAPS, para cobrar por las altas concentraciones que emiten las industrias o bien exigir a que las industrias se adecuen sus vertidos cumpliendo las leyes vigentes mediante un PTAR propia.

5. MODELACIÓN DEL RIO GUADALQUIVIR

5.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo intensivo y extensivo de la industria, la agricultura y demás actividades humanas, así como el aumento de la densidad demográfica que estamos experimentando en la actualidad, han provocado transformaciones antropogénicas a gran escala en diferentes países. En tales condiciones han surgido problemas sociales y económicos enormes, complejos y difíciles de solucionar relacionados con las tendencias desarrollistas de la sociedad, con la degradación de ecosistemas y la minimización de los procesos de transformación y la contaminación del medio ambiente.

La determinación del estado ecológico de las aguas superficiales receptoras de contaminantes es de gran interés, pues forma parte del conjunto de las actividades encaminadas a la conservación del medio ambiente que rodea al hombre. Dicha determinación, en ocasiones es extremadamente compleja al ser la extensión espacio-temporal del medio estudiado muy grande, convirtiéndose así en un reto para las capacidades de medición y representación del ente o personas gestoras del medio natural.

En este sentido, la modelización de los procesos ambientales y de transporte de contaminantes se ha convertido en una labor esencial para el ingeniero y el científico moderno (Kiely, 1999). Con la finalidad de simular alternativas de saneamiento para el Río Guadalquivir, el presente estudio trata de la aplicación del modelo matemático MIKE11, como una de las herramientas más efectivas y seguras a la hora de predecir las concentraciones en los cauces receptores, haciendo posible que se integren claramente todos los componentes del sistema, es decir, Río, Alcantarillado y Planta de Tratamiento.

5.2. MIKE 11 – MODELO ALTERNATIVO PARA LA SIMULACIÓN DE RIOS Y CANALES

5.2.1. Selección del modelo

Teniendo elegidas las herramientas de modelación que postulan a ser aplicadas en el desarrollo del presente estudio, y luego de hacer una minuciosa revisión teórica de cada una de ellas; partiendo de sus descripciones, manuales de utilización y sustentos teóricos ofrecidos por sus correspondientes creadores, se procedió a su comparación y evaluación.

Los factores que influyen sobre el tipo de modelo a seleccionar incluyen: el tipo de problema de calidad de agua que se desea resolver, las características del cuerpo de agua, la disponibilidad de datos observados, históricos, y actuales sobre el estado ecológico del agua y sobre las descargas de aguas residuales, los riesgos para la salud pública y el ambiente relacionados con el área, la gama disponible de opciones y de estrategias, el tiempo y los recursos financieros disponibles (Salas, 1984).

Se evaluó en el estudio la posible aplicación de cinco modelos *disponibles* en el mercado tales como: STREPER Y PHELPS (JICA, 1994), SIMOD (DEPFI-UNAM, 1989), RIOS 4.0 (CEPIS, 1995), QUAL2-E (EPA, 1994) y Mike11 (DHI, 2003). Todos los modelos presentaron ventajas y desventajas en su evaluación.

Figura 5.1. Extensiones de los archivos que utiliza Mike11

Características	JICA (SyP)	RIOS IV	SIMOD	QUAL2E	Mike11
Flujo No Permanente y Variado	✗	✗	?	✓	✓
Solución Estable y Exacta	✓	✗	✗	✓	✓
Personalización de ecosistemas	✗	✗	✗	✗	✓
Estructura Modular (Hid,AD,CA)	✗	✗	✗	✗	✓
Versión sin restricciones	✓	✗	✓	✓	✓
Acceso al Software	✓	✓	✗	✓	✓

Fuente: Mike11-User Manual, Denmark, 2003.

Se encontraron inconvenientes de *disponibilidad* del modelo SIMOD. Siendo que éste no es un modelo comercial, el autor se reserva los derechos de su creación. El modelo RIOS 4.0 fue igualmente objeto de evaluación y posteriormente descartado, debido a que únicamente trabaja en *estado permanente*. En lo que respecta al modelo QUAL2E, su empleo no es totalmente recomendable puesto que al ofrecer mayor cantidad de parámetros a simular, la excesiva cantidad y calidad de información que requiere lo convierten en un modelo poco aplicable en nuestro medio, dada la carencia de información existente (Mattos, 2004).

El modelo seleccionado fue Mike11 debido a que incorpora en la solución matemática de las ecuaciones diferenciales, mecanismos de alerta que anuncian la posible aparición de errores numéricos (errores de truncamiento y de difusión numérica); lo que lo convierte en un *método numérico exacto y estable*; A diferencia de otros modelos comerciales, Mike11 permite además personalizar modelos de Ecosistemas Acuáticos, es decir, que es posible construir un modelo personalizado que se adecue al grado de complejidad del ecosistema que se quiere modelar.

Finalmente, el hecho de que el Instituto de Ingeniería Sanitaria - COSAALT LTDA. haya adquirido este modelo para evaluar su *performance* a través de su aplicación en proyectos de investigación, posibilita que se cuente con la licencia de funcionamiento autorizada por el Danish Hydraulic Institute - DHI, y por ende con todos los manuales de utilización y sustentos teóricos, así como el programa completo sin ningún tipo de restricciones en lo que respecta a la modelación de calidad de agua en ríos y canales.

5.2.2. Formulación del modelo

Desarrollado por el Danish Hydraulic Institute - Water & Environment de Dinamarca, Mike11 es un producto de software para la simulación de caudales, calidad de agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, sistemas de riego, canales y otros cuerpos de agua.

Es una herramienta de modelización unidimensional y totalmente dinámica, para análisis detallados, diseño, gestión y funcionamiento de sistemas fluviales y canales sencillos o complejos.

Mike11 incluye múltiples editores, cada uno trabajando sobre diferentes tipos de datos. Los datos de estos editores se deben guardar en archivos de edición separados – utilizando las extensiones de archivo por defecto de Mike11 listadas en el Cuadro 2.1. Como consecuencia del sistema de archivos de edición separados, no existe conexión directa entre los diferentes editores si se abren de manera individual.

Tabla 5.1: Extensiones de los archivos que utiliza Mike 11

Editor de Mike11	Extensión Del archivo
Editor de simulación	*.SIM11
Editor de red	*.NWK11
Editor de sección transversal	*.XNS11
Editor de contorno	*.BND11
Archivo de parámetros HD	*.HD11
Archivo de parámetros AD	*.AD11
Archivo de parámetros WQ ECO Lab	*.ECOLAB11
Archivos de resultados	*.RES11

Fuente: Mike11-User Manual, Denmark, 2003.

5.2.2.1. Editor de simulación

La integración e intercambio de información entre cada uno de los editores de datos individuales se logra utilizando el *Editor de Simulación* de Mike11.

El editor de simulación sirve para dos propósitos:

(v) Contiene parámetros de control de simulación y de cálculo, y se utiliza para iniciar la simulación.

(vi) Proporciona una conexión entre la vista gráfica del editor de red y el resto de editores de Mike11.

5.2.2.2. Editor de red

El *Editor de Red* es la unidad central en la interface gráfica de usuario de Mike11. Desde la vista gráfica (el dibujo en planta) del editor de red, es posible mostrar información procedente del resto de los editores de datos en Mike11. El Editor de red consta de dos vistas, una vista tabular, donde se presentan los datos de la red fluvial en tablas, y una vista gráfica, donde se puede realizar la edición gráfica de la red fluvial así como acceder a datos de otros editores para su edición etc.

Las principales funciones del Editor de red son:

(i) Proporcionar utilidades de edición para la definición de datos de la red fluvial, tales como:

- Digitalización de puntos y conexión de ramificaciones del río.
- Definición de vertederos, de paso inferior y otras estructuras hidráulicas.
- Definición de cuencas que conectan el modelo fluvial a un modelo de lluvia-escorrentía.

(ii) Proporcionar una visión general de todos los datos incluidos en la simulación del modelo fluvial.

5.2.2.3. Editor de sección transversal

El *Editor de Sección Transversal* gestiona el almacenaje y despliegue de toda la información de las secciones transversales del modelo. Los datos de sección transversal del río incluyen dos grupos de datos, los datos no procesados y los procesados.

Los datos no procesados describen la forma física de una sección transversal utilizando coordenadas (x,z), obtenidas generalmente a partir de un levantamiento del lecho del río. Los datos procesados se calculan a partir de los datos sin procesar, y contienen los valores correspondientes para cada nivel de agua, área de sección transversal, anchura del flujo, radio hidráulico, etc. La tabla de datos procesados se aplica directamente en el módulo de cálculo.

5.2.2.4. Editor de contorno

El *Editor de Contorno o Editor de Condiciones de Borde*, es utilizado para especificar las condiciones de contorno o de borde para el modelo simulado. Es usado no sólo para condiciones de borde comunes como: niveles de agua y caudales de ríos tributarios, sino también para especificar influjos laterales a lo largo de la ribera del río, concentraciones de soluto en caudales de influjo, datos meteorológicos y condiciones de borde conocidas asociadas a estructuras simuladas.

5.2.2.5. Editores de parámetros

Los editores de parámetros contienen información de variables relacionadas con el tipo de cálculo seleccionado. Estos incluyen:

- El *Editor de parámetros Hidrodinámicos (HD)*, por ejemplo, contiene información sobre la resistencia de lecho como una variable importante para los cálculos hidráulicos;
- El *Editor de parámetros de Advección - Dispersión (AD)*, contiene la información de cada uno de los componentes contaminantes incluidos en la simulación;
- El *Editor de parámetros de Calidad del Agua – Laboratorio Ecológico (WQ ECO LAB)*, contiene información que configura el proceso de transformación de las variables que describen el estado ecológico del cuerpo de agua.

5.2.3. Representación conceptual

La característica principal del sistema de modelización de Mike11, es la estructura modular integrada con una variedad de módulos adicionales para cada fenómeno de simulación relacionado con el sistema fluvial, los mismos que se emplean para la solución de:

- Condiciones Hidrodinámicas
- Transporte Advectivo - Dispersivo
- Calidad del Agua

5.2.3.1. Módulo hidrodinámico (HD)

El *Módulo Hidrodinámico*, es el núcleo del sistema de modelización de Mike11 y forma la base para los demás módulos.

El módulo HD soluciona las ecuaciones integradas verticalmente para la conservación de continuidad y momento, es decir, las ecuaciones de Saint Venant, tanto para estado no permanente como para cuasi-permanente (Acápites: 2.4.1 Ecuaciones de Saint Venant). Con este propósito, el módulo es además utilizado para configurar datos suplementarios que se requieren para la simulación. La mayoría de los parámetros en su editor tiene valores por defecto y en la mayoría de los casos estos valores son suficientes para obtener resultados satisfactorios.

5.2.3.2. Módulo de advección - dispersión (AD)

El *Módulo de Advección-Dispersión* está basado en la ecuación unidimensional de conservación de masa de materia disuelta o suspendida, es decir, la ecuación de advección - dispersión. Este módulo requiere como información resultados en tiempo y en espacio del módulo HD. Dicha información será proporcionada en términos de descarga y nivel de agua, área de la sección transversal y radio hidráulico.

La Ecuación de Advección-Dispersión, es resuelta numéricamente utilizando un diseño implícito de diferencias finitas, el cual inicialmente es incondicionalmente estable y tiene despreciable dispersión numérica. Un término de corrección ha sido introducido para reducir el error de truncamiento de tercer orden. Este término de corrección hace posible simular el proceso de advección-dispersión de perfiles de concentración con excesivos frentes.

5.2.3.3. Módulo de calidad de agua - Laboratorio ecológico (WQ ECO Lab)

WQ ECO Lab es un laboratorio numérico para modelación ecológica. Es una herramienta genérica que permite personalizar modelos de Ecosistemas Acuáticos para describir calidad de agua, eutrofización, metales pesados y ecología. El módulo es normalmente utilizado para modelar la calidad de agua como parte de Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) de diferentes actividades antropogénicas.

La necesidad de personalizar la descripción de un ecosistema es enorme por la particularidad de los mismos. La principal cualidad de esta herramienta es la fácil modificación e implementación de formulaciones matemáticas de ecosistemas que pueden ser acopladas a las hidrodinámicas existentes. El usuario puede utilizar las plantillas predefinidas de ECO Lab o puede desarrollar los conceptos de su propio modelo […].

El módulo trata con los aspectos básicos del estado ecológico de un río […], es decir, depleción de oxígeno y niveles de amonio como resultado de cargas orgánicas o de nutrientes. En este sentido, regula el proceso de transformación químico-biológico de componentes en él; a la vez que es usado para simular el proceso de transporte simultáneo. […] Para tal fin, soluciona un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que describen las interacciones físicas, químicas y biológicas en el río. Los componentes más relevantes a simular deben ser definidos en el Editor de WQ ECO Lab.

5.3. REPRESENTACION FUNCIONAL

5.3.1. Ecuaciones de Saint Venant

La derivación de las ecuaciones de continuidad y momento para flujo *No Permanente*, tal como son empleadas por Mike11, es mostrada en el Manual de Referencia. Las ecuaciones resultantes son:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \qquad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \qquad (2.2)$$

Donde:

Q: Caudal

A: Área del flujo

q: Descarga lateral entrante

h: Nivel del agua

C: Coeficiente de resistencia de Chezy

R: Radio hidráulico

α: Coeficiente de distribución del momento

g: Gravedad

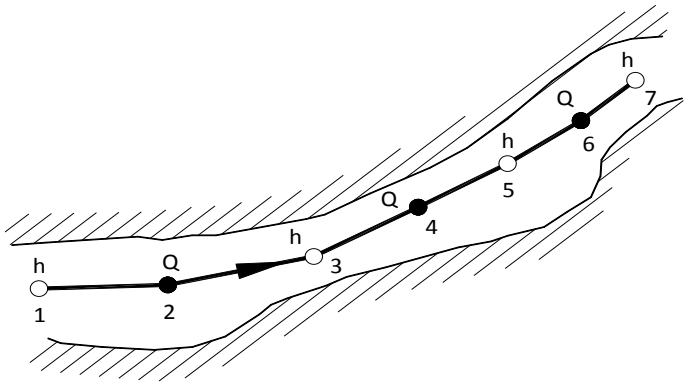
t: Tiempo

x: Distancia

La solución de las ecuaciones de continuidad y momento, está basada en un diseño implícito de diferencias finitas desarrollado por Abbot e Ionescu (1967). El diseño está estructurado para que sea independiente del tipo de descripción de onda especificado, es decir, el método de solución es el mismo para todos los niveles de aproximación de onda cinemática, difusiva o totalmente dinámica. Detalles del diseño son dados en el Manual de Referencia.

Una malla computacional conformada por puntos de *Q* (caudal) y *h* (nivel de agua) alternados es usada como se muestra en la figura 2.1. La malla computacional es automáticamente generada sobre la base de los requerimientos del usuario. Los puntos de *Q* son ubicados a medio tramo entre puntos de *h* vecinos y en estructuras; mientras que los puntos de *h* son localizados en las secciones transversales o entre intervalos equidistantes definidos por el usuario. El sentido de flujo es definido por convención como positivo, en dirección del incremento del número de nodos de la malla computacional.

Figura 5.2: Sector del canal con su mal computacional



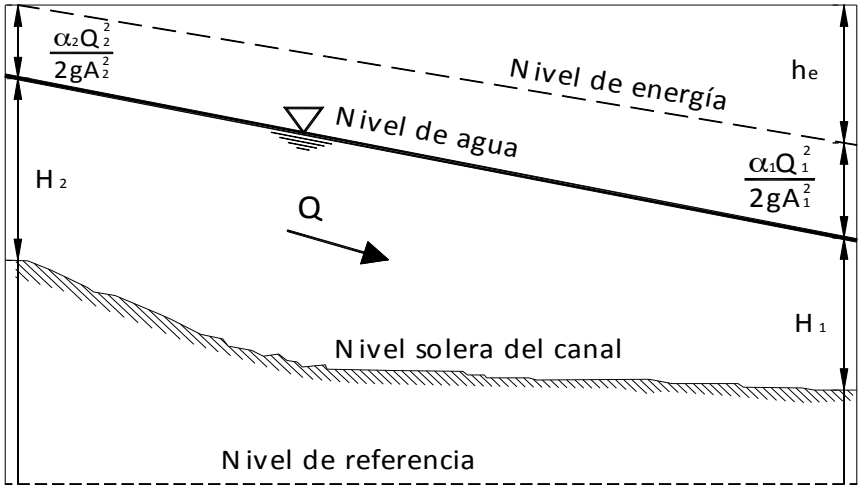
Fuente: Mike11 - User Manual, Denmark, 2003.

5.3.1.1. Ecuación de energía en estado permanente

En un número de casos, la concentración de un componente es el resultado de acciones o cargas que se reproducen por periodos y que no varían en un lapso mayor. Tal es el caso por ejemplo de un río que recibe cargas de polución que no varían sensiblemente día tras día (se mantienen constantes los factores ambientales), y que lo que interesa es hallar los niveles de oxígeno disuelto a lo largo del curso. Se puede decir entonces que el contaminante se distribuye en estado permanente o estable “steady state” […]. En estos casos, el cambio de concentración por unidad de tiempo se hace cero (condiciones del problema no varían con el tiempo: *d/dt=0*). Esto no quiere decir que no transcurra un lapso para que una masa de agua se traslade de un punto a otro sino, que los valores en un punto (de la concentración de un parámetro) no varían (Castagnino, 1978).

En Mike11, el estado permanente es calculado utilizando la ecuación de energía. El esquema de la configuración de la ecuación de energía es mostrado en la figura 2.2.

Figura 5.3: Volumen de control utilizado para determinar el perfil del nivel de agua



Fuente: Mike11 - User Manual, Denmark, 2003.

La ecuación de energía integrada en estado permanente es:

$$H_1 + \alpha_{m11}\beta_{\sup}\frac{\alpha_1 Q_1^{\,2}}{2gA_1^{\,2}} = H_2 + \alpha_{m11}\beta_{\sup}\frac{\alpha_2 Q_2^{\,2}}{2gA_2^{\,2}} + he \qquad (2.3)$$

Dónde:

Q:	Caudal
g:	Aceleración debida a la gravedad
H_1, H_2:	Niveles de agua en las secciones transversales
A_1, A_2:	Áreas de flujo
α_1, α_2:	Coeficientes de distribución de velocidad
he:	Perdida de energía potencial
α_{m11}:	Coeficiente de distribución de velocidad definido por el usuario
β_{sup}:	Factor de supresión

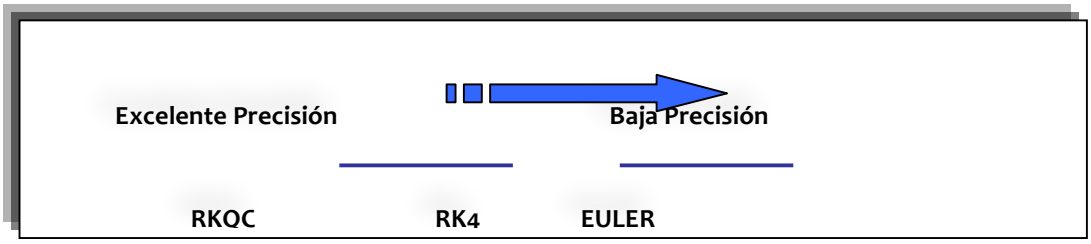
5.3.1.2. Método de integración numérica

Los módulos de Mike11 se fundamentan sobre el planteamiento de ecuaciones diferenciales acopladas, la resolución de estas ecuaciones tiene la intención de tomar en cuenta las posibles interacciones entre cada una de ellas. Para tal propósito se incluyeron en Mike11 tres métodos de integración numérica (rutinas):

- RKQC: Método de Runge-Kutta de 5to. Orden (Incluye control de calidad).
- RK4: Método de Runge-Kutta de 4to. Orden.
- EULER: Solución de Euler o Lineal.

La precisión (y el tiempo de computación) varían para cada uno de los métodos de integración:

Figura 5.4. Precisión de los métodos de integración numérica



Fuente: Elaboración propia y Mike11 – Reference Manual, 2003.

Esto significa que la mejor precisión será obtenida con la aplicación del método RKQC (rutina por defecto). Empero en muchos otros casos los mismos resultados son obtenidos con la utilización de RK4 y EULER lo que reduce a la vez el tiempo de cómputo de la máquina.

Si se llegasen a emplear estas últimas dos rutinas de integración se recomienda realizar una simulación adicional con la rutina RKQC y comparar los dos resultados (RK4/EULER versus RKQC) antes de hacer cualquier conclusión acerca del modelo estudiado.

En el caso de tratar con sistemas muy dinámicos de fuertes gradientes en uno o más de sus componentes, la integración del intervalo temporal podría no ser posible aun cuadro se utilice la rutina RKQC; En la mayoría de los casos, una solución podría ser la reducción del intervalo temporal, no obstante, los gradientes pueden llegar a ser tan fuertes, que no pueden ser resueltos con precisión. La característica de Control de Calidad del método RKQC, asegura que todos los componentes sean calculados con una precisión de 1 mg/l. Siendo que los otros dos métodos solo serán empleados si la integración es imposible con el método de 5to. Orden.

5.3.1.3. Resistencia del lecho

Mike11 HD permite la utilización de tres formas de describir la resistencia del lecho, éstas son a través de:

(i) "M" de Manning; en [$m^{1/3}/s$]; rango de aplicación: 10 - 100

(ii) "n" de Manning; recíproco de "M" de Manning; rango de aplicación: 0.010 – 0.100

(iii) Coeficiente de Chezy "C"

El coeficiente de resistencia de Manning "M", es equivalente al coeficiente de Strickler; su inverso, es el convencional "n" de Manning. El valor de "n" está generalmente en el rango de 0.01 (canales con superficie lisa) a 0.10 (canal con espesa vegetación). El coeficiente de Chezy "C", está relacionado con el "n" de Manning a través de:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = MR^{1/6} \qquad (2.9)$$

Dónde:

R: Radio Hidráulico

Valores para los coeficientes de resistencia: "C", "n" o "M", en lo posible deben ser determinados durante la calibración del modelo, o adoptados de otras calibraciones de modelos con similares características topográficas.

La diferencia de aplicar Chezy o Manning radica en la influencia del radio hidráulico R. La descripción empleada por Manning da una formulación dónde en general, el valor de "M" puede ser considerado independiente de la profundidad del agua, mientras que para la formulación de Chezy, el valor de "C" varía con la profundidad (como se muestra en la ecuación 2.9).

5.3.1.4. Ecuación de advección - dispersión

La ecuación unidimensional (vertical y lateralmente integrada) para la conservación de masa de una sustancia en solución, es decir, la ecuación unidimensional de advección-dispersión es:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2 q \qquad (2.10)$$

Dónde:

C: Concentración

A: Área de la Sección Transversal

D: Coeficiente de dispersión

K: Coeficiente de decaimiento lineal

C2: Concentración de la descarga lateral

q: Caudal de ingreso lateral

x: Coordenada espacial (longitudinal)

t: Coordenada temporal

La ecuación refleja dos mecanismos de transporte:

(i) Transporte Advectivo (o convectivo) con el flujo promedio;

(ii) Trasporte Dispersivo debido a la concentración de gradientes

Las principales asunciones que fundamentan la ecuación de advección-dispersión son:

- La sustancia considerada es completamente mezclada de forma instantánea en la sección transversal.
- La sustancia es conservativa o sujeta a reacción de primer orden (decaimiento lineal).
- Se aplica la Ley de Difusión de Fick, es decir, el transporte dispersivo es proporcional a la concentración del gradiente.

5.3.1.5. Coeficiente de dispersión

La dispersión longitudinal es causada por la acción combinada de una velocidad no uniforme de distribución y difusión. La propagación longitudinal bajo la influencia de la velocidad no uniforme de distribución es más grande que aquella que sería lograda por la difusión molecular y turbulenta actuando juntas. El transporte dispersivo obedece la Ley de Difusión de Fick.

El coeficiente de dispersión es determinado como una función de la velocidad promedio del flujo, es decir:

$$D_j^{n+1} = a\left| \frac{Q^{n+1/2}}{A^{n+1/2}} \right|_j^b \qquad (2.11)$$

Dónde:

a: Factor de Dispersión

b: Exponente de Dispersión

n: Nivel Temporal

j: Nodo de la Malla Computacional

En ríos el coeficiente de dispersión está en el orden de 5 – 10 [m^2/s] incrementándose hasta entre 30 – 100 [m^2/s], siempre y cuando procesos bidimensionales (corrientes secundarias, turbulencia inducida por el viento) lleguen a ser más dominantes, por ejemplo, el caso de estuarios.

5.3.1.6. Degradación de materia orgánica en fase acuosa

El decaimiento de la DBO es calculado a través de la expresión:

$$Degradación = k_1 \cdot \theta^{^oT-20} \cdot \frac{OD^2}{Ks + OD^2} \qquad (2.12)$$

Dónde:

OD: Concentración de oxígeno disuelto

θ: Coeficiente de temperatura de Arrhenius

ºT: Temperatura ambiente

k1: Constante o tasa de desoxigenación de 1er. Orden a 20 ºC

ks: Constante media de saturación (Michealis-Menten)

Ésta ecuación se aplica tanto para materia orgánica disuelta como para suspendida. Sin embargo, diferentes valores de k_1 son utilizados.

5.3.1.7. Procesos que afectan la concentración del oxígeno disuelto

Los factores que afectan la concentración de oxígeno son:

- Degradación de la DBO (Degradación de Materia Orgánica en Fase Acuosa)
- Reaireación (intercambio gaseoso con la atmósfera)
- Producción y respiración fotosintética

El coeficiente de reaireación puede ser calculado a través de algunas expresiones Standard aplicables para diferentes tipos de ríos; o calculado por medio de expresiones propias definidas por el usuario. Los factores que afectan más a la constante de reaireación son la velocidad, la pendiente del río, la profundidad del agua y la temperatura. Todas las expresiones Standard aplicables tienen la misma formulación matemática, sólo difieren los parámetros:

$$k_2 = a \cdot u^b \cdot h^c \cdot I^d \qquad (2.11)$$

Dónde:

u: Velocidad de flujo

h: Profundidad del agua

I: Pendiente del río

k2: Constante o tasa de reaireación a 20 ºC

a,b,c,d: Parámetros

Tabla 5.2: Expresiones más conocidas para determinar k2

Expresión Estándar	Formulación Matemática	Aplicación
Thyssen	$k_2 = 27185 \cdot u^{0.931} \cdot h^{-0.692} \cdot I^{1.09}$	Recomendada para pequeñas corrientes
O'Connor - Dubbins	$k_2 = 3.9 \cdot u^{0.5} \cdot h^{-1.5}$	Para ríos ordinarios
Churchill	$k_2 = 5.233 \cdot u \cdot h^{-1.67}$	Para ríos con flujo de alta velocidad

Fuente: Mike11 - User Manual, Denmark, 2003.

La temperatura es incluida en una función de temperatura de Arrhenius propia de la reaireación, por lo cual el coeficiente θ particular de este proceso debe ser especificado. Al igual que los parámetros de producción y respiración fotosintética propios del sistema fluvial estudiado.

5.3.1.8. Coeficiente de Arrhenius

El coeficiente θ, especifica la dependencia entre la tasa de un proceso (degradación, oxigenación, etc.) y la temperatura. Esto se logra multiplicando el término involucrado por el factor:

$$\theta^{(^{o}T - ^{o}To)} \qquad (2.13)$$

Donde:

ºT: Temperatura ambiente del proceso

ºTo: Temperatura de referencia, 20 ºC

θ: Constante empírica única para cada reacción

En Mike11 WQ ECO Lab, todas las dependencias de temperatura son descritas de esta manera.

5.4. DIAGNÓSTICO DEL RÍO GUADALQUIVIR CON FINES DE MODELACIÓN MATEMÁTICA

5.4.1. Introducción

Aproximadamente el 65% de los efluentes sanitarios generados en la ciudad de Tarija son conducidos mediante la red de alcantarillado hacia la planta de tratamiento de San Luis, cuya descarga es vertida a la Quebrada Torrecillas que luego de un recorrido de 3,8 Km confluye en el Río Guadalquivir. Adicionalmente existen 11 sectores conformados por nuevas urbanizaciones, que por limitaciones topográficas descargan sus efluentes previo tratamiento primario, directamente o mediante quebradas al Río Guadalquivir. El tratamiento primario consiste solamente en hacer pasar el agua residual a través de cámaras sépticas y luego descargan a quebradas afluentes del río Guadalquivir.

Al menos la red de alcantarillado tiene una buena cobertura en la zona urbana de Tarija, y allí descargan las aguas residuales tanto domiciliares como comerciales e industriales. Solamente una de las 5 industrias más importantes de Tarija cuenta con un sistema de depuración de sus aguas residuales.

Actualmente, la apreciación del problema por parte de las autoridades relacionadas con programas de control de polución de aguas, se limita a la determinación de aspectos físicos, químicos, biológicos y reunión de datos sobre parámetros convencionales, lo que les permite realizar un estudio del grado de contaminación por evaluación de estos datos con relación a límites generales (Castagnino, 1978). Esta información contrastada con la identificación y caracterización de fuentes de polución en esos parámetros, constituye lo que hoy por hoy es una incompleta y desalentadora gestión y conservación de la calidad del agua en este cauce.

La determinación del estado ecológico de estas aguas receptoras de contaminantes es extremadamente compleja al ser la extensión espacio-temporal del medio estudiado muy grande, simultáneamente, esta situación se complica aún más debido a la imposibilidad de poder estimar las concentraciones actuales y futuras en cualquier punto del cauce receptor, labor que específicamente dificulta el análisis de medidas eficientes y efectivas, tendientes a mejorar la calidad del agua del Río Guadalquivir.

En general, la falta en la actualidad de *Modelo Rigurosamente Calibrado y Verificado*, que simule el comportamiento de los elementos no conservativos del Río Guadalquivir, hace imposible que se integren claramente todos los componentes del sistema, es decir, Río, Alcantarillado y Planta de Tratamiento.

5.4.2. Configuración de la representación básica del sistema

La segmentación ambiental del Río Guadalquivir fue definida según las mediciones de campo encargadas a COSAALT LTDA por el Consorcio en Octubre de 2012 (Época de Estiaje). Ésta caracterización física, hidráulica y químico biológica del Río, divide su cauce en 9 Tramos y 10 Puntos de Control no equidistantes, establecidos a lo largo de una extensión de 37 Km, desde el inicio de la población en San Lorenzo (Prog. 0+000), hasta aguas abajo del límite de la ciudad de Tarija (Prog. 36+415).

El sistema fluvial está compuesto por una corriente principal, cuatro tributarios importantes, incrementos menores de caudal (descargas domésticas e industriales), y descargas de dos plantas de tratamiento ubicadas en San Lorenzo y la ciudad de Tarija, que definen las características hidrodinámicas y de calidad del agua del río. Ver Figura 3.1 – Caracterización del Sistema Fluvial.

Debido a la reducida capacidad de dilución del río durante la *época de estiaje*, este periodo demarca la condición ambiental más desfavorable y crítica de su ciclo estacional; razón por la cual el presente estudio se centra en el análisis de los caudales promedios más bajos del Río Guadalquivir.

5.4.3. Simplificación y esquematización gráfica del sistema fluvial

En los últimos años se han realizado campañas de muestreo tomando en cuenta *Puntos de Control o Monitoreo* ya establecidos por COSAALT LTDA. Manteniendo en su mayoría éste criterio de segmentación, se definieron en total diez *Puntos o Nodos Principales* de monitoreo en el intervalo de análisis.

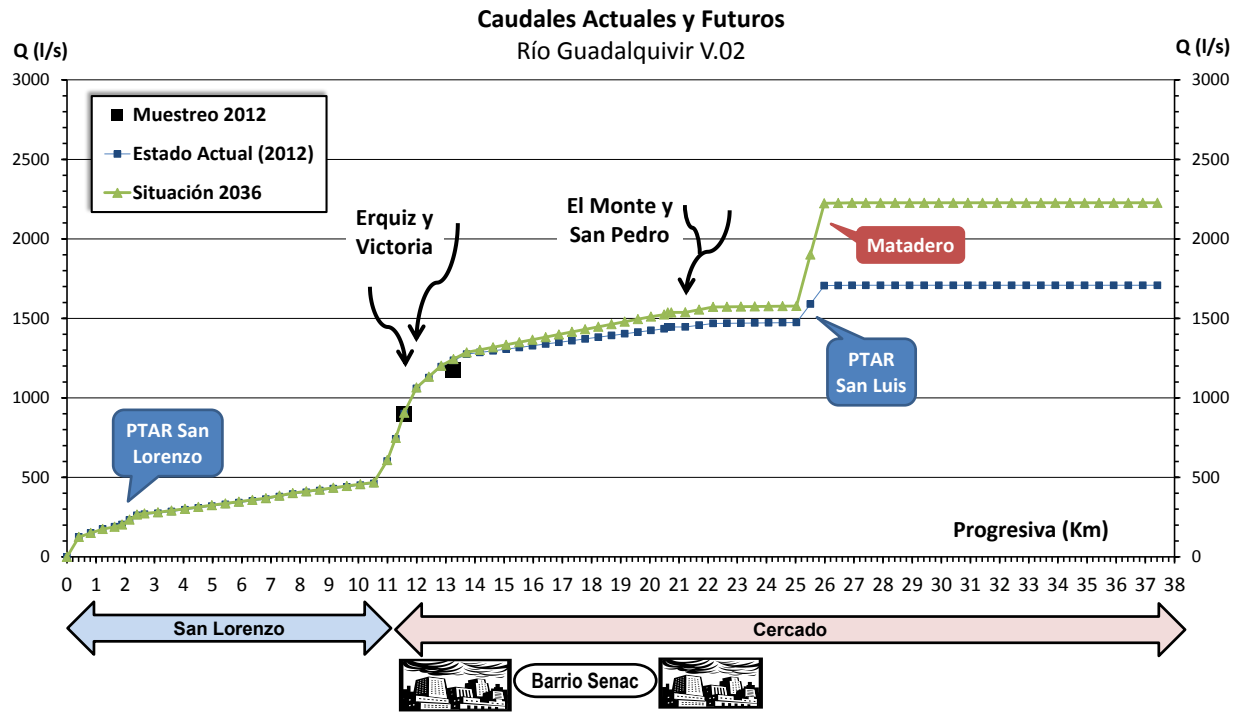
Tabla 5.3: Caracterización del sistema fluvial – Puntos muestreados en el río Guadalquivir

Pto.	Ubicación	Descripción	Coordenadas		Prog.	Elev.
			E	N	m	msnm
G-1	San Lorenzo	Pto 1 Guadalquivir San Lorenzo, Inicio de la población	319250	7632046	0+00	2002
G-2	San Lorenzo	Pto 2 Guadalquivir, antes de la descarga de PTAR	319351	7630447	1+637	1987
G-3	San Lorenzo	Pto 3 Guadalquivir San Lorenzo, límite de área de influencia	319549	7629527	2+661	1979
G-4	Cercado	Pto 1 Tomatitas	317717	7621671	10+992	1923
G-5	Cercado	Pto 2 Guadalquivir, después de confluencia río Vitoria y Erquis	317497	7621128	11+572	1925
G-6	Cercado	Pto 3 O.T. Las Tipas	317274	7619517	13+265	1920
G-7	Cercado	Pto 4 Antes de la descarga El Monte	322003	7615500	20+492	1843
G-8	Cercado	Pto 5 Después de la descarga El Monte	322189	7615322	20+739	1842
G-9	Cercado	Pto 6 Antes de la descarga Lagunas	324922	7611968	25+315	1809
G-10	Cercado	Pto 7 Final ciudad Tarija	325518	7611392	26+415	1812

Fuente: Elaboración propia

Los puntos de control a los que se hacen referencia, dividen el cauce del río en tramos predefinidos, conformando de esta manera una segunda aproximación de lo que es la segmentación ambiental del cauce receptor. No obstante, fue necesario subdividir estos tramos agregando *Nodos Adicionales* que representan a los sitios de descargas o extracciones significativas del caudal transportado (Ver Ilustración siguiente – Caracterización del Sistema Fluvial). Finalmente, cada uno de los Tramos fue sub-dividido en elementos de 500 metros de longitud para conformar la malla o grilla que estructura el modelo matemático del Río.

Figura 5.5: Caracterización del sistema fluvial



Fuente: Elaboración propia

5.4.3.1. Características geométricas y físicas

El Sub-Módulo Editor de Red de Mike11, fue aprovechado para generar una descripción numérica que represente el diseño geométrico del río basándose en una latitud representativa del sitio de proyecto y las coordenadas de localización de los nodos que definen el eje del mismo. De la misma manera con la ayuda del Sub-Módulo Editor de Sección Transversal de Mike11, se incluyeron los datos de área transversal y progresiva de los nodos principales y las respectivas elevaciones geodésicas de sus soleras.

Como archivo de salida, el modelo proporciona una rejilla de elementos finitos del río, representados por una serie de nodos adicionales y elementos. Los nodos representan la ubicación de los puntos de monitoreo y poseen información acerca de la sección transversal, altura geodésica y la ubicación de las condiciones de frontera (posteriormente definidas, tales como: niveles de agua en la sección, y condiciones de borde aguas abajo y con los ríos tributarios). Por su parte los elementos incluyen información acerca del flujo y masa transportada a lo largo de todo el cauce.

5.4.3.2. Sistema de coordenadas

Las coordenadas georeferenciadas tipo UTM - WGS84 (Universal Transverse Mercator) de localización de los nodos que conforman el diseño geométrico del río, fueron tomadas con un GPS (Global Posiotioning System). Luego estos puntos fueron ubicados en los planos de la ciudad de Tarija para contrastar la información obtenida.

Finalmente, toda esta información geométrica sirvió para conformar la malla de elementos finitos del modelo (malla computacional); Se seleccionó una longitud de 500 m. para cada elemento (distancia comprendida entre *nodo* $_i$ y *nodo* $_{i+1}$) de la rejilla.

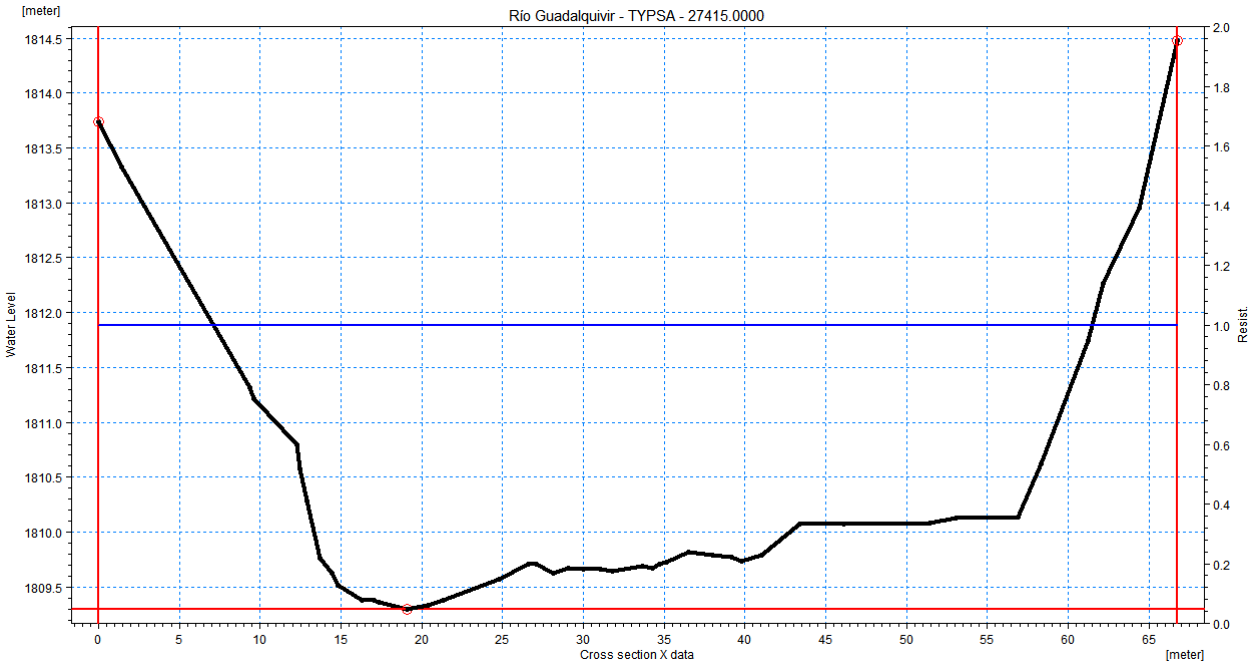
5.4.3.3. Pendiente

Siendo que la actual pendiente de la *superficie del agua* es significativamente igual a la pendiente del *terreno*, las pendientes introducidas a Mike 11 fueron computadas de forma directa de las alturas de los puntos de control registradas en la campaña de mediciones.

5.4.3.4. Sección transversal

Las secciones transversales (originales) proporcionadas por COSAALT LTDA., fueron empleadas para simular la situación actual y futura del sistema.

Figura 5.6: Sección Transversal del punto de control G10 - prog. 27+415



Fuente: Elaboración propia

La forma exacta de la sección transversal del río no es primordial, puesto que presenta constante variabilidad en su sección real debido a la presencia de meandros a lo largo de su curso.

5.4.3.5. Coeficiente de rugosidad de manning “n”

La sección transversal del Río Guadalquivir en su recorrido presenta la condición de canal natural con meandros y barreras naturales que de alguna manera disipan la energía cinética del flujo de agua y por lo tanto deben ser simuladas. El valor de rugosidad del canal juega un rol fundamental al momento de tomar en cuenta los efectos producidos por estos fenómenos hidráulicos y simular mejor el tiempo de tránsito del agua en el río.

En realidad, el valor de *n* es muy variable y depende de una cantidad de factores. Al seleccionar un valor adecuado de *n* para diferentes condiciones de diseño, un conocimiento básico de estos factores debe ser considerado de gran utilidad. Los factores que ejercen la más grande influencia sobre el coeficiente de rugosidad […] son: rugosidad de la superficie, vegetación, irregularidad del canal, alineamiento del canal, depósitos y socavaciones, obstrucción, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, material suspendido y transporte de fondo. […]. Debería hacerse notar que estos factores son en cierto modo

interdependientes, de aquí que la discusión acerca de un factor puede ser repetida en conexión con otra (Ven Te Chow, 1982).

La mayoría de los modelos matemáticos para ríos y canales que implican la estimación indirecta de la descarga, requieren una evaluación de la rugosidad característica del canal. Debido a la falta de un procedimiento cuantitativo satisfactorio, esta evaluación viene a ser necesariamente un arte. Según Jr. H.H. Barnes (2001), la habilidad para evaluar los coeficientes de rugosidad debe desarrollarse a través de la experiencia, es decir, familiarizándose con la apariencia de algún canal cuyo coeficiente de rugosidad es perfectamente conocido.

Para el caso particular, de forma inicial fueron adoptados valores bibliográficos, los mismos que posteriormente fueron alterados y evaluados constantemente durante la fase de calibración, hasta obtener una modelación satisfactoria.

El valor *inicial* (referencial) adoptado fue:

- Trayecto No Canalizado: n = 0.03, correspondiente a canal con lecho de canto rodado en tamaños mediano a grande (Ven Te Chow, 1982).

5.4.3.6. Características hidrodinámicas

El Río Guadalquivir es un sistema fluvial dinámico, variable en su morfología, flujo y características hidráulicas. Todos estos factores influyen en el balance de energía térmico, y por ende en el destino y transporte de las concentraciones de los elementos no conservativos a lo largo del eje del flujo.

Un requerimiento esencial para la modelación de la temperatura y la calidad del agua de este sistema fluvial, es una acertada representación de sus propiedades hidrodinámicas, estos son: el caudal, la velocidad, el tipo de flujo, el gradiente hidráulico, etc. De ahí que una simulación hidráulica en *estado permanente*, no puede ser considerada adecuada para el grado de complejidad encontrado en este sistema.

5.4.3.7. Características de calidad del agua

La modelización de procesos de calidad de agua requiere la especificación de múltiples constantes, coeficientes y tasas para definir los procesos e interrelaciones del sistema. A continuación se especifican los valores típicos y valores seleccionados de los parámetros utilizados en este módulo.

5.4.3.8. Radiación solar

En Mike11, la temperatura es computada como el resultado de la diferencia entre la energía solar asimilada (sólo durante las horas diurnas) y la energía reflejada por el cuerpo de agua debido a la irradiación de calor (durante noche y día).

Los datos de *radiación solar máxima diaria* en [kJ/m^2] requeridos para el modelo, fueron calculados de la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Tarija. Para calcular su valor fue necesario integrar la irradancia en un período de tiempo (sólo durante las horas diurnas), de un día *n* del año.

En lo que respecta a la *radiación solar reflejada* por el cuerpo de agua, no se tienen registros de su valor en ninguno de los centros meteorológicos de la ciudad de Tarija, motivo por el cual, se tuvo que estimarlo indirectamente a través del valor del *albedo*, que se expresa en la ecuación (3.2).

$$R_{ABS} = R_G \cdot (1 - A) \quad (3.2)$$

Donde:

R_{ABS}: Radiación absorbida por el cuerpo de agua

R_G: Radiación Global

A: Albedo

La capacidad general de las diferentes superficies de la Tierra de reflejar energía solar a la atmósfera se conoce como albedo. El *albedo* se define como la fracción (o porcentaje) de la energía solar incidente que refleja una superficie al espacio. Las diferentes superficies (agua, nieve, arena, etc.) tienen diferentes valores albedo. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras, y las brillantes más que las mates.

El albedo de agua en promedio es menor que el del suelo; esto se debe a que los rayos solares penetran en el agua más que en la tierra. En el albedo del agua influye el grado de turbidez; en el agua sucia el albedo disminuye con respecto al agua limpia (Himat, 1993).

Sobre las referencias que se tienen del valor del albedo de otras superficies, se consideró que al contener las aguas del Río Guadalquivir en su gran mayoría aguas residuales con bastante turbiedad y sólidos suspendidos y disueltos, posee color ligeramente oscuro, lo que condiciona su normal irradancia y ocasiona que aproximadamente el 90% de la radiación global sea absorbida; En tal sentido, el valor máximo del albedo considerado es del 10% ($A \leq 0,1$).

5.4.3.9. Coeficiente "θ" de corrección de la temperatura

Las constantes empíricas que influencian los procesos son generalmente medidas en condiciones estándar de temperatura (a 20 ºC), éstas constantes se ajustan a la temperatura ambiente del agua, utilizando la relación empírica de Van't Hoff-Arrhenius.

Brown y Barnwell (1987), determinaron los coeficientes empíricos de corrección de la temperatura para la degradación de la materia orgánica y la reaireación. A continuación se muestran rangos de valores encontrados y sus valores típicos asumidos en modelos de calidad de agua.

Tabla 5.4: Coeficientes empíricos de corrección para distintos procesos.

Proceso	Símbolo	Constante Empírica de Arrhenius - θ	
		Rango	Valor Típico
Degradación de la DBO	θ_1	1.03 – 1.075	1.047
Degradación de la DBO	θ_1 (*)	1.02 – 1.09	1.07
Reaireación	θ_2	1.008 – 1.047	1.024

Fuente: Brown and Barnwell, 1987. (*)Mike11–User Manual, 2003.

5.4.3.10. Coeficiente de dispersión

Según el manual del usuario de Mike11 (2003), el coeficiente de dispersión está descrito en función de la velocidad del flujo promedio (Ver acápite: 2.4.7.1 Coeficiente de Dispersión). Simplificando la fórmula empleada para expresar este fenómeno tenemos:

$$D = a \cdot V^{b} \qquad (3.3)$$

Donde:

a: Factor de Dispersión

b: Exponente de Dispersión

D: Coeficiente de Dispersión

Investigaciones anteriores demuestran que para el caso de ríos, el *fenómeno de dispersión* es insignificante en balance con el *transporte advectivo*; esta constatación empírica y teórica permite hacer una simplificación y trabajar sobre el supuesto de que el exponente de dispersión es igual a cero (*b=0*), esto significa, que el coeficiente de dispersión *D* se hace constante e igual en su valor al factor de dispersión *a*. Para el caso particular del Río Guadalquivir se adoptó un valor igual a 60 m^2/s. Valor que además se encuentra dentro de los rangos recomendados en el manual de referencia de Mike11 y fue empleado con anterioridad en otros modelos de calidad de agua en Bolivia.

5.4.3.11. Tasa de desoxigenación – "k_1"

Debido a la insuficiencia de datos disponibles, tanto en cantidad como en calidad, para determinar la constante cinética de desoxigenación k_1 del modelo, se llevó a cabo una valoración a priori, usando los valores de literatura (teóricos y experimentales), que corresponden con la situación específica del sistema en estudio.

La estimación a priori de la constante cinética de primer orden para el consumo de oxígeno por acción metabólica carbonácea k_1, se la realiza a partir de la tendencia expresada por Hydroscience, 1971 a 20 °C (Chapra, 1997):

$$k_1 = 0.3 \cdot \left(\frac{H}{8}\right)^{-0.434} \qquad \textit{para } 0<H<8 \qquad (3.4)$$

$$k_1 = 0.3 \qquad \textit{para } H>8 \qquad (3.5)$$

Donde:

H: Profundidad del agua en pies.

En la mayoría de los ríos naturales, la tasa cinética de reacción del curso de agua es generalmente menor que la de una muestra de agua residual no diluida y habitualmente su valor va decreciendo con la distancia aguas abajo (Ver Tabla 3.2); esta reducción indica la progresiva resistencia de los productos finales más estables (refractarios) a la oxidación bioquímica (USEPA, 1997).

Tabla 5.5: Constantes cinéticas de degradación de la materia orgánica

Coeficiente k_1	Valor Típico	Unidad	Referencia
Agua residual sin tratamiento	0.35 (0.20 – 0.50)	1/d	Chapra (1997)
Efluente tratado	0.25	1/d	M. Deas y Orlob (1999)
Efluente de Tratamiento Primario	0.20 (0.10 – 0.30)	1/d	Chapra (1997)
Río Guadalquivir	0.241	1/d	Silvia Mattos (2004)
Ríos comunes	0.1 – 1.5	1/d	Mike11 (2003)
Ríos comunes	0.1 – 2.0	1/d	USEPA (1997)

Fuente: Elaboración propia

En un cauce de río al hablar de DBO, tenemos que referirnos tanto a la DBO insoluble como a la materia orgánica soluble; esto implica que podría existir un componente de sedimentación en la columna de agua que podría ejercer una demanda bioquímica de oxígeno en el caso de darse el fenómeno de sedimentación. Para el sistema fluvial en estudio, la tasa de sedimentación fue considerada despreciable, debido a las características montañosas del cauce, es decir, pendientes elevadas u tipo de solera del canal, que dan lugar a velocidades altas y constante turbulencia, lo que incrementa su poder de arrastre pese a los bajos caudales registrados durante el periodo estacional analizado.

5.4.3.12. Tasa de reaireación – "k_2"

La reaireación es un proceso de intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el cuerpo de agua en contacto con esta. Generalmente, la transferencia es de la atmósfera al cuerpo de agua porque en la mayoría de los cauces naturales la concentración de oxígeno está por debajo de la de saturación. El proceso de fotosíntesis puede llegar a producir una sobresaturación de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, lo que ocasionaría una transferencia de oxígeno hacia la atmósfera (Bowie, et. al. 1985). La polución, partículas suspendidas, viento, estructuras hidráulicas y la temperatura del agua influencian el proceso de reaireación.

La estimación de la constante cinética de primer orden para la transferencia de oxígeno desde el aire k_2, se realiza a partir de varios modelos a 20°C. En el campo de la modelización, las fórmulas planteadas para el proceso de reaireación son generalmente basadas en relaciones teóricas y empíricas, las mismas que están en función de la velocidad, profundidad y pendiente del curso de agua (Ver Cuadro siguiente – Expresiones más conocidas para determinar k_2).

Siguiendo este principio, se verificó que las formulaciones hechas por: O'Connor-Dubbins y Churchill eran las que mejor describían el comportamiento de la tasa de reaireación. A pesar de esta afirmación, debido a la distinta naturaleza de todos los modelos en general, estos datos fueron validados o ajustados durante el proceso de calibración, hasta obtener resultados satisfactorios bajo el criterio de que el valor empírico de la constante de desoxigenación k_2, debe encontrarse dentro de un rango definido por estudios previos. Los valores empíricos y experimentales encontrados se dan a conocer en la siguiente Tabla:

Tabla 5.6: Constantes cinéticas de reaireación de 1er. orden para distintos ríos a 20 ºC

Coeficiente k_2	Valor Típico	Unidad	Referencia
Ríos lentos y profundos	0.1 – 0.4	1/d	Jessica Oyarzún (2004)
Ríos veloces profundos	1.5 – 4.0	1/d	Jessica Oyarzún (2004)
Ríos veloces poco profundos	4.0 – 10.0	1/d	Jessica Oyarzún (2004)
Ríos comunes	0 – 100	1/d	USEPA (1997)

Fuente: Elaboración propia

5.4.3.13. Concentración media de saturación del oxígeno – "k_m"

La concentración media de saturación del oxígeno indica la afinidad que tiene un microorganismo por el sustrato que limita el crecimiento. En Mike11, se aplicó esta teoría para describir la influencia del oxígeno en el decaimiento de la DBO. Para Mike11, la concentración media de saturación del oxígeno según la expresión de Michaelis - Menten (k_m), se expresa en unidades de [$gr.O_2/m^3$] y prácticamente describe como el decaimiento de la DBO decrece a bajas concentraciones de oxígeno, debido al abatimiento de la degradación bacteriana de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas.

En vista de la poca o casi nula información referente al valor típico de la constante k_m, se optó por contactarse vía e-mail, con los distribuidores del software en Dinamarca, DHI – Water & Environment, quienes recomendaron el empleo de 2.0 $gr.O_2/m^3$ como valor típico para ríos comunes entre un rango de

0 a 20 gr.O_2/m^3. En condiciones de sobresaturación de OD, k_m llega a ser despreciable y el término limitante de la tasa tiende a su máximo valor ($\sim^{OD}/_{OD} = 1$). Cuando la concentración de OD es escasa (bajos niveles de oxígeno), el nivel de consumo es principalmente limitado por la habilidad de asimilar o encontrar el OD, en otras palabras, la concentración de OD llega a ser insignificante y el término limitante se aproxima a OD/k_m, una función lineal del OD; es así que en éstas condiciones, valores de k_m próximos a 20 gr.O_2/m^3, producen una reducción en la tasa de reacción del proceso, y viceversa. En el caso práctico de modelos matemáticos para plantas de tratamiento de lodos activados (proceso anóxico), el valor de k_m recomendado por la literatura es de 20 gr.O_2/m^3.

Por consiguiente, el valor consultado de k_m=*2.0 gr.O_2/m^3*, fue entonces empleado y se lo mantuvo constante en todas las corridas del modelo.

5.4.3.14. Condiciones iniciales y de contorno del sistema

En la modelación matemática son requisitos imprescindibles contar con una o más condiciones de *borde o de contorno*, y condiciones *iniciales* del sistema, éstas pueden ser físicas, geométricas, hidrodinámicas, de calidad, etc., y nos permiten aislar el dominio del fenómeno modelado, del entorno real del mundo.

Para el modelo hidrodinámico, las condiciones iniciales y de contorno del sistema, fueron representadas por los caudales de flujo que ingresan y dejan el entorno modelado, es decir, ríos tributarios, cargas domésticas e industriales, extracción de caudales para abastecimiento y riego, etc.; en lo que respecta a las condiciones de calidad de agua, éstas fueron simbolizadas por los valores de temperatura y las concentraciones de OD y DBO medidos en el dominio real, en otras palabras, fueron extraídos de la campaña de medición realizada por COSAALT LTDA., a solicitud del Consorcio en Octubre de 2012.

5.4.3.15. Condiciones iniciales

Hidrodinámicas

La modelación del transporte de contaminantes (advección-dispersión) es únicamente posible si se especifican primero las condiciones de borde hidrodinámicas del sistema. Para establecer las condiciones iniciales del Río Guadalquivir en el modelo hidrodinámico, previamente se determinaron los tirantes del curso de agua en cada uno de los nodos señalados.

Recordemos que si bien nuestro propósito es simular las condiciones hidrodinámicas y de calidad del Río Guadalquivir, esto es posible gracias a que en realidad representamos matemáticamente el comportamiento de los valores de las muestras compuestas que se obtuvieron en campo, en otras palabras, específicamente estamos simulando la conducta de las cargas másicas promedio que circulan en el sistema, producto de aportes de determinadas fuentes puntuales. Por lo tanto, esto nos lleva a establecer condiciones iniciales que sean representativas del promedio durante el tiempo de muestreo, que es de aproximadamente 12 horas.

Para tal efecto, se hizo correr el modelo en estado *no permanente*, por un período mayor al tiempo de tránsito del agua, a lo largo del intervalo analizado. Por tanto, se hizo correr el modelo hidrodinámico por un tiempo de 1 a 2 días, que nos permitió alcanzar un "*estado permanente de las condiciones hidrodinámicas"* del río. Cabe recalcar, que este denominado "estado permanente", continúa siendo aún simulado a través de las ecuaciones de Saint Venant (bajo condiciones de flujo no permanentes), pero es logrado gracias a que no existe variación en los caudales que ingresan y salen del sistema (condiciones de borde *constantes*).

Se debe notar que durante un lapso inicial (aprox. 8 horas), las condiciones iniciales del modelo no se igualan a las observadas en campo, por tal motivo, para que los subsiguientes análisis no fueran influenciados por las condiciones iniciales, los resultados de los primeros dos días simulados fueron descartados.

Calidad de Agua

En lo que respecta a las condiciones iniciales de calidad de agua, en lugar de especificarlas como en el anterior caso, se optó por aplicar un conjunto de condiciones de contorno y permitir que el sistema alcance un equilibrio a lo largo de un cierto periodo de simulación. Debido a que las variaciones diurnas y procesos acuáticos específicos requieren un periodo mayor de simulación, para este análisis, el modelo de calidad de agua fue corrido con un juego de condiciones de borde constante, y por un lapso mayor a dos días.

5.4.3.16. Condiciones de borde

Hidrodinámicas

El río Guadalquivir recibe a lo largo de su paso por la ciudad de Tarija, aportes de flujo provenientes de: ríos tributarios (Erquiz, Victoria, San Pedro y El Monte), descargas domésticas e industriales (en cada uno de los tramos ya señalados) y precipitaciones pluviales (en época de lluvia).

Con el objeto de representar la Situación Actual del Alcantarillado Sanitario de la ciudad de Tarija, se identificaron 12 zonas de aporte que generan aguas residuales domiciliarias e industriales. La cantidad de habitantes por zona y sus respectivos caudales de aguas residuales se muestran a continuación.

Tabla 5.7: Condiciones de borde: hidrodinámicas (Octubre 2012) – Caudal de aguas residuales por zona de aporte

Distrito	Población 2012 (hab)	Caudal 2012 (l/s)	Población 2036 (hab)	Caudal 2036 (l/s)
001	4,855	11.5	8,923	18.4
002	8,298	19.5	9,218	19.0
003	7,849	18.5	12,306	25.3
004	8,170	19.2	12,726	26.1
005	10,064	23.6	15,132	31.0
006	19,860	46.4	30,107	61.3
007	22,587	52.8	42,647	86.7
008	33,140	77.4	56,487	114.8
009	32,942	76.9	68,669	139.4
010	26,636	62.2	71,010	144.2
011	14,743	34.5	47,476	96.5
012	5,331	12.6	6,212	12.9
013	26,996	63.1	73,032	148.3
TOTALES	**221,471**	**518.2**	**453,945**	**924.1**

Fuente: Elaboración propia

El Caudal Base del Río fue deducido de la información relevada por COSAALT LTDA., descontando los caudales de aguas residuales Domiciliarios e Industriales.

Para la simulación del sistema, los cuatro ríos tributarios fueron incluidos explícitamente, el resto de los flujos tanto de ingreso como de salida, fueron agrupados en incrementos y decrementos de caudal, lo que permitió distribuirlos proporcionalmente a su balance de caudal en cada tramo correspondiente. Todas las condiciones de borde fueron derivadas de un balance hídrico en cada sub-tramo, descontando (si es el caso), la descarga del río tributario que fue cuantificada en la campaña de monitoreo. Los caudales asignados a los tramos y ríos tributarios se muestran a continuación.

Tabla 5.8: Condiciones de borde: hidrodinámicas (situación actual 2012) – Tramos entre puntos muestreados en el río Guadalquivir

Nº	Tramos	Descargas Consideradas	Progresiva Descarga		Caudal
			Inicial	Final	l/s
	INICIO		0+000		100.0
1	Tramo 1-2		0+000	1+637	-
		TR 1-2 QRio	0+000	1+637	100.0
		TR 1-2 QAR	0+000	1+637	-
2	Tramo 2-3		1+637	2+661	-
		TR 2-3 QRio	1+637	2+661	10.0
		TR 2-3 QAR	1+637	2+661	-
		TR 2-3 Des PTAR (San Lorenzo)	2+289		3.0
		TR 2-3 Trib Calama QRio	2+372		50.0
		TR 2-3 Trib Calama QAR	2+372		-
3	Tramo 3-4		2+661	10+992	-
		TR 3-4 QRio	2+661	10+992	200.0
		TR 3-4 QAR	2+661	10+992	-
		TR 3-4 Trib Sella QRio	7+686		10.0
		TR 3-4 Trib Sella QAR	7+686		-
4	Tramo 4-5		10+992	11+572	-
		TR 4-5 QRio	10+992	11+572	410.0
		TR 4-5 QAR	10+992	11+572	-
		TR 4-5 Trib Erquiz QRio	11+221		64.0
		TR 4-5 Trib Erquiz QAR	11+221		-
		TR 4-5 Trib Victoria QRio	11+461		44.0
		TR 4-5 Trib Victoria QAR	11+461		-
5	Tramo 5-6		11+572	13+265	-
		TR 5-6 QRio	11+572	13+265	273.0
		TR 5-6 QAR	11+572	13+265	-
6	Tramo 6-7		13+265	20+492	-
		TR 6-7 QRio	13+265	20+492	96.0
		TR 6-7 QAR	13+265	20+492	-
		TR 6-7 Des B. Senac QAR	16+604	19+122	75.0
7	Tramo 7-8		20+492	20+739	-
		TR 7-8 QRio	20+492	20+739	-
		TR 7-8 QAR	20+492	20+739	-
		TR 7-8 Trib SP-Monte QRio	20+606		10.0
		TR 7-8 Trib SP-Monte QAR	20+606		-
8	Tramo 8-9		20+739	25+315	-
		TR 8-9 QRio	20+739	25+315	10.0
		TR 8-9 QAR	20+739	25+315	20.0
9	Tramo 9-10		25+315	26+415	-
		TR 9-10 Des PTAR San Luis QAR	25+792	0+000	221.0
		TR 9-10 Des Matadero	25+792	0+000	2.0
		TR 9-10 QAR	25+315	25+415	-
		TR 9-10 Trib Tomolosa QRio	25+423		10.0
		TR 9-10 Trib Tomolosa QAR	25+423		-
	FIN		26+415		1,173.0

Fuente: Elaboración propia

Calidad de Agua

Cuando nos referimos a las condiciones de contorno de calidad de agua (Temperatura, OD y DBO), estamos hablando de elementos no conservativos, cuyo comportamiento (no lineal), obedece a una tasa de reacción cinética que varía en función a condicionantes exógenos presentes en el contorno del sistema, y que por los tanto, no pueden ser establecidos por medio de un simple balance de igual forma que las condiciones hidrodinámicas.

Para caracterizar la calidad de las aguas vertidas al cauce del Río, se asumieron los siguientes valores de contaminación orgánica:

- Agua residual Domiciliaria sin tratar: 220 mg/l (Concentración de DBO)
- Agua residual Matadero sin tratar: 3800 mg/l de DBO
- Agua natural del Río: 3 mg/l (Concentración de DBO)

En lo que respecta a los valores de temperatura y oxígeno disuelto, se optó por asumir que todas las descargas de aguas residuales que ingresan al sistema, contendrían 19 a 20 grados centígrados de temperatura con una concentración de 0,1 mg/l de oxígeno disuelto.

Dada la situación de no contar con información de base suficientemente detallada como para realizar una determinación analítica, se justifica plenamente la adopción de estos factores que permitirán establecer las Condiciones de Borde del sistema fluvial estudiado.

De esta manera fue posible computar las condiciones de contorno de calidad de agua (Temperatura, OD y DBO), para los tramos y ríos tributarios que caracterizan el sistema fluvial. Los resultaos encontrados se muestran a continuación:

Tabla 5.9: Condiciones de borde: calidad de agua (Octubre 2012) – Descargas del río Guadalquivir

Nº	Tramos	Descargas Consideradas	Progresiva Descarga		Caudal	T	DBO	OD
			Inicial	Final	l/s	Grados	mg/l	mg/l
	INICIO		0+000		100	23.2	0.5	5.8
1	Tramo 1-2		0+000	1+637	-	-	-	-
		TR 1-2 QRio	0+000	1+637	100	19.0	3.0	2.0
		TR 1-2 QAR	0+000	1+637	-	-	-	-
2	Tramo 2-3		1+637	2+661	-	-	-	-
		TR 2-3 QRio	1+637	2+661	10	19.0	3.0	2.0
		TR 2-3 QAR	1+637	2+661	-	-	-	-
		TR 2-3 Des PTAR (San Lorenzo)	2+289		3	20.0	50.6	0.1
		TR 2-3 Trib Calama QRio	2+372		50	19.0	3.0	2.0
		TR 2-3 Trib Calama QAR	2+372		-	-	-	-
3	Tramo 3-4		2+661	10+992	-	-	-	-
		TR 3-4 QRio	2+661	10+992	200	19.0	3.0	2.0
		TR 3-4 QAR	2+661	10+992	-	-	-	-
		TR 3-4 Trib Sella QRio	7+686		10	19.0	3.0	2.0
		TR 3-4 Trib Sella QAR	7+686		-	-	-	-
4	Tramo 4-5		10+992	11+572	-	-	-	-
		TR 4-5 QRio	10+992	11+572	410	19.0	3.0	2.0
		TR 4-5 QAR	10+992	11+572	-	-	-	-
		TR 4-5 Trib Erquiz QRio	11+221		64	19.0	3.0	2.0
		TR 4-5 Trib Erquiz QAR	11+221		-	-	-	-
		TR 4-5 Trib Victoria QRio	11+461		44	19.0	3.0	2.0
		TR 4-5 Trib Victoria QAR	11+461		-	-	-	-
5	Tramo 5-6		11+572	13+265	-	-	-	-
		TR 5-6 QRio	11+572	13+265	273	19.0	3.0	2.0
		TR 5-6 QAR	11+572	13+265	-	-	-	-
6	Tramo 6-7		13+265	20+492	-	-	-	-
		TR 6-7 QRio	13+265	20+492	96	19.0	3.0	2.0
		TR 6-7 QAR	13+265	20+492	-	-	-	-
		TR 6-7 Des B. Senac QAR	16+604	19+122	75	20.0	154.0	0.1
7	Tramo 7-8		20+492	20+739	-	-	-	-
		TR 7-8 QRio	20+492	20+739	-	-	-	-
		TR 7-8 QAR	20+492	20+739	-	-	-	-
		TR 7-8 Trib SP-Monte QRio	20+606		10	19.0	3.0	2.0
		TR 7-8 Trib SP-Monte QAR	20+606		-	-	-	-
8	Tramo 8-9		20+739	25+315	-	-	-	-
		TR 8-9 QRio	20+739	25+315	10	19.0	3.0	2.0
		TR 8-9 QAR	20+739	25+315	20	20.0	220.0	0.1

Nº	Tramos	Descargas Consideradas	Progresiva Descarga		Caudal	T	DBO	OD
			Inicial	Final	l/s	Grados	mg/l	mg/l
9	Tramo 9-10		25+315	26+415	-	-	-	-
		TR 9-10 Des PTAR San Luis QAR	25+792	0+000	221	20.0	85.2	0.2
		TR 9-10 Des Matadero	25+792	0+000	2	20.0	3,800	0.1
		TR 9-10 QAR	25+315	25+415	-	-	-	-
		TR 9-10 Trib Tomolosa QRio	25+423		10	19.0	3.0	2.0
		TR 9-10 Trib Tomolosa QAR	25+423		-	-	-	-
	FIN		26+415		1,173	22.5	16.1	4.3

Fuente: Elaboración propia

En lo concerniente a las descargas de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) San Lorenzo y San Luis, los valores adoptados fueron los proporcionados por COSAALT LTDA.

Tabla 5.10: Condiciones de borde: calidad de agua de descargas especiales.

Descargas Especiales 2012	T	DBO	OD
	Grados	mg/l	mg/l
TR 2-3 Des PTAR (San Lorenzo)	20	50.6	0.1
TR 6-7 Des B. Senac QAR	20	154	0.1
TR 9-10 Des PTAR San Luis QAR	20	85.2	0.2
TR 9-10 Des Matadero	20	3800	0.1

Fuente: Elaboración propia

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.5.1. Calibración y verificación del modelo

La calibración comienza ya en la fase de conceptualización del problema, al determinar cuáles son las variables de salida de interés para el modelador y cuáles los parámetros de entrada que afectan a los mismos (López, et. al., 2002). Los módulos: hidrodinámico y de calidad de agua de Mike11, fueron calibrados con los registros de Octubre 2012 (COSAALT LTDA.). Los objetivos que fueron considerados en el proceso de calibración son:

(i) Una buena concordancia entre los valores de las muestras compuestas observadas, y los valores generados por el modelo para las variables de temperatura (ºT), y concentraciones de OD y DBO.

(ii) Una buena concordancia global en la forma del perfil de concentraciones longitudinal del río.

(iii) Finalmente, una buena concordancia para condiciones de flujo mínimo (época de estiaje).

La evaluación del desempeño del modelo en su conjunto, requirió que la calibración hidrodinámica fuese hecha de forma simultánea con la del modelo de calidad de agua. La calibración del modelo hidrodinámico centra su proceso en la determinación de los valores apropiados de rugosidad del canal, para satisfacer las condiciones de borde hidrodinámicas dadas por los caudales y velocidades observadas, sin dejar de lado, los efectos que pudieran provocarse en las reacciones bioquímicas; lo cual es evaluado a través de la calibración del modelo de calidad de agua (que se complementa e interactúa con el anterior módulo), y que fundamenta su proceso en la obtención de los valores adecuados de constantes y coeficientes, que satisfagan las condiciones de contorno establecidas por la Tª, OD y DBO medidas en campo.

5.5.1.1. Calibración de los módulos: hidrodinámico versus calidad de agua

La calibración de esta etapa requiere generalmente variar la rugosidad del canal, es decir, hacer variar el coeficiente de rugosidad de Manning (*n*), hasta encontrar una coincidencia entre los resultados del modelo y los datos observados en campo. Así, debe realizarse un proceso de ajuste del modelo a valores de referencia dentro de un determinado intervalo hasta que el modelador decida cuál es el valor de los parámetros de entrada que mejor predicen las concentraciones con las que se va a comparar.

Una calibración exacta del modelo hidrodinámico es crucial, puesto que regula el tiempo de transito del agua a lo largo del río y este a su vez impacta directamente sobre la ºT y el OD. El tiempo de transito del agua en el Río Guadalquivir, puede ser determinado con precisión, a través del uso de trazadores conservativos; siendo esto no muy práctico desde el punto de vista económico. Otra forma es por medio de mediciones de velocidad de la corriente a lo largo del curso del río.

Para superar las *limitaciones* de la *calibración independiente* de los módulos: hidrodinámico y de calidad de agua, Deas y Orlob (1999) presentan un método de *calibración iterativa* en la cual los módulos son utilizados conjuntamente. A continuación se describe brevemente la aplicación de este método dentro del contexto del Río Guadalquivir.

5.5.1.2. Aplicación del método de calibración iterativa

El esquema planteado en el presente estudio, asume que: el flujo proveniente de la naciente del Río Guadalquivir, los caudales de los ríos tributarios y descargas de agua residual, son todos invariables, lo que permite establecer un régimen de flujo constante. Por el contrario, la ºT responde a un ciclo diario de calentamiento y enfriamiento del agua, el cual es principalmente producido por la variación de la intensidad de la radiación solar durante las horas del día (únicamente). Como respuesta a este ciclo diario, se produce un patrón característico de temperatura, en el que el transporte advectivo hace de *trazador* de flujo. Por lo tanto, las variaciones diurnas de temperatura proporcionan una señal similar a la de un trazador conservativo que es sobrepuesto en el perfil térmico del río. Esta señal se reproduce en los resultados del modelo, y puede ser ajustada a los datos observados durante el proceso de calibración.

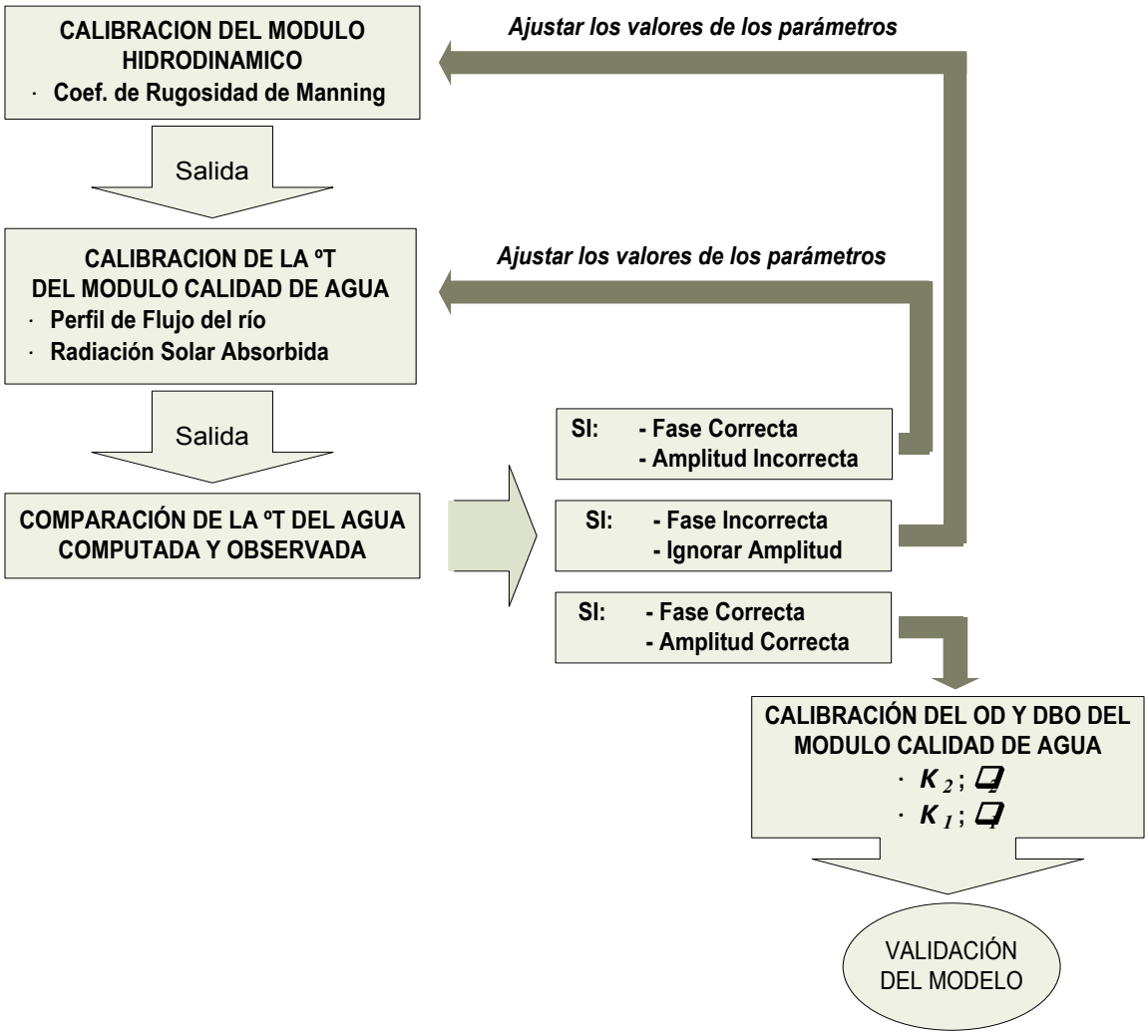
La calibración de los parámetros para el modulo hidrodinámico incluyen: el coeficiente de rugosidad "*n"* de Manning y los coeficientes de dispersión; aunque en este estudio, la variación de la dispersión longitudinal fue considerada mínima, es decir, los coeficientes se mantuvieron constantes en todas las corridas. En el modelo de calidad de agua, la calibración de los parámetros que afectan directamente a la ºT son: la radiación solar absorbida y la reflejada.

Inicialmente, la técnica de calibración requiere que el modulo hidrodinámico de Mike11, sea aplicado para simular un perfil de flujo del río, el cual será empleado como registro de ingreso para el modulo de calidad de agua. Éste posteriormente, generará el perfil térmico, que será comparado con el medido en campo. De ahí, tres posibles relaciones entre *fase* y *amplitud*, de los valores computados y observados pueden ser obtenidas (Ver figura 4.1):

(i) Fase correcta, pero amplitud incorrecta
(ii) Fase incorrecta
(iii) Fase y amplitud correctas

La *fase* está directamente relacionada con el *tiempo de tránsito*. El tiempo de transito del agua, está determinado por la velocidad del agua, y es por lo tanto, una función de la rugosidad del canal. La *amplitud* de las variaciones diurnas de la ºT, es afectada principalmente por dos procesos: tiempo de tránsito (tiempo de exposición del agua); y la radiación solar absorbida. Una vez que la fase del perfil es efectivamente reproducida, la calibración del módulo *hidrodinámico* ha sido completada, y de ahora en adelante, el módulo de *calidad de agua* será usado de forma individual para calibrar la amplitud del perfil de ºT.

Figura 5.7: Diagrama de flujo del proceso de la calibración adoptado



Fuente: Elaboración propia

Una vez calibrado el perfil de Tª en fase y amplitud, se procedió a calibrar el módulo de calidad de agua en sus componentes OD y DBO. El perfil de concentraciones de OD del río, se ve afectado principalmente por la constante cinética de reaireación (k_2), y el coeficiente de temperatura de Hoff-Arrhenius para la reaireación (q_2). Mientras que para la DBO, la calibración de los parámetros que afectan directamente a su concentración son: la constante cinética de degradación (k_1), y su coeficiente de temperatura de Hoff-Arrhenius (Θ_1), cuyos valores fueron buscados como parte final y complementaria de la calibración del modelo (Ver figura 4.1).

Es importante mencionar que el ciclo diario de calentamiento y enfriamiento del agua es simulado por Mike11 a través de la ubicación geodésica del Río (latitud y longitud), y la posición del sol respecto de la tierra según la estación anual correspondiente, lo que incide directamente en el número de horas sol del día (duración del día), por consiguiente, la utilización de Mike11 involucra necesariamente modelar el comportamiento de las variables observadas durante las *24 horas del día*, con el inconveniente de que los datos con los que se cuenta son muestras compuestas representativas de un *tiempo dado*.

Para sobrellevar esta contrariedad, se definió adoptar una hora del día para llevar a cabo la lectura de los valores generados por el computador, y poder compararlos con los valores observados. Según los registros históricos de temperatura del agua, el Río Guadalquivir alcanza sus máximos valores entre las 14.00 y las 16:00 horas, dependiendo de su ubicación espacial a lo largo de su curso, por cuanto para la

lectura de los datos se definió como *hora crítica* las 15:00 horas, *situación e instante menos favorable* en el cual se registran las mayores temperaturas, y por ende la *menor concentración de oxígeno disuelto*.

En la práctica, la fase y amplitud simuladas no igualaron consistentemente los datos medidos, posiblemente debido a variaciones a corto plazo en lo que se refiere a actividades de operación hidráulica aguas arriba, meteorología local en la cabecera del río, influencia de las descargas de ríos tributarios, etc. Estas discrepancias produjeron más de un posible juego de parámetros de calibración, los cuales fueron sometidos a un previo análisis de incertidumbre, antes de ser seleccionados definitivamente.

5.5.1.3. Cuantificación de la incertidumbre de los parámetros seleccionados

La calibración requiere de la comparación de alternativas que incluyen varios juegos de parámetros. La selección de los valores de los parámetros finales requiere de: juicio profesional, comparación gráfica de los perfiles simulados versus medidos, y análisis estadístico de los datos simulados y muestreados.

La comparación gráfica de los perfiles generados y el juicio profesional, fueron empleados para evaluar el desempeño general del modelo; pero presentaron dificultad al momento de cuantificar diferencias en múltiples ubicaciones a lo largo del río. Aunque cada criterio de selección posee ventajas y desmerecimientos, el análisis estadístico, fue preferido como el método predominante para seleccionar el adecuado juego de parámetros.

En ese sentido, se obtuvo la regresión de los datos simulados sobre los datos de campo. En todos los casos, los datos simulados figuraron como la variable dependiente; y los datos observados en campo como la variable independiente, obteniéndose como resultado del análisis de regresión un coeficiente de correlación R^2, que permitió corroborar la certidumbre de los parámetros seleccionados. Éste tipo de análisis, provee otra visión adicional acerca de la bondad de ajuste del perfil, que no es fácil de identificarse únicamente a través de los estadígrafos.

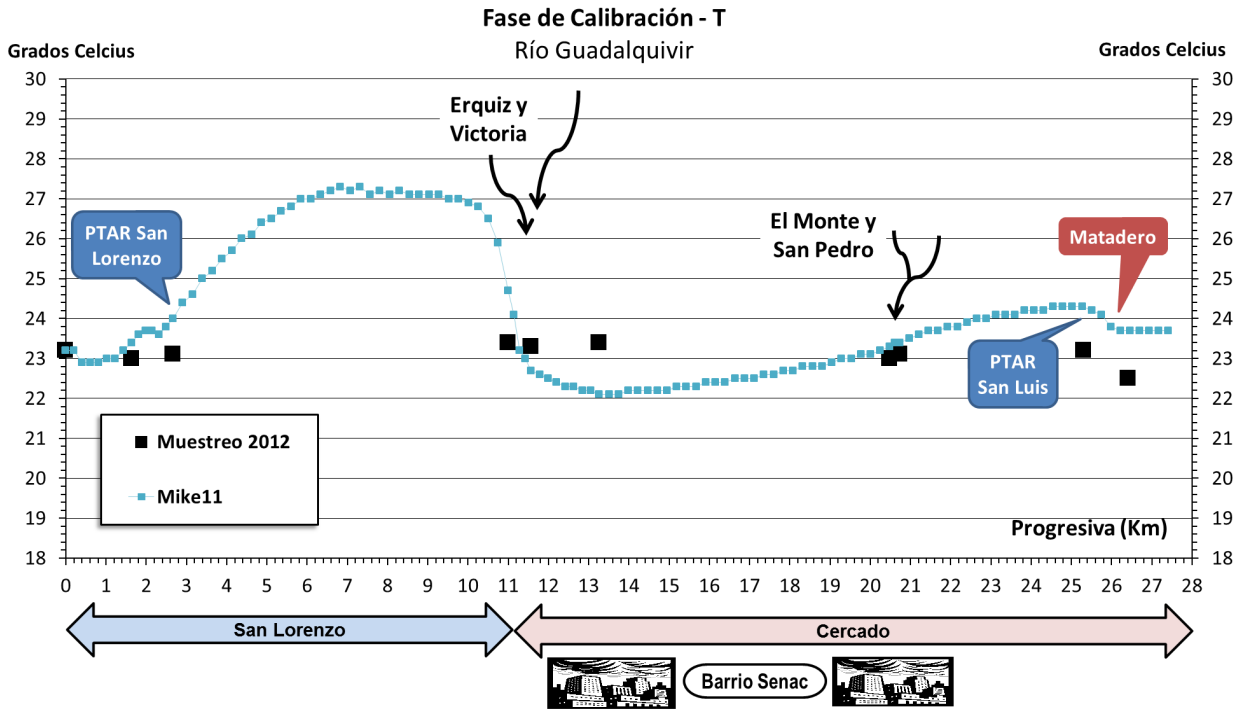
Perfil Longitudinal de Temperatura

En la calibración de la fase del perfil térmico, se hallaron valores de rugosidad "*n*" de Manning que fluctúan cerca de 0.075, y que corresponden respectivamente a: a canal natural con lecho y orillas conformadas por material de canto rodado y piedras (Barnes, 2001).

Para el ajuste de la amplitud del perfil térmico, se emplearon los valores de radiación solar registrados en el periodo de 1970 a 2011 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Tarija. El promedio de los valores diarios observados durante este periodo es de 14.235 [kJ/m^2/d]. Si bien el valor adoptado corresponde al área de influencia dónde se ubica la estación registradora de este parámetro, se puede considerar como un valor representativo de la zona y generalizarse su uso para los 27 Km de largo del río.

Como resultado de la calibración del perfil térmico, en la siguiente ilustración se muestra en forma de perfil longitudinal del río, los valores de temperatura generados versus los datos observados que se emplearon para su calibración.

Figura 5.8: Resultados de la calibración del perfil térmico



Fuente: Elaboración propia

Como resultado del análisis de regresión el coeficiente de correlación obtenido para esta variable fue de $R^2 = 0.81$, lo cual evidencia una buena bondad de ajuste entre la curva generada y los datos observados.

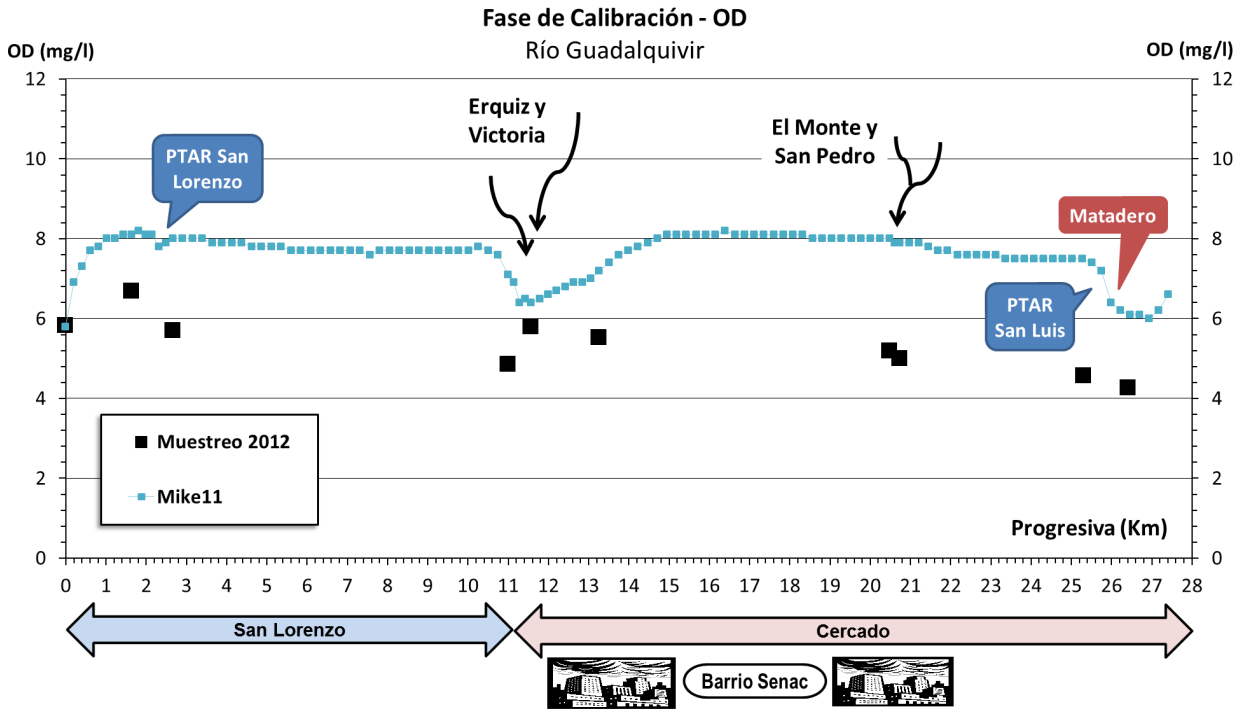
Perfil Longitudinal del Oxígeno Disuelto

El siguiente paso tiene que ver con la calibración del OD y la DBO del módulo de calidad de agua. Según el diagrama, el perfil de concentraciones de OD es afectado principalmente por la constante cinética de reaireación (k_2) y su respectivo coeficiente de temperatura de Hoff-Arrhenius (q_2); mientras que el perfil de concentraciones de la DBO se ve afectado por la constante cinética de degradación (k_1) y su coeficiente de temperatura de Hoff-Arrhenius (Θ_1).

Con la intensión de *disminuir la incertidumbre en los resultados de la calibración*, los valores típicos recomendados de los coeficientes de Hoff-Arrhenius para la reaireación y la degradación, *no fueron alterados en absoluto* debido a su irrelevante incidencia sobre las variables modeladas.

La constante cinética k_2, considerada por cierto como de gran incidencia para el OD, fue calibrada utilizando la expresión propuestas por O'Connor-Dubbins (considerada aplicable para ríos ordinarios).

Figura 5.9: Resultados de la calibración del perfil de oxígeno disuelto



Fuente: Elaboración propia

El perfil longitudinal de concentraciones de OD obtenido, presenta una moderada correlación entre los datos generados y las observaciones, hecho que es cuantificado a través de su coeficiente de correlación de 0,64 (R^2).

Perfil Longitudinal de la DBO

Una vez alcanzado un nivel aceptable de calibración del OD, se procedió a calibrar la fase y amplitud del perfil longitudinal de la DBO. El único parámetro susceptible de cambio fue la constante k_1, puesto que como se indicó en párrafos anteriores, el valor típico recomendado del coeficiente de temperatura de Hoff-Arrhenius (Θ_1) no fue alterado en absoluto.

En la Tabla siguiente se encuentran tabulados valores de tasas experimentales, los mismos que sirvieron de guía para la calibración del modelo.

Tabla 5.11: Coeficientes de reacción

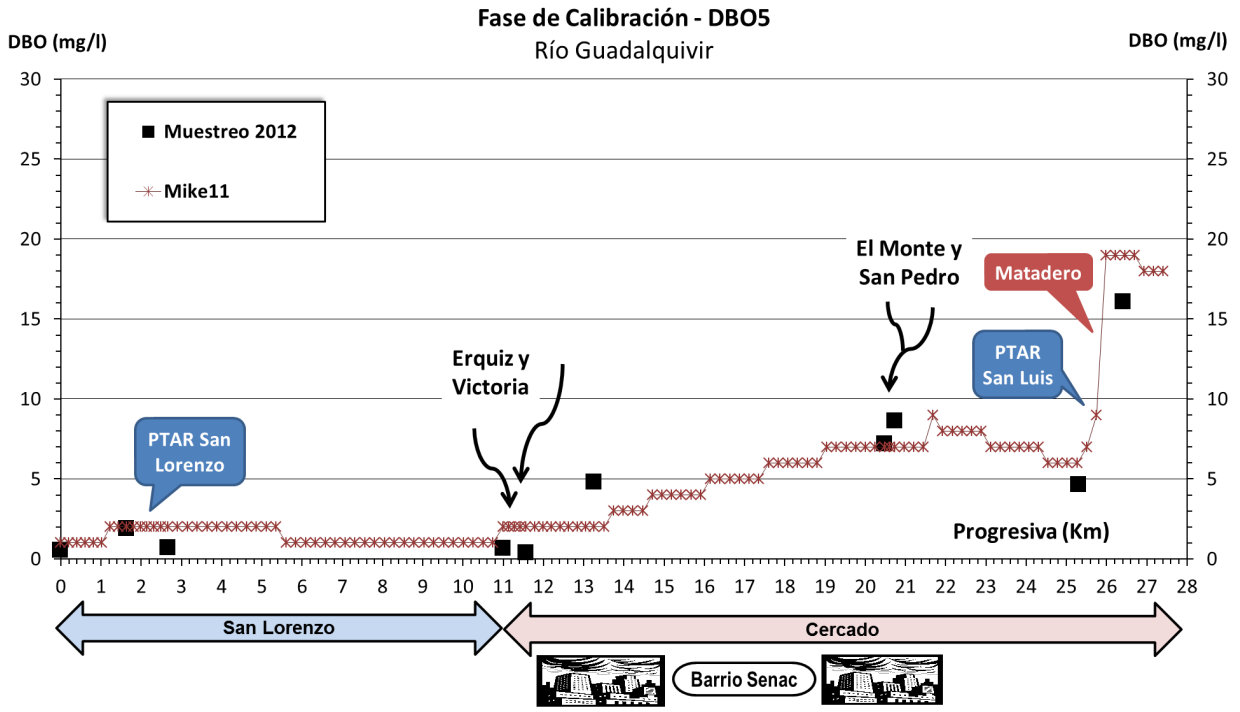
Tasa	Aplicación	Valor
k_r	Desagüe crudo en río (bajo y rocoso).	1,0 a 3,0
k_d	Sedimentado y poca profundidad (rocoso).	0,5 a 2,0
k_1	De desagüe secundario en río.	0,2 a 0,5

Fuente: Castagnino, 1978.

La tasa de remoción de materia orgánica en el río (k_r) no tiene, necesariamente, que ser igual a la tasa de desoxigenación (k_d). Hay varios factores que pueden explicar la diferencia. En k_r están incluidos los efectos de sedimentación y de arrastre de fondo, eventualmente algunas pérdidas de materia por otros efectos como volatilización. Generalmente $k_r > k_d$. Pero k_d no es tampoco la tasa que se obtiene en el laboratorio, mediante el estudio de la curva de DBO a distintos tiempos que llamamos k_1. La razón por la cual $k_d > k_1$ estriba en el hecho que en ríos de poca profundidad y rocosos, existe una zooglea en el fondo que hace un efecto similar al de filtros percoladores. Se extrae, por esta zooglea, materia orgánica y se estabiliza, lo cual no puede reproducirse en el frasco de laboratorio.

Los valores de k_1, k_d y k_r dependen así mismo de la facilidad con que la bacteria aeróbica encuentra y metaboliza la materia orgánica. Si ésta ha sufrido ya la acción bacteriana en algún tratamiento biológico (secundario) entonces el valor de los *k* será menor ya que la masa bacteriana no asimila tan fácilmente el alimento disponible. El mismo efecto, por razón de cercanía al alimento, puede causar una dilución mayor. Valores de k_r entre 0.6 y 3 [1/d] no son extraños si hay alguna sedimentación, los más altos cuando es un curso de agua bajo y rocoso.

Figura 5.10: Resultados de la calibración del perfil de la demanda bioquímica de oxígeno



Fuente: Elaboración propia

La curva de DBO generada, exhibe una adecuada reproducción de la fase del perfil. El ajuste de los parámetros fue llevado a cabo de forma iterativa para cada variable (Tª, OD y DBO), hasta encontrar el mejor ajuste de bondad de los perfiles. Como resultado del análisis de regresión, el coeficiente de correlación obtenido para esta variable fue de $R^2 = 0.91$, lo cual evidencia una excelente bondad de ajuste entre la curva generada y los datos observados.

5.5.2. Simulación y análisis de escenarios

5.5.2.1. Proyección de las condiciones de borde

La utilidad de los modelos matemáticos está determinada en gran medida por su habilidad en *reproducir con precisión* series de datos observados (relacionado con el nivel de calibración logrado) y, por la *capacidad predictiva* al describir otras series de tiempo *sin* que se requiera ajuste alguno de los parámetros calibrados (Camacho, et. al., 2003). Al igual que en la fase de calibración, para predecir es preciso establecer las nuevas condiciones iniciales y de contorno del sistema

La determinación de las Condiciones de Borde para el año de horizonte 2036, consideró mantener constante el valor del Caudal Base del Río, y pronosticar el resto de las descargas usando la población como variable próxima de proyección.

El cuerpo receptor final, ya sea directo o indirecto de todas las aguas residuales, crudas y tratadas generadas en la ciudad de Tarija es el río Guadalquivir. La principal descarga, en cuanto a volumen, lo

representa el efluente de las lagunas de San Luis, el cual descarga en la Quebrada Torrecillas, y de ésta llega al río.

Los efluentes de las cámaras sépticas (Barrio SENAC), son descargados a las quebradas El Monte, San Pedro, Verdum, Sossa, Sagredo y otras de menor importancia, que igualmente llegan al río Guadalquivir. Los caudales de aguas residuales domésticos e industriales calculados para el 2036, ascienden a 924 l/s (Ver Tabla siguiente), y toman en cuenta nuevas zonas de crecimiento y expansión en la cobertura del servicio de alcantarillado.

En los que respecta a las condiciones de calidad de agua (Tª, OD y DBO), éstas fueron deducidas a partir de los caudales proyectados para el 2036. Es importante hacer notar que los valores de los parámetros: "*n*" de manning, radiación solar, coeficientes de Hoff-Arrhenius y tasas para la reaireación y degradación, fueron los *mismos* empleados en la fase de calibración. El resultado de la aplicación de las nuevas condiciones de borde del **Sistema Sin Mejoras de Tratamiento**, se puede analizar en la gráfica de la Ilustración 20, donde se representa el Perfil Longitudinal de la DBO para los años 2012 (Fase de Calibración), y 2036 (Fase de Modelación).

Los principales cambios de pendiente en el perfil de la DBO para el 2036, obedecen a los impactos producidos por las descargas de aguas residuales de las PTAR San Lorenzo y San Luis, y las descargas directas del Barrio SENAC y el Matadero Municipal. A continuación se muestran los valores empleados en cada descarga:

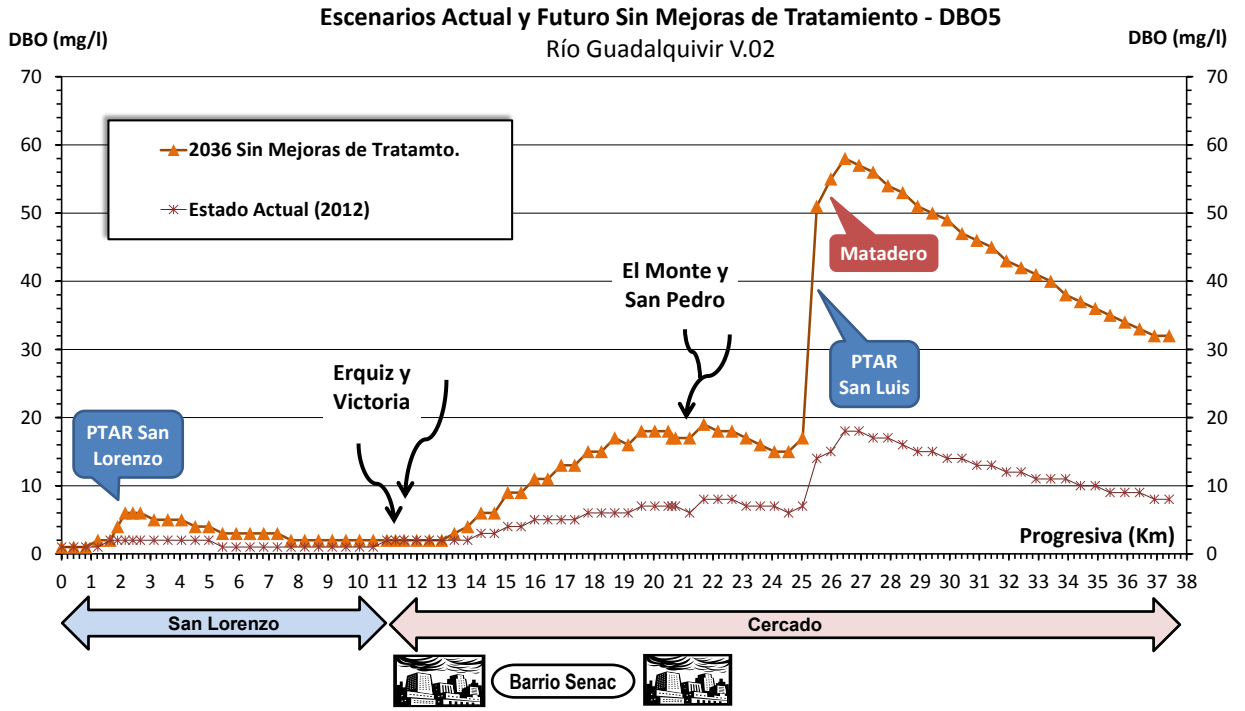
Tabla 5.12: Coeficientes de reacción

Descargas Especiales - 2036	Q	T	DBO	OD
	l/s	Grados	mg/l	mg/l
TR 2-3 Des PTAR (San Lorenzo)	9.0	20	165	0.1
TR 6-7 Des B. Senac QAR	161.0	20	220	0.1
TR 9-10 Des PTAR San Luis QAR	635.0	20	173	0.1
TR 9-10 Des Matadero	3.0	20	3800	0.1

Fuente: Castagnino, 1978.

Las concentraciones de DBO de las PTAR, son el resultado de tratar los caudales proyectados para 2036 con la misma infraestructura, sin considerar mejora alguna en lo que respecta a las características actuales de capacidad y eficiencia de tratamiento de las PTAR San Lorenzo y San Luis. La contaminación natural del Río para el 2036 se mantuvo constante en los 3 mg/l de DBO.

Figura 5.11: Perfil longitudinal de la DBO (mg/l) - Escenario actual y futuro sin mejoras de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

5.5.2.2. Evaluación de alternativas de saneamiento para el río Guadalquivir

El *Análisis de Escenarios*, es un método de comportamiento que se utiliza para evaluar el impacto que producen distintas circunstancias en el rendimiento de las variables. Más que aislar el efecto que produce un cambio en una sola variable, el análisis de escenarios *evalúa* el impacto que producen los cambios simultáneos de diversas variables (Gitman, 2000).

La información proporcionada demuestra que el Guadalquivir es el cuerpo receptor de un caudal importante de aguas residuales industriales y domiciliarias que se generan en todo el Valle Central de Tarija, lo cual puede provocar en un futuro cercano problemas de intoxicación masiva en el medio ambiente circundante. El Plan Maestro Metropolitanos de Agua y Saneamiento para la ciudad de Tarija prevé mejorar y optimizar las PTAR actuales para los nuevos requerimientos del año de horizonte. La implementación de las nuevas medidas incrementará la capacidad de tratamiento acorde a las necesidades del 2036, y permitirá lograr un efluente del tratamiento con una concentración de DBO de 30 mg/l a la salida de la planta antes de la descarga a cualquier cuerpo receptor.

Para el caso de la PTAR San Luis, se prevé incrementar su capacidad de manera tal que se pueda tratar el 100% de las descargas domiciliarias producidas en la ciudad de Tarija. Esto se lograría con la construcción adicional de un colector en el margen derecho del Río, que permita interceptar y luego bombear las aguas residuales generadas hasta el ingreso de la PTAR San Luis.

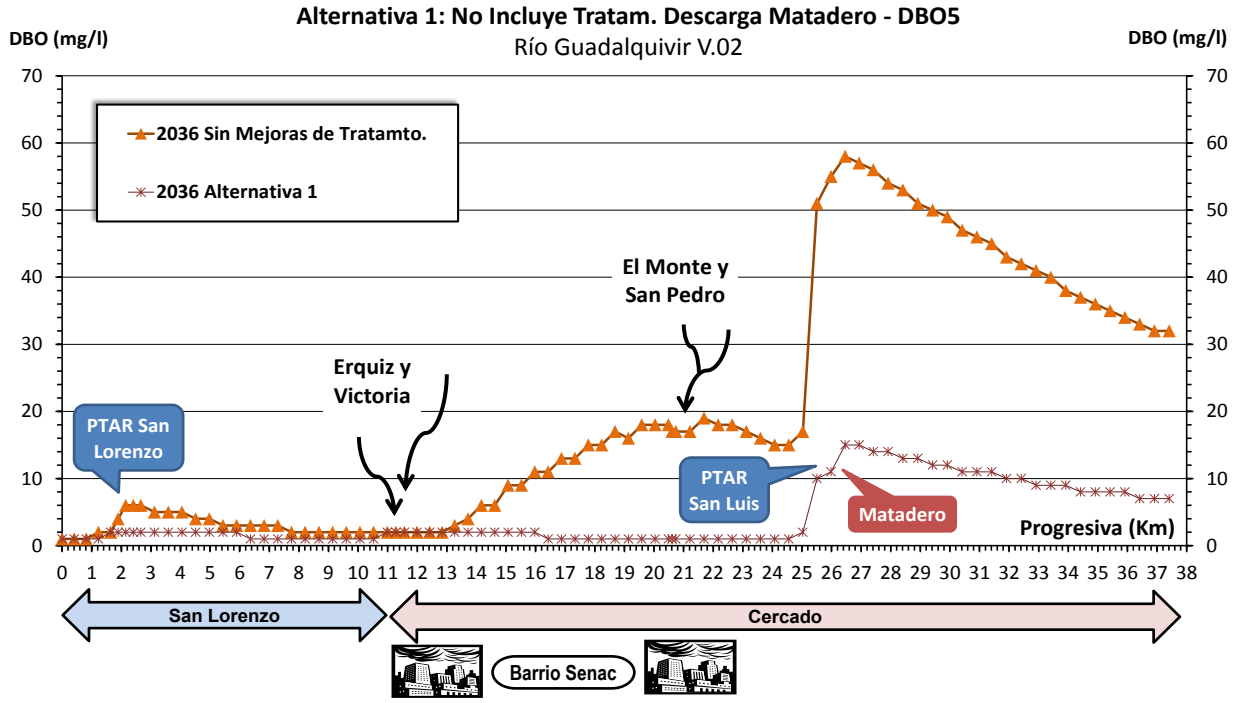
No obstante, queda pendiente el tratamiento de los *Residuos Industriales*, aspecto del cual se tiene poca información en lo que respecta a la caracterización de sus efluentes. Al margen del hecho, con el fin de analizar y concienciar al Sector Industrial, acerca del ***tratamiento previo*** de sus efluentes, de manera tal que sus descargas líquidas se *asemejen* en calidad a las aguas residuales domésticas, para que puedan luego ser completamente depuradas en las plantas de tratamiento urbanas, se incluyó en la modelación el efecto aislado de la descarga del Matadero Municipal.

En la actualidad el Matadero descarga de forma directa sin ningún tipo de pre-tratamiento aguas abajo de la descarga de la PTAR San Luis. Esta condición de vertido se mantuvo para el 2036 como primera parte del análisis.

Luego, con el propósito de aislar y mostrar el impacto de su descarga, se implementó virtualmente un pre-tratamiento que permita depurar el efluente hasta los 80 mg/l DBO, valor admisible permitido por el Reglamento de Contaminación Hídrica de la Ley 1333.

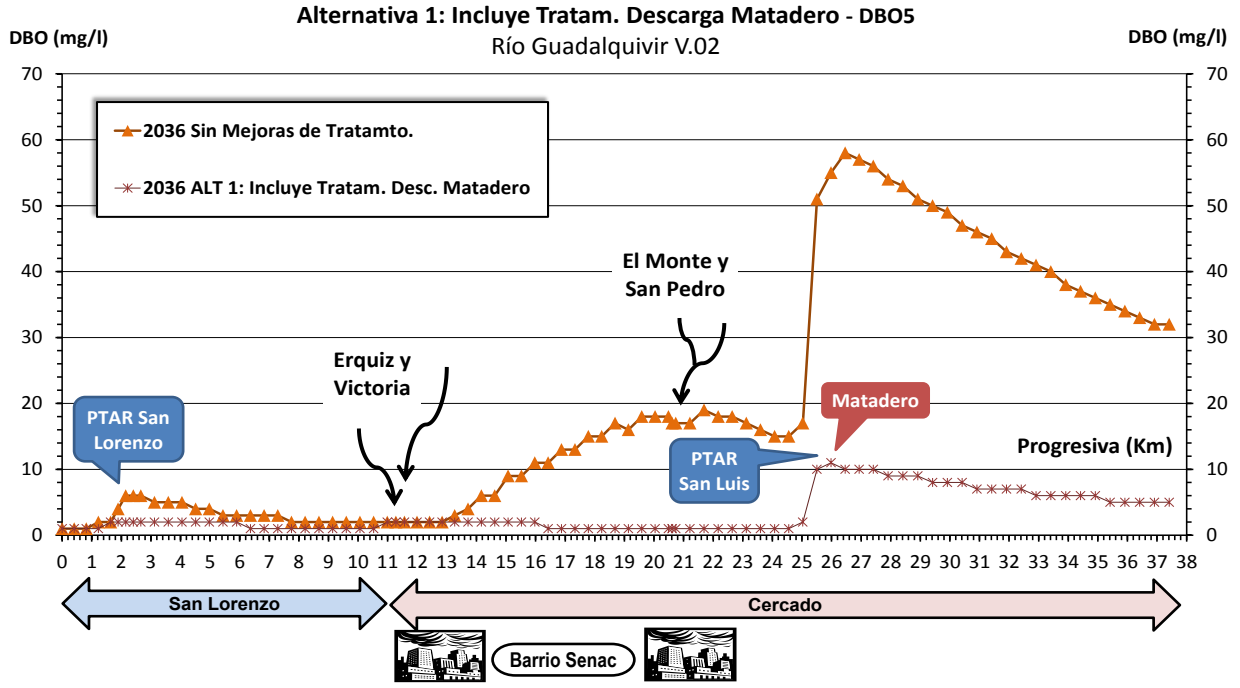
Con las consideraciones precedentes se procedió a generar las nuevas condiciones de borde para simular el efecto de las mejoras en las PTAR y evaluar los impactos de sus descargas en el cuerpo receptor.

Figura 5.12: Perfil longitudinal DBO (2036) – PTAR nuevas (Efluente de matadero sin tratamiento)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.13: Perfil longitudinal DBO (2036) – PTAR nuevas (Efluente de matadero con tratamiento)



Fuente: Elaboración propia

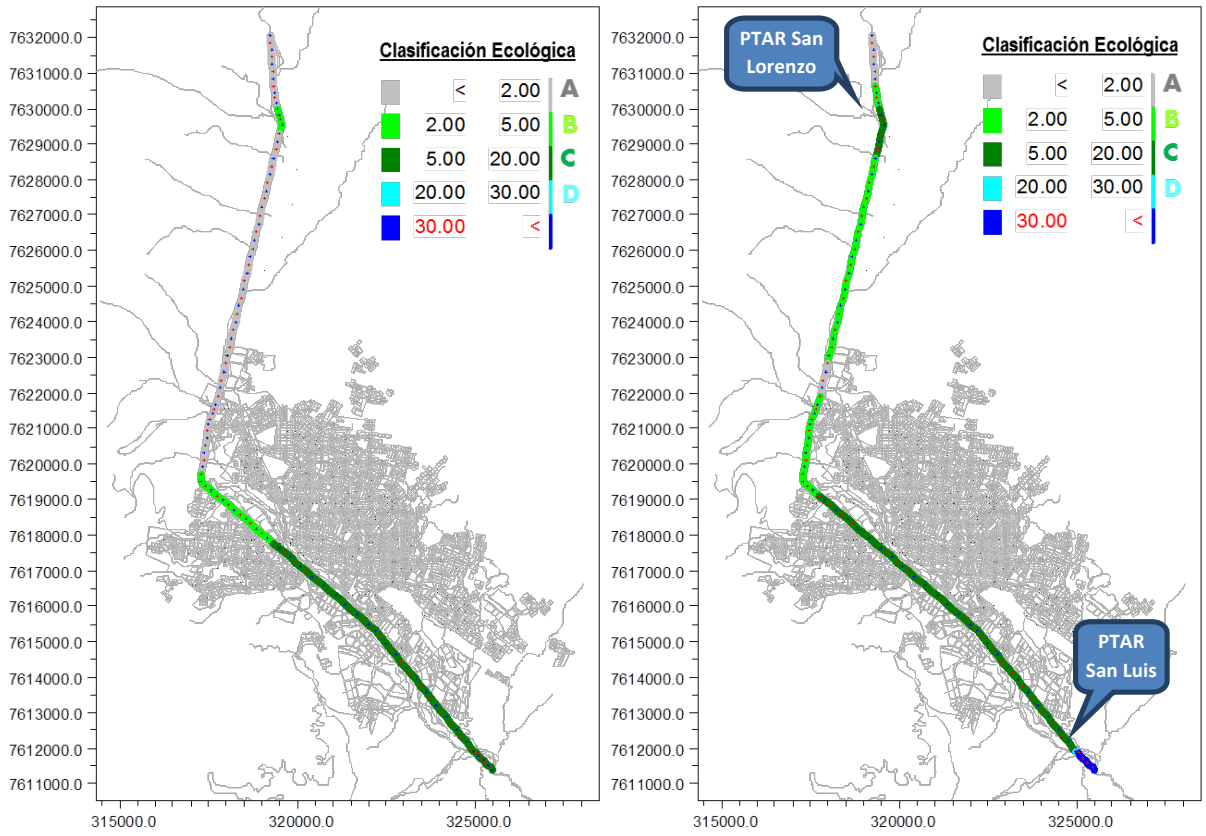
5.6. CARACTERIZACIÓN DEL RIO GUADALQUIVIR SEGÚN SU APTITUD DE USO

Los niveles de depuración alcanzados con las mejoras en las PTAR San Lorenzo y San Luis, dieron lugar a la necesidad de catalogar el Río Guadalquivir en función a la aptitud de uso que podría tener sus aguas en el estado de contaminación Actual y Futuro. Se aclara que esta clasificación ecológica del cuerpo receptor, no obstante es sustentada en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica - Ley 1333, contempla como parámetro patrón de clasificación solo a la DBO, y es realizada con el objeto de extender el análisis y evaluación de las medidas de saneamiento implementadas.

La ilustración que se muestra a continuación es una representación vista en planta del Río Guadalquivir, en cuyo recorrido se marca en colores los valores de las concentraciones de DBO alcanzados en la Situación Actual y Futura de contaminación del Río. Los intervalos sugeridos en la leyenda de la figura coinciden con los límites permisibles que el Reglamento de Contaminación Hídrica establece para la categorización de los cuerpos de agua según su Aptitud de Uso.

Figura 5.14: Categorización del río Guadalquivir – Situación sin mejoras de tratamiento

DBO - Situación Actual 2012 ***DBO - Situación Futura 2036***



Fuente: Elaboración propia

Según la ilustración precedente, el tramo estudiado del Río Guadalquivir en su Estado Actual, inicia su recorrido como Río Clase A hasta llegar a la progresiva 2+289, donde debido al efluente de la PTAR San Lorenzo, baja de categoría a Río Clase B por un pequeño intervalo, que luego debido a su capacidad de autodepuración es superado para volver a su estado inicial de Río Clase A. Esta última clasificación del Río se mantiene hasta el kilómetro 13+265, sector en el que empieza la mancha urbana de la ciudad de Tarija y punto a partir del cual se observa una degradación del Río, cambiando de Clase A a Clase B; y posteriormente aguas abajo en la prog. 17+386 a Clase C. Éste estadio es alcanzado presumiblemente por las descargas directas del Barrio SENAC (margen derecho del Rio), y evitan su autorecuperación haciendo que la categoría de Clase C se mantenga hasta finalizar el tramo de estudio.

En el lado derecho de la ilustración en cuestión, tenemos la Situación Futura del Río (2036), escenario caracterizado por no realizarse ningún tipo de mejora en las condiciones actuales de tratamiento. Es claramente observable como cada intervalo descrito en el anterior párrafo, sufre un grado de deterioro que deprecia su categorización en un nivel, es decir, de Río Clase A a B, B a C y C a D según cada intervalo descrito. Así mismo, se identifican las descargas de los efluentes de la PTAR San Luis y el Matadero, como causas para la contaminación del Río en su último intervalo, transformándolo en un Río totalmente contaminado y No Apto para ningún tipo de Uso (DBO>30mg/l).

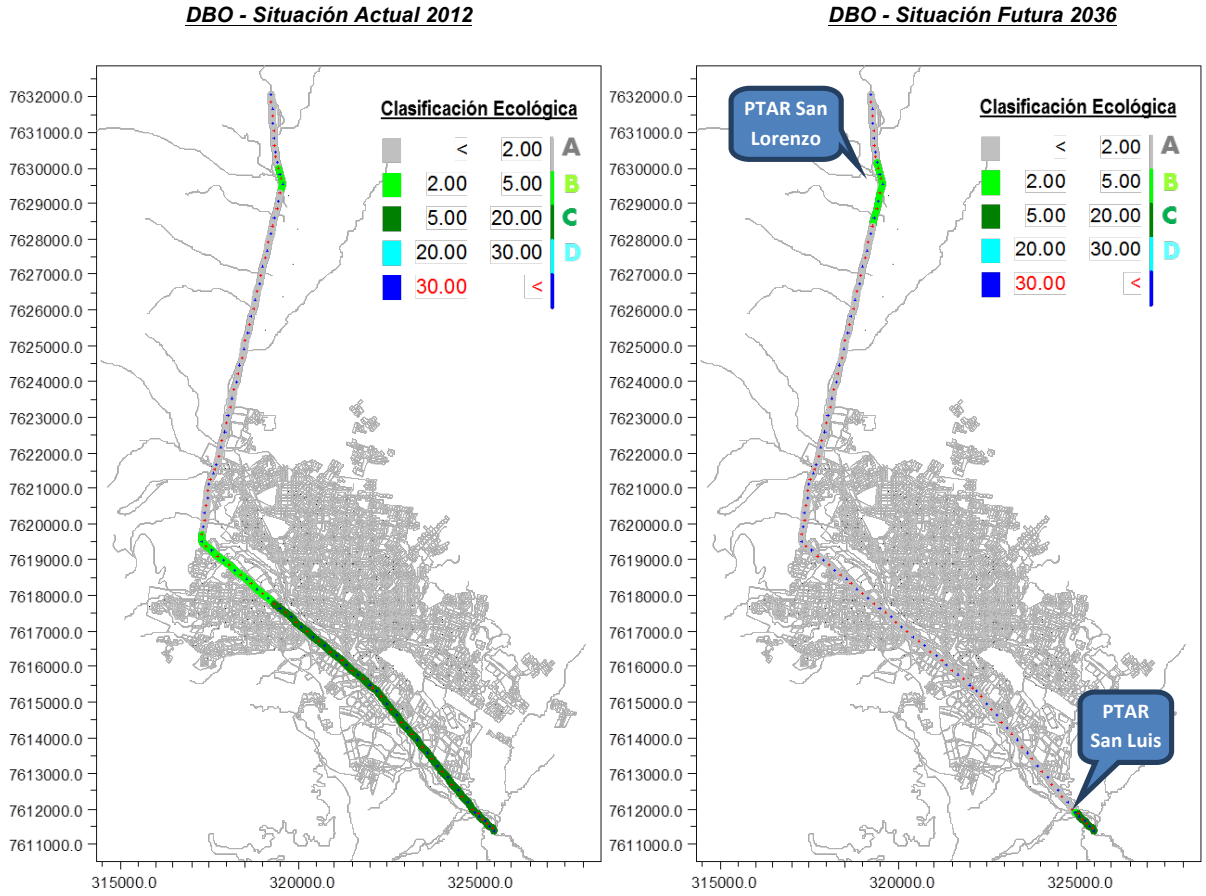
Por otro lado, es relevante comentar que el estado ecológico deteriorado del Río se extiende aguas arriba de la mancha urbana de Tarija hacia el tramo inicial, eliminando por completo la posibilidad de contar en algún momento con un Río Clase A. Esta nueva circunstancia de contaminación alcanzada para el 2036, si bien muestra un deterioro en su estado ecológico, no genera gran impacto según su Aptitud de Uso, es decir, no obstante baja de categoría, mantiene las cualidades de poder ser empleado

para riego de hortalizas y frutas de cáscara delgada, además de poder emplearse para recreación de contacto primario y abastecimiento industrial entre otros.

Desde un enfoque ambiental, si bien la degradación del estado ecológico del Río no afecta en gran manera su Aptitud de Uso, el Río como cuerpo de agua receptor sufre una degradación de sus condiciones ambientales que pone en riesgo los ecosistemas aledaños, motivo por el cual es nuestra obligación recuperar el Río y devolver su estado ecológico inicial.

La siguiente corrida del modelo, fue para validar la implementación de las medidas tendientes a mejorar el sistema de saneamiento para la ciudad de Tarija. El efecto en conjunto producido puede ser apreciado a través de la siguiente ilustración que predice la recuperación del Río Guadalquivir en más de un 95% de su longitud.

Figura 5.15: Categorización del río Guadalquivir según su aptitud de uso



Fuente: Elaboración propia

En otras palabras, luego de la implementación virtual de las alternativas de saneamiento (lado derecho de la figura), el Río recupera su clasificación inicial de Río Clase A en casi toda su extensión, exceptuando dos intervalos cortos con entornos ligeramente degradados aguas abajo de los vertidos de las PTAR San Lorenzo y San Luis. Cabe resaltar que el grado de contaminación alcanzado por estos dos intervalos no cambia considerablemente su Aptitud de Uso, además que esta condición de degradación es transitoria debido a la capacidad autodepuradora intrínseca del Río.

5.7. RECOMENDACIONES AL MODELO

Las recomendaciones principalmente van dirigidas a mejorar el modelo desarrollado y presentado en el presente documento para poder ser utilizado en un futuro. Éstas son:

Condiciones de Borde del Sistema Fluvial

- Se propone extender el plan de monitoreo (cuantificación de caudales y concentraciones de algunos parámetros), a los ríos tributarios que desembocan en el Río Guadalquivir. Esto permitirá priorizar y filtrar los ríos tributarios importantes que tienen impacto en el Río Guadalquivir y por ende conformar un nuevo esquema de monitoreo simplificado.
- *Es necesario* censar el caudal y la carga orgánica proveniente de los efluentes industriales, distinguiendo las descargas que impactan directamente al Río, de aquellas que van al alcantarillado sanitario.

Puntos de Muestreo

- Es necesario re-diseñar la ubicación de los puntos de muestreo priorizando su ubicación según los tramos críticos identificados en el presente documento.
- La nueva configuración de puntos de muestreo debe extenderse aguas debajo de la descarga de la PTAR San Luis para evaluar la verdadera capacidad de autodepuración intrínseca del Río.
- Se debe tomar en cuenta dos nodos adicionales, uno al inicio y otro al final del tramo en análisis, para un mayor control de cualquier distorsión en los resultados del intervalo estudiado.

Campañas de Muestreo

- Es importante realizar campañas de muestreo anuales durante la época de estiaje del Río, puesto que esta condición conforma el estado más crítico de dilución.
- Será necesario llevar adelante una campaña de muestreo en una época distinta a la de estiaje, para poder validar el modelo considerando otras condiciones de dilución del Rïo.
- Toda información generada por las entidades de monitoreo y control del estado ecológico de los cuerpos de agua, amerita sea revisada y validada por personal técnico calificado, es inconcebible la existencia de registros históricos de parámetros que no tengan asociado su correspondiente valor de caudal.

Desarrollo Progresivo del Modelo

- Es importante que de ahora en adelante se seleccione un modelo matemático, para que en función a los requerimientos del software, se proceda con la generación de información *específica con fines de modelación matemática*.
- Para el presente modelo se utilizaron valores de muestras compuestas que permitieron simular la conducta de cargas másicas promedio que circulan en el sistema (perfiles longitudinales), sin embargo, es necesario extender su utilización a simular el comportamiento del Río a lo largo de un día completo (función del tiempo), esto permitirá extender el uso del modelo a actividades de planificación, monitoreo y control de las aguas según su aptitud de uso.
- Las variables consideradas en este modelo son: temperatura, oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, no obstante es momento de ampliar la cantidad de variables simuladas, tomando en cuenta al nitrógeno y fósforo (nutrientes) para hacerlo más completo.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones se pueden resumir en los siguientes puntos:

- De acuerdo con el estudio de calidad realizado por la Gobernación el río Guadalquivir tiene una clasificación de Clase D.
- La implementación de las estrategias del Plan Maestro como los colectores para cubrir al 100% de la poblaciones de San Lorenzo y Tarija, más unos tratamiento de aguas servidas idóneos en ambos municipios se podría llegar a una clasificación del rio Clase A en casi el 95% de su longitud. Solo en los tramos de descarga de ambas PTAR la Clase seria B para San Lorenzo y C para Tarija, de acuerdo al Modelo de Calidad estudiado. Hay que tener en cuenta que este modelo solo muestra valores de DBO y OD.
- La futura calidad del río Guadalquivir de acuerdo con las implementaciones estratégicas del Plan Maestro podría proporcionar un uso del agua del río como empleo a riego de hortalizas y frutas de cáscara delgada, además de emplearse para recreación de contacto primario y abastecimiento industrial entre otros. Existiría también la posibilidad de generar actividad piscícola.
- Es importante que las industrias que se han identificado que vierten al río Guadalquivir introduzcan un tratamiento a sus aguas servidas previo a su vertido al río.
- El modelo fue de gran utilidad para validar las medidas de saneamiento y tratamiento de aguas servidas planteadas para el Río Guadalquivir. La implementación virtual en el modelo del Colector y las mejoras en las PTAR San Lorenzo y San Luis, pronosticaron recuperar el estado ecológico del Río, integrando claramente todos los componentes del sistema, es decir, Río, Alcantarillado y Planta de Tratamiento.

7. REFERENCIAS

- ✓ MECALF & EDDY. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. 4th Edition
- ✓ ARCEMENT G.J., SCHNEIDER JR. and V.R., 2000. *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. United States Geological Survey Water-supply, USGS. Paper 2339, Metric Version.
- ✓ BECK, M.B., 1983. *Mathematical Modelling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*. New York, USA.
- ✓ BOWIE, G.L., W.B. MILLS, D.B. PORCELLA, C.L. CAMPBELL, J.R. PAGENKOPF, G.L. RUPP, K.M. JOHNSON, P.W. CHAN, AND S.A. GHERINI. 1985. *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling*. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens GA.
- ✓ CAMACHO, LUIS A., DÍAZ-GRANADOS, MARIO A., GIRALDO, EUGENIO, 2003. *Contribución al Desarrollo de un Modelo de Calidad del Agua Apropiado para Evaluar Alternativas de Saneamiento del Río Bogotá*. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia.
- ✓ CASTAGNINO, WALTER A, 1978. *Polución de Agua – Modelos y Control*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Nº 34.
- ✓ CHAPRA, S.C., 1997. Surface Water Quality Modelling. Mc Graw-Hill. New York.
- ✓ DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, D.H.I. – WATER & ENVIROMENT. *MIKE 11 - A Modelling system for Rivers and Channels.* User Manual, Denmark, 2003.
- ✓ DEAS MICHAEL, ORLOB GERALD, 1999. *Klamath River Modeling Project*. Project 96-HP-01, University of California - Davis.

- ✓ FISHER, P., ABRAHART R. J, HERBINGER W., 1997. *The Sensitivity of Two Distributed Non-Point Source Pollution Models to The Spatial Arrangement of the landscape*. Hydrological Processes.
- ✓ HENRY, SALAS, 1984. *Criterios para seleccionar Modelos Matemáticos de Calidad de Agua*. CEPIS – OPS. *www.cepis.ops-oms.org*
- ✓ H.H. BARNES, JR., 2001. *Verified Roughness Characteristics of Natural Channels*. USGS Water Supply Paper 1849, Surface-Water Field Techniques.
- ✓ KIELY, GERARD, 1999. *Ingeniería Ambiental, Fundamentos, Entornos, Tecnología y Sistemas de Gestión.* Mc Graw Hill.
- ✓ LÓPEZ J., AMPARO, ESPERT A., VINCENT, ALBEROLA, CARLOS, 2002. *El Modelo Matemático y su Proceso de Calibración como herramienta para La Gestión y Conservación de la Calidad del Agua en cauces superficiales*. Universidad Politécnica de Valencia - Instituto Tecnológico del Agua de Valencia.
- ✓ MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE. *Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.* U.P.S. Editorial S.R.L. 1995.
- ✓ OYARZÚN GALLARDO, JESSICA PAOLA, 2004. *Modelación y Simulación de Oxígeno Disuelto, Materia Orgánica y Relación Distribucional de Macroinvertebrados en la Subcuenca del Río Traiguén*, Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ciencias, Temuco – Chile.
- ✓ RADWAN, M., WILLEMS, P., EL-SADEK, A., BERLAMONT, J., 2003. *Modelling of Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand in river water using a detailed and a simplified model*. Hydraulics Laboratory, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- ✓ SOETAERT KARLINE, PETER HERMAN, 2001. *Ecological Modelling.* Netherlands Institute of Ecology N.I.O.O. – C.E.M.E.
- ✓ UZÍN FERNANDEZ, LUIS G., 2002. *Ingeniería Económica, Curso de Post Grado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* U.M.S.A. – I.I.S.
- ✓ VEN TE CHOW, 1982. *Open Channel Hydraulics.* Editorial McFraw-Hill Kogakusha, Ltda., Tokyo, Japan.