



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

## “PROPUESTA TÉCNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES COMO SOPORTE EN LA DESCONTAMINACIÓN DEL RÍO MASHCÓN CAJAMARCA, 2024”

Tesis para optar al título profesional de:

**Ingeniera Ambiental**

**Autor:**

Cruz Amelia Amaya Zegarra

**Asesor:**

Mg. Ing. Danyer Stewart Girón Palomino

<https://orcid.org/0000-0001-9322-7236>

**Cajamarca - Perú**

**2024**

**JURADO EVALUADOR**

|                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Jurado 1<br>Presidente(A) | <b>Denisse Milagros Alva Mendoza</b> |
|                           | Nombre Y Apellidos                   |




|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| Jurado 2 | <b>Wilberto Effio Quezada</b> |
|          | Nombre Y Apellidos            |

|          |                                      |
|----------|--------------------------------------|
| Jurado 3 | <b>Danyer Stewart Giron Palomino</b> |
|          | Nombre y Apellidos                   |

## Informe de Similitud

# Cruz Amelia Amaya Zegarra

## CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Asesores

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trncoid::1:3095648174

Fecha de entrega

28 nov 2024, 5:50 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

28 nov 2024, 5:59 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

Cruz\_Amaya\_24.11.2024\_Rev\_2.docx

Tamaño de archivo

3.7 MB

57 Páginas

9,664 Palabras

54,292 Caracteres




## 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **Dedicatoria**

Esta tesis la dedico a Dios por el don de la vida, a mis amados padres Victor y Silvia, por su amor y apoyo incondicional y por brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente; a mis hermanos Stephano y Guadalupe por motivarme a seguir adelante, a mi ángel guardián Misael por sus enseñanzas, amor incondicional, por lo que siempre vivirá en mi corazón.

## **Agradecimiento**

Agradezco a la Universidad Privada del Norte por brindarnos la oportunidad de poder concluir con esta etapa profesional; a mi asesor de Tesis el Mg. Ing. Danyer Stewart Girón Palomino, por su dedicación y conocimientos durante el desarrollo de esta Tesis. En reconocimiento a todo, el apoyo brindado a través de mis estudios y con la promesa de seguir siempre adelante.

**Tabla de contenidos**

|  |    |
|--|----|
| JURADO EVALUADOR.....  | 2  |
| Informe de Similitud .....   | 3  |
| Dedicatoria.....   | 4  |
| Agradecimiento.....  | 5  |
| Índice de tablas .....   | 7  |
| Índice de Figuras.....   | 8  |
| Resumen.....   | 9  |
| Palabras Claves .....  | 9  |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....   | 10 |
| CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....  | 18 |
| CAPÍTULO III: RESULTADOS.....  | 22 |
| 3.1. Definir cuál es la especie vegetal más adecuada a incluir en el diseño de humedal para el río Mashcón Cajamarca 2024..... | 22 |
| 3.2. Establecer criterios para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales.....                  | 27 |
| 3.3 Seleccionar el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.....    | 32 |
| 3.4 Diseño técnico para construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.....  | 39 |
| CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....   | 51 |
| REFERENCIAS.....   | 56 |
| ANEXOS .....   | 57 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Eficacia de cada especie en la remoción de nutrientes y metales</i> .....   | 23 |
| Tabla 2. <i>Eficiencia de las raíces en la rizosfera y su rol en la descomposición de compuestos orgánicos</i> .....                      | 24 |
| Tabla 3. <i>Adaptabilidad climática y resiliencia de las especies seleccionadas</i> ....  | 25 |
| Tabla 4. <i>Capacidad de cada especie para acumular contaminantes como su tasa de crecimiento</i> .....                                   | 26 |
| Tabla 5. <i>Topografía del terreno</i> .....  | 28 |
| Tabla 6. <i>Tipo de suelo y permeabilidad</i> .....   | 29 |
| Tabla 7. <i>Proximidad a la fuente de contaminación</i> .....   | 30 |
| Tabla 8. <i>Nivel freático y disponibilidad de agua</i> .....   | 30 |
| Tabla 9. <i>Accesibilidad y facilidad de mantenimiento</i> .....  | 31 |
| Tabla 10. <i>Impacto ambiental y compatibilidad con la biodiversidad local</i> .....  | 32 |
| Tabla 11. <i>Seleccionar el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024</i> ..... | 38 |
| Tabla 12. <i>Parámetros de calidad de agua registrados por estación de muestreo en el río Mashcón</i> .....                               | 40 |
| Tabla 13. <i>Constante cinética</i> .....   | 45 |
| Tabla 14. <i>Comparación de los resultados de los 3 métodos utilizados</i> .....  | 46 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Clasificación de los sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes líquidos ..... | 33 |
| Figura 2 Humedales de flujo superficial.....   | 34 |
| Figura 3 Humedales de flujo subsuperficial horizontal .....  | 35 |
| Figura 4 Humedales de flujo subsuperficial vertical .....  | 36 |
| Figura 5 Correlación carga – concentración de descarga .....   | 43 |
| Figura 6 Humedal subsuperficial con Carrizo - AutoCAD .....  | 48 |
| Figura 7 Ubicación del humedal construido en las riveras del río Mashcón.....                                    | 48 |

## Resumen

A nivel mundial el agua para consumo humano o riego están siendo contaminadas por el crecimiento de las poblaciones, la agricultura, la industria y por una mala gestión de los efluentes que se generan, por ello se desarrolló una propuesta técnica para la construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón, Cajamarca, 2024, ya que la implementación de humedales construidos es una gran alternativa eco amigable y restaura notoriamente los ecosistemas degradados o dañados. El estudio fue del tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo, nivel descriptivo y de diseño no experimental. Se consideró como población, los afluentes al río Mashcón cercanos a la ciudad de Cajamarca, y como muestra al monitoreo de un estudio de Palomino (2016) que tomó muestras en 5 puntos del río. Se recomienda *Phragmites australis* debido a que es una especie silvestre en Cajamarca y por su resistencia a la altitud (3000 msnm) proporciona una mayor superficie de rizosfera como zona de interacción ya que el clima puede influir en la temperatura y la humedad del suelo, lo que puede afectar la actividad microbiana, inclinación moderada (0-5%), una permeabilidad con tipo de suelo limoso o arenoso que facilite el drenaje y tenga proximidad a la fuente de contaminación a menos de 500 metros con fácil acceso. El tipo recomendado es el HC-HSS (humedal construido subsuperficial de flujo horizontal) que propicia nuevas áreas de esparcimiento, no genera insectos, permite la protección térmica, mayor tasa de reacción, permite una mayor interacción entre el agua y la vegetación, no requiere bombas ni sistemas de circulación, lo que reduce el consumo de energía y costo operativo. Finalmente, se estimó un área de 903 m<sup>2</sup> como área requerida para una población cercana de 100 personas.

## Palabras Claves

Palabras clave: Propuesta técnica, Humedales construidos, descontaminación

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Realidad problemática**

La contaminación de los recursos hídricos es una problemática extendida a nivel global, en la cual se observa un deterioro acelerado de los ecosistemas acuáticos debido a la actividad humana. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se estima que aproximadamente el 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento adecuado, afectando directamente la salud pública y el medio ambiente (ONU, 2021). Este problema no solo altera la calidad del agua, sino que también repercute en la biodiversidad acuática y en el bienestar de las comunidades que dependen de estos cuerpos de agua para su sustento y actividades diarias (Betancourt, 2024).

Diversos estudios han evidenciado que el uso indiscriminado de productos químicos, la urbanización y la deforestación contribuyen al aumento de contaminantes en los ríos y lagos de todo el mundo (World Health Organization [WHO], 2020). La biorremediación, que consiste en el uso de organismos vivos para eliminar o neutralizar contaminantes, se ha convertido en una estrategia clave para abordar esta problemática, siendo aplicada en distintos contextos con resultados prometedores, sin embargo, se requiere una mayor inversión en tecnologías sostenibles y una conciencia global sobre el uso responsable de los recursos hídricos para mitigar el impacto ambiental a largo plazo (Meter, 2019).

En muchos países, la contaminación de los ríos y fuentes de agua dulce ha motivado la implementación de políticas y programas orientados a la biorremediación y el uso de humedales artificiales como soluciones sostenibles (Gómez, 2019). En Estados Unidos, por ejemplo, la EPA ha promovido proyectos de humedales construidos que actúan como sistemas de tratamiento natural para reducir las concentraciones de contaminantes en cuerpos de agua afectados (Almache et al., 2019).

En Europa, la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea establece parámetros específicos para la restauración de cuerpos de agua mediante métodos de tratamiento natural, incluyendo el uso de humedales (European Commission, 2020). Este enfoque ecológico de remediación busca proteger tanto la salud humana como la biodiversidad. A pesar de estos esfuerzos, muchos ríos en países europeos siguen

enfrentando altos niveles de contaminación debido a la industrialización y la actividad agrícola intensiva, lo que subraya la necesidad de reforzar las normativas y promover una mayor adopción de tecnologías de biorremediación.

En el contexto peruano, la contaminación hídrica es una problemática creciente debido a la actividad minera, agrícola y urbana que se desarrolla en diversas regiones del país. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2022), muchos ríos presentan altos niveles de metales pesados y otros contaminantes como consecuencia del vertido de residuos industriales y agrícolas. Estas prácticas no solo deterioran la calidad del agua, sino que también generan riesgos significativos para la salud pública y afectan la biodiversidad local, al reducir la disponibilidad de recursos acuáticos seguros y saludables (Zevallos, 2024).

El gobierno peruano ha comenzado a implementar políticas para mitigar este problema mediante la biorremediación y el uso de humedales artificiales como soluciones sostenibles para la restauración de cuerpos de agua contaminados (Machaca, 2019). Sin embargo, la falta de financiamiento y una infraestructura adecuada limitan la eficacia de estas iniciativas en muchas áreas afectadas del país; a pesar de los esfuerzos realizados, aún persisten desafíos considerables para lograr una reducción efectiva de la contaminación en ríos clave en diversas regiones, lo cual resalta la necesidad de fortalecer las políticas ambientales (Hurtado y Tavares, 2021).

En la región de Cajamarca, los cuerpos de agua enfrentan una degradación permanente debido a factores como el vertido de aguas residuales domésticas e industriales, además de la escorrentía agrícola que transporta fertilizantes y pesticidas; estas prácticas han comprometido gravemente la calidad del agua en la región, generando preocupaciones entre las comunidades locales que dependen de estos recursos para su consumo y actividades económicas básicas. Según P. Palomino (2018), referente al Río Mashcón, se evidencia un fuerte grado de perturbación en el cuerpo de agua, por lo que se concluye que la calidad del agua es deficiente en el río Mashcón, en las estaciones de muestreo próximas a la zona urbana.

#### Antecedentes de investigación

Ordoñez et al. (2023) evaluaron un sistema de tratamiento que combina

biorremediación con microorganismos eficaces y humedales artificiales utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna gibba*, con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembre en Arequipa. La metodología incluyó la aplicación de microorganismos en diferentes concentraciones, seguida de un proceso de fitorremediación en humedales artificiales. Los resultados mostraron una reducción significativa de contaminantes, logrando un agua con calidad apta para ciertos usos industriales y agrícolas. Los autores concluyeron que el sistema combinado de biorremediación y fitorremediación es eficaz y tiene un potencial de aplicación amplio en la mejora de aguas industriales.

Ccarhuarupay et al. (2023) llevaron a cabo una investigación en sistemas de humedales mixtos artificiales para el tratamiento de aguas residuales de curtiembre en el Parque Industrial Río Seco, Arequipa. Con el objetivo de analizar la efectividad de los microorganismos eficaces y la fitorremediación en la remoción de metales pesados y otros contaminantes, los autores implementaron humedales artificiales que combinan bacterias y plantas específicas en un diseño experimental. Los resultados indicaron que el sistema redujo significativamente los contaminantes, concluyendo que estos métodos mixtos son viables para mejorar la calidad del agua residual en entornos industriales similares.

González (2022) en Amarilis, Huánuco, se centró en evaluar un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales en instituciones educativas. El objetivo fue medir la efectividad de este humedal en la reducción de parámetros microbiológicos, químicos y físicos. La metodología consistió en implementar el humedal y realizar un seguimiento exhaustivo de los parámetros del agua antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron una disminución significativa de contaminantes, destacando la efectividad del sistema en la mejora de la calidad del agua residual. La investigación concluye que los humedales artificiales con *Phragmites australis* representan una alternativa práctica y económica para el tratamiento de aguas en espacios educativos.

Salinas (2023) comparó dos tipos de humedales artificiales, uno con *Phragmites australis* y otro con *Equisetum arvense*, para la remoción de coliformes de aguas residuales en Huánuco. El objetivo fue determinar cuál de las dos plantas era más eficaz en la eliminación de coliformes totales y termotolerantes. La investigación empleó un

diseño experimental en el que se midieron los niveles de coliformes en el agua antes y después del tratamiento en ambos humedales. Los resultados indicaron que ambos sistemas son efectivos, aunque cada planta mostró variaciones en la eficiencia. La conclusión destaca la versatilidad de las plantas acuáticas para la remoción de bacterias patógenas en aguas residuales.

Zimmer et al. (2018) realizaron una investigación en la Cordillera Blanca, implementando sistemas de biorremediación participativa para mitigar los efectos del drenaje ácido de roca. El objetivo fue evaluar la viabilidad de sistemas diseñados en colaboración con las comunidades locales para la mejora de la calidad del agua en zonas agrícolas afectadas. La metodología consistió en implementar sistemas que emplean materiales accesibles y técnicas de bajo costo. Los resultados mostraron que la calidad del agua mejoró significativamente, haciéndola adecuada para riego agrícola. Los autores concluyeron que la biorremediación participativa es una estrategia efectiva para el control del drenaje ácido en zonas vulnerables.

Sánchez et al. (2021) investigaron la eficiencia de humedales artificiales que utilizan *Schoenoplectus californicus* y *Nasturtium officinale* para tratar efluentes porcinos en Huancavelica, Perú. Con el objetivo de evaluar la capacidad de estas plantas para reducir contaminantes, los investigadores implementaron humedales con cada especie y midieron los contaminantes antes y después del tratamiento. Los resultados indicaron una alta eficiencia, logrando una remoción de más del 78% de contaminantes. Los autores concluyeron que ambos sistemas son efectivos, destacando el uso de plantas locales en la biorremediación.

### Bases teóricas

La biorremediación se ha posicionado como una de las alternativas más prometedoras para la descontaminación de ambientes afectados, dado su enfoque en aprovechar los procesos metabólicos naturales de microorganismos y plantas. En esta técnica, los microorganismos, como bacterias y hongos, pueden metabolizar una amplia gama de compuestos tóxicos, transformándolos en productos menos dañinos o incluso inofensivos para el ambiente.

Según la teoría de la biodegradación, los microorganismos degradan contaminantes a través de rutas metabólicas específicas, que varían en función de la naturaleza del contaminante y del tipo de microorganismo (Kumar & Chaturvedi, 2019). Los avances en genética y biotecnología han permitido identificar y potenciar organismos con alta capacidad de remediación, incluyendo bacterias que metabolizan hidrocarburos y hongos que degradan metales pesados.

Además, los estudios en biorremediación han demostrado que las propiedades y composición del suelo y agua también influyen significativamente en la eficiencia del proceso, ya que las condiciones óptimas permiten una mayor actividad enzimática y velocidad de biodegradación (Singh et al., 2021).

Dentro de la biorremediación, la bioestimulación y la bioaumentación son técnicas complementarias: La bioestimulación, que optimiza las condiciones ambientales para potenciar el crecimiento de microorganismos autóctonos, es ampliamente utilizada cuando el sitio de contaminación ya alberga organismos capaces de degradar los contaminantes; esta técnica se ha empleado exitosamente en la remediación de aguas residuales y suelos contaminados por hidrocarburos, al añadir nutrientes como nitrógeno y fósforo para favorecer el crecimiento bacteriano (Chen et al., 2019).

Por otro lado, la bioaumentación es una estrategia donde se introducen cepas microbianas específicas, adaptadas para la degradación de compuestos específicos y que no se encuentran naturalmente en el ambiente contaminado. Este enfoque es ideal en casos donde los contaminantes son particularmente persistentes o cuando los microorganismos autóctonos carecen de las capacidades necesarias para llevar a cabo la degradación.

Otra innovación significativa en biorremediación es el uso de consorcios microbianos, en los que se combinan varias especies de microorganismos que actúan sinérgicamente para degradar distintos componentes del contaminante (Joutey et al., 2018). Los consorcios microbianos han mostrado ser más efectivos en la biorremediación de contaminantes complejos, ya que cada microorganismo contribuye con enzimas específicas que aceleran la descomposición de los compuestos tóxicos.

Este enfoque ha sido validado en entornos altamente contaminados, como sitios

industriales y zonas mineras, donde los contaminantes suelen ser de naturaleza mixta y difícil degradación. Además, la incorporación de nanopartículas en biorremediación ha abierto nuevas oportunidades para incrementar la eficacia de esta técnica. Las nanopartículas actúan como portadoras de nutrientes y enzimas, mejorando la actividad de los microorganismos al facilitar la distribución de los nutrientes en el sitio contaminado, lo cual acelera los tiempos de remediación (Bhargava et al., 2020).

En paralelo, la construcción de humedales artificiales ha emergido como una técnica innovadora que emula los procesos naturales de los humedales para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas permiten el flujo de aguas a través de sustratos vegetales y microorganismos que, mediante procesos físicos, químicos y biológicos, eliminan de manera progresiva una variedad de contaminantes. Los humedales artificiales pueden diseñarse con flujo subsuperficial o superficial, según el tipo de contaminante y las condiciones ambientales del área (Vymazal, 2020).

Los humedales de flujo subsuperficial, por ejemplo, son ideales para la remoción de contaminantes orgánicos, ya que el agua fluye debajo de la superficie, proporcionando condiciones anaerobias que favorecen la actividad de bacterias descomponedoras. En cambio, los humedales de flujo superficial son eficaces para la eliminación de nutrientes, ya que el contacto directo del agua con el aire permite procesos de nitrificación y desnitrificación que reducen la concentración de compuestos de nitrógeno en el agua.

El rol de las plantas en los humedales artificiales es fundamental, ya que absorben nutrientes y estabilizan el sustrato, creando un ambiente favorable para el crecimiento de microorganismos. Las raíces de las plantas proporcionan una superficie de colonización para las bacterias y otros microorganismos, incrementando la actividad biológica en el sistema y mejorando la eficiencia en la eliminación de contaminantes (Ding et al., 2020).

La presencia de ciertas especies vegetales, como la caña común (*Phragmites australis*) y el lirio de agua (*Eichhornia crassipes*), ha demostrado ser particularmente efectiva en la remoción de metales pesados y nutrientes en aguas residuales domésticas e industriales.

Además, el desarrollo de modelos híbridos de humedales artificiales, que combinan flujos subsuperficiales y superficiales, permite mejorar la eficiencia de estos

sistemas en la eliminación de contaminantes múltiples, adaptándose a la variedad de contaminantes presentes en aguas residuales complejas (Mander et al., 2021).

El presente estudio se justifica debido a que presentará una alternativa técnica para aportar en la descontaminación del río Mashcón, que en particular, constituye un caso crítico en la ciudad de Cajamarca, al haber sido severamente afectado por estas fuentes de contaminación P. Palomino (2018); ya que los niveles de sustancias tóxicas y de material orgánico en sus aguas han afectado tanto a la biodiversidad como a la calidad de vida de las poblaciones circundantes, por ello esta situación subraya la necesidad de adoptar estrategias de biorremediación y la construcción de humedales para reducir la carga contaminante y mejorar la calidad del agua **en este importante cuerpo hídrico.**

## 1.2 Formulación del problema

### Pregunta General

¿Será posible hacer una propuesta técnica para la construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024?

### Preguntas Especificas

- ¿Cuáles son las especies vegetales más adecuadas para incluir en el diseño de humedal para el río Mashcón Cajamarca 2024?
- ¿Cuáles son los criterios para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales?
- ¿Cuáles será el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024?
- ¿Cuál será el diseño óptimo de humedal como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024??

## **Objetivos**

### **1.3 Objetivo General**

Diseñar técnicamente la construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.

### **Objetivos Específicos**

- Seleccionar cuál es la especie vegetal más adecuada a incluir en el diseño de humedal para el río Mashcón Cajamarca 2024
- Establecer criterios para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales.
- Elegir el tipo de humedal más apropiado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.
- Proponer un diseño técnico para construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.

### **1.4 Hipótesis**

La propuesta técnica para la construcción de humedales servirá como alternativa para la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La investigación según su finalidad es del tipo básica ya que busca generar conocimiento sobre estrategias de biorremediación y construcción de humedales para la descontaminación, sin enfocarse en resolver un problema específico de forma directa. Hernández y Mendoza (2018) sostienen que los estudios aplicados se centran en los procesos y en la aplicación inmediata de soluciones. Dada la esencia de todo proceso de investigación, tanto la investigación básica como la aplicada generan nuevos conocimientos. La diferencia está en el tipo de conocimiento generado (teórico o práctico) y el momento de aplicación (a corto o a largo plazo). En este orden de ideas, la investigación básica genera conocimientos teóricos sin importar su aplicación inmediata. Por su parte, la investigación aplicada también genera nuevos conocimientos de carácter práctico cuya aplicación puede ser inmediata o a corto plazo para la solución de problemas de diversa índole. Fidias G. y Arias-Odón (2024)

Este estudio adopta un enfoque cualitativo, dado que busca explorar y describir en profundidad las características, criterios y funcionamiento conceptual de los humedales como solución ecológica. Según Strauss y Corbin (2015), los estudios cualitativos permiten una interpretación detallada de los fenómenos y generan una comprensión holística del contexto.

El nivel es descriptivo porque se enfoca en caracterizar elementos específicos, como las especies de plantas adecuadas y los criterios de selección del sitio para los humedales, sin manipulación de variables. Tal como señala Morales (2017), los estudios descriptivos tienen la función de delinear con precisión el estado actual de un fenómeno sin realizar inferencias causales.

Este diseño es no experimental, ya que no hay manipulación de variables o grupos de control. Se realiza una observación del fenómeno en su contexto natural. De acuerdo con Arias (2016), los estudios no experimentales se basan en la observación y el análisis de situaciones tal y como ocurren, sin intervención del investigador.

La población de estudio son todos los humedales construidos que tratan los afluentes contaminantes que dañan los ríos aledaños. Según Hernández y Mendoza (2018), la población en un estudio es el conjunto completo de elementos o casos a partir de los cuales se desea obtener conclusiones.

La muestra fue seleccionada por conveniencia; la muestra por conveniencia implica la selección de elementos de la población que son fáciles de acceder o están disponibles. Este método es útil cuando se desea obtener una muestra rápida y económica. Sin embargo, este tipo de muestra puede no ser representativa de la población en su conjunto, Martínez (2019). Para el presente estudio se seleccionó por conveniencia la muestra, está consistió en cinco zonas específicas del río Mashcón tomado del estudio de efluentes que realizó Palomino (2016), las muestras de afluentes fueron seleccionadas estratégicamente para representar diferentes condiciones y niveles de contaminación; esta selección permite un análisis focalizado y detallado de las condiciones de cada zona, facilitando una propuesta de biorremediación adaptada. Dichos efluentes fueron los datos de entrada para hacer la propuesta técnica para la construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón.

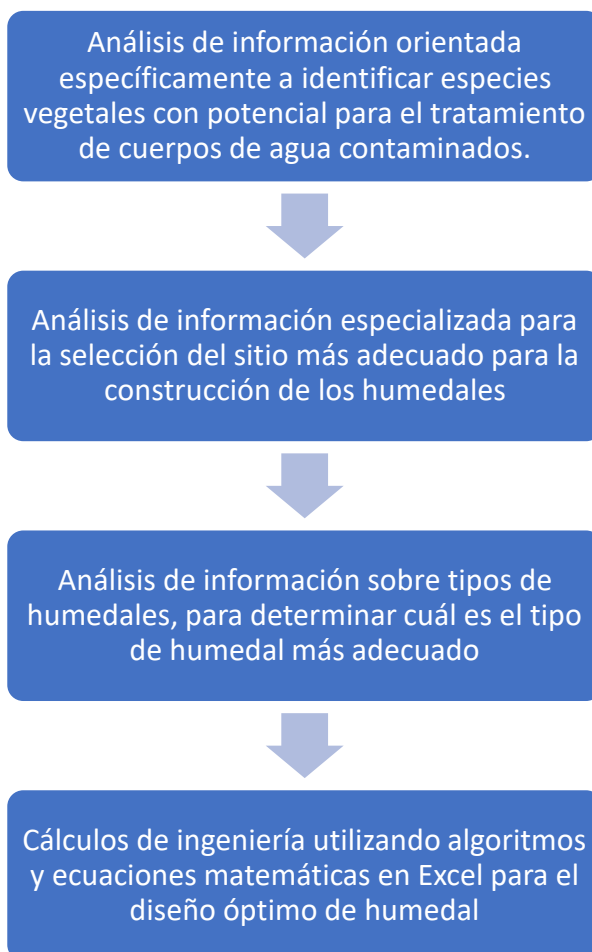
En cuanto a las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos la técnica empleada fue el **análisis documental**, ya que este método permite examinar documentos relevantes, como estudios previos, normativas ambientales y datos históricos, para fundamentar la propuesta de biorremediación y construcción de humedales. Según Pérez

y Sánchez (2018), el análisis documental es adecuado cuando se requiere una comprensión profunda de contextos o antecedentes a partir de fuentes escritas, siendo útil para extraer y organizar información que respalde los objetivos del estudio.

El procedimiento de recolección de datos comenzó con la consulta exhaustiva de bibliografía especializada en biorremediación y construcción de humedales (Motores de búsqueda de Google Scholar), orientada específicamente a identificar especies vegetales con potencial para el tratamiento de cuerpos de agua contaminados; revisando estudios previos y fuentes científicas que analizaron la efectividad de diversas especies en la absorción de contaminantes, con el objetivo de proponer aquellas más adecuadas para el diseño del humedal en el contexto del río Mashcón; posteriormente se revisó información especializada para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales; con la información previa se pudo determinar cuál es el tipo de humedal más adecuado, finalmente se determinó a través de cálculos de ingeniería utilizando calculadoras y Excel el diseño óptimo de humedal el cual pueda ser una alternativa técnica para la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca.

El procedimiento desarrollado en el análisis de datos fue la aplicación de ecuaciones matemáticas aplicadas al diseño de humedales, aplicaciones de formas gráficas para el dimensionamiento de humedales y el uso de regresiones matemáticas para la estimación del tamaño de humedales.

Grafico secuencial del desarrollo del proceso de recolección y análisis de datos



Este estudio se llevó a cabo siguiendo estrictos principios éticos y de responsabilidad ambiental, conforme a la normativa APA, garantizando que no existiera plagio en el desarrollo de los contenidos. Además, se observó rigurosamente el protocolo ético establecido por la Universidad Privada del Norte (UPN), que exige integridad académica y respeto por los derechos de autor en la recopilación y presentación de información. La recolección de datos se realizó mediante métodos no invasivos, respetando el ecosistema del río Mashcón y sin generar alteraciones en las zonas seleccionadas para el análisis. Asimismo, se protegió la confidencialidad de los datos y documentos empleados, utilizándolos únicamente con fines académicos y de investigación.

## **CAPÍTULO III: RESULTADOS**

### **3.1. Definir cuál es la especie vegetal más adecuada a incluir en el diseño de humedal para el río Mashcón Cajamarca 2024.**

El primer objetivo específico fue la selección de especies vegetales para el diseño de humedales construidos destinados a la depuración de contaminantes en los afluentes del río Mashcón en Cajamarca. Cada planta desempeña funciones específicas y complementarias que permiten construir un sistema de tratamiento robusto, resiliente y adaptado a las características del agua local, por lo tanto, la selección de la especie es fundamental para el funcionamiento y éxito del diseño.

A continuación, se analizan las características, capacidades y roles de cada una de las especies seleccionadas para asegurar su óptimo desempeño en la remoción de nutrientes y/o metales pesados, así como en la creación de un hábitat adecuado para el soporte de microorganismos y la biodiversidad en general.

#### **Rol de las plantas en la remoción de nutrientes y metales pesados**

En los humedales construidos, las plantas actúan como filtros biológicos que capturan nutrientes y metales pesados a través de sus raíces, tallos y hojas. Esta capacidad de absorción es esencial para mitigar los efectos negativos de nutrientes en exceso, como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que pueden provocar eutrofización y deterioro de la calidad del agua O. Delgadillo et. al. (2010). A continuación, se presenta una tabla detallada que muestra la eficacia de cada especie en la remoción de nutrientes y metales específicos.

**Tabla 01**
*Eficacia de cada especie en la remoción de nutrientes y metales*

| <b>Especie vegetal</b>      | <b>Remoción de N y P (mg/kg)</b> | <b>Remoción de metales pesados (mg/kg)</b> | <b>Capacidad de absorción en raíces (%)</b> | <b>Eficiencia en purificación de agua (%)</b> |
|-----------------------------|----------------------------------|--|---|---|
| <i>Phragmites australis</i> | 50-70                            | Pb: 200, Zn: 150, Cd: 80                   | 75  | 85  |
| <i>Typha latifolia</i>      | 30-50                            | Cu: 120, Zn: 90                            | 65  | 75  |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | 60-80                            | Hg: 180, Cd: 100                           | 80  | 88  |
| <i>Scirpus spp.</i>         | 40-60                            | Cd: 140, Pb: 100, Cr: 90                   | 70  | 80  |

*Nota:* Tomado de O. Delgadillo et. al. (2010)

La tabla revela que *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis* tienen una alta capacidad de remoción tanto de nutrientes como de metales pesados, lo que permite su aplicación en zonas de alta carga contaminante. Estos valores indican su efectividad para retener contaminantes en sus tejidos sin mostrar efectos tóxicos, una característica crítica para el mantenimiento a largo plazo del humedal. Asimismo, *Typha latifolia* y *Scirpus spp.* presentan buenos niveles de remoción de metales pesados, lo que complementa la funcionalidad de especies como *Eichhornia crassipes*, especialmente en la retención de elementos más tóxicos, como el mercurio (Hg) y el cadmio (Cd), los cuales pueden ser persistentes en el agua y tienen altos niveles de toxicidad.

### **Interacción de las plantas con microorganismos: Creación de la rizosfera**

Las raíces de estas plantas no solo absorben nutrientes y metales, sino que también crean un entorno favorable para los microorganismos que contribuyen a la biodegradación de compuestos orgánicos. Este espacio, denominado rizosfera, es clave para la depuración, ya que en él se desarrollan procesos de nitrificación y desnitrificación que transforman el nitrógeno en formas menos contaminantes. *Phragmites australis*,

debido a su denso sistema de raíces, genera una extensa área de contacto para la colonización de bacterias aerobias y anaerobias, lo que potencia los procesos de descomposición de compuestos orgánicos complejos como los hidrocarburos (Mander et al., 2021).

**Tabla 2**

*Eficiencia de las raíces en la rizosfera y su rol en la descomposición de compuestos orgánicos*

| <b>Especie vegetal</b>      | <b>Longitud de raíces (cm)</b> | <b>Superficie de rizosfera (cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Actividad microbiana (UFC/g)</b> | <b>Tipo de procesos de biodegradación</b> |
|-----------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| <i>Phragmites australis</i> | 50-70                          | 3500  | 10 <sup>5</sup>                     | Aerobio y anaerobio                       |
| <i>Typha latifolia</i>      | 30-50                          | 2500  | 8 x 10 <sup>4</sup>                 | Principalmente aerobio                    |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | Flotante                       | 2000  | 6 x 10 <sup>4</sup>                 | Aerobio                                   |
| <i>Scirpus spp.</i>         | 40-60                          | 3000  | 9 x 10 <sup>4</sup>                 | Aerobio y anaerobio                       |

Nota: Tomado de (Mander et al., 2021)

La tabla 2 muestra que *Phragmites australis* y *Scirpus spp.* proporcionan una mayor superficie de rizosfera, lo que facilita la colonización de microorganismos especializados en la descomposición de contaminantes. La actividad microbiana, medida en unidades formadoras de colonias (UFC/g), es un indicador de la capacidad de las plantas para soportar poblaciones bacterianas robustas que contribuyen a la depuración. Las bacterias aerobias y anaerobias en la rizosfera descomponen compuestos orgánicos complejos, como amoníaco y nitratos, transformándolos en gases como nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), que es inofensivo para el ambiente.

### Adaptabilidad de las especies a condiciones locales de Cajamarca

Para asegurar la sostenibilidad del sistema de humedales, es esencial que las especies vegetales seleccionadas sean capaces de resistir las condiciones ambientales de la región. En Cajamarca, la altitud y las variaciones climáticas imponen desafíos específicos para las especies vegetales. *Phragmites australis* y *Scirpus spp.* presentan una alta tolerancia a estos factores, lo que garantiza su crecimiento y eficiencia en entornos de montaña y con fluctuaciones de temperatura.

**Tabla 3**

*Adaptabilidad climática y resiliencia de las especies seleccionadas*

| <b>Especie vegetal</b>      | <b>Resistencia a altitud (m.s.n.m)</b> | <b>Tolerancia a variaciones de pH</b> | <b>Tolerancia a fluctuaciones de temperatura</b> | <b>Recomendación de uso</b> |
|-----------------------------|--|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| <i>Phragmites australis</i> | Hasta 3000                             | 5.5-8.0                               | Alta ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ )                | Principal                   |
| <i>Typha latifolia</i>      | Hasta 2500                             | 6.0-7.5                               | Moderada   | Secundaria                  |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | Hasta 1800                             | 6.5-8.0                               | Baja (requiere clima cálido)                     | Controlada                  |
| <i>Scirpus spp.</i>         | Hasta 3000                             | 5.5-8.0                               | Alta ( $\pm 15^{\circ}\text{C}$ )                | Principal                   |

La capacidad de *Phragmites australis* y *Scirpus spp.* para tolerar variaciones en el pH y temperatura permite que estas especies actúen como pilares del sistema, resistiendo las condiciones de altitud en Cajamarca. Por otro lado, *Eichhornia crassipes*, aunque efectiva en la remoción de metales, requiere de un control constante debido a su rápido crecimiento y su tolerancia limitada a cambios de temperatura. Esto hace que su uso sea

más adecuado en áreas de flujo superficial o donde se puedan establecer barreras físicas para controlar su expansión.

### Gestión de biomasa y frecuencia de mantenimiento

El mantenimiento regular de las plantas en los humedales es necesario para evitar la acumulación excesiva de contaminantes en sus tejidos, lo que podría reintroducir los metales pesados en el sistema cuando las plantas mueren. El esquema de mantenimiento debe considerar tanto la capacidad de cada especie para acumular contaminantes como su tasa de crecimiento.

**Tabla 4**

*Capacidad de cada especie para acumular contaminantes como su tasa de crecimiento*

| <b>Especie vegetal</b>      | <b>Frecuencia de cosecha</b> | <b>Gestión de biomasa</b>                    | <b>Capacidad de acumulación de metales (mg/kg)</b> | <b>Método de eliminación</b> |
|-----------------------------|------------------------------|--|--|------------------------------|
| <i>Phragmites australis</i> | Semestral                    | Extracción controlada de biomasa contaminada | Pb: 200, Zn: 150, Cd: 80                           | Compostaje seguro            |
| <i>Typha latifolia</i>      | Anual                        | Extracción de partes saturadas               | Cu: 120, Zn: 90                                    | Compostaje regular           |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | Trimestral                   | Eliminación de plantas sobrepobladas         | Hg: 180, Cd: 100                                   | Control y retiro             |
| <i>Scirpus spp.</i>         | Anual                        | Retiro de plantas maduras                    | Cd: 140, Pb: 100, Cr: 90                           | Compostaje seguro            |

Las especies con alta capacidad de acumulación, como *Phragmites australis* y *Scirpus spp.*, requieren cosechas semestrales para extraer la biomasa saturada de contaminantes,

especialmente metales pesados. *Eichhornia crassipes*, por su rápido crecimiento y alta acumulación de mercurio, necesita un control más frecuente para evitar su proliferación excesiva. Estas plantas deben eliminarse de forma segura para evitar la liberación de contaminantes.

Finalmente se recomienda *Phragmites australis* debido a que es una especie silvestre en Cajamarca, por su resistencia a la altitud (3000 msnm) y porque proporcionan una mayor superficie de rizosfera, lo que facilita la colonización de microorganismos especializados en la descomposición de contaminantes.

### **3.2. Establecer criterios para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales.**

En el segundo objetivo específico se planificó establecer criterios para la selección del sitio adecuado para la construcción de humedales construidos destinados a la depuración del río Mashcón en Cajamarca, se deben considerar factores que influyen en la operatividad y efectividad del sistema de tratamiento. Cada criterio a continuación se desarrolla con especificidad para maximizar el rendimiento y minimizar el impacto ambiental.

#### *1. Topografía del terreno*

La pendiente y la estabilidad del terreno son factores determinantes en el diseño de humedales construidos. Idealmente, el terreno debe tener una pendiente moderada (entre 0-5%), lo que facilita el flujo natural de agua sin requerir estructuras adicionales para controlar su dirección. Terrenos planos pueden dar lugar a acumulaciones de agua y zonas de estancamiento que favorecen el crecimiento de algas y la proliferación de mosquitos, factores que reducen la eficiencia del humedal.

En términos de estabilidad, el terreno debe ser resistente a la erosión, especialmente en condiciones de humedad constante. Esto es fundamental para evitar que el sustrato o los bordes del humedal se degraden con el tiempo. Los suelos compactos y con bajo riesgo de erosión son preferibles para mantener la integridad estructural del sistema. Un análisis geotécnico es recomendable para confirmar que el terreno cumple con estos requisitos (Vymazal, 2020).

**Tabla 5**

*Topografía del terreno*

| <b>Criterio</b>       | <b>Descripción</b>                               | <b>Especificación</b> |
|-----------------------|--|-----------------------|
| Pendiente del terreno | Grado de inclinación del terreno                 | Moderada (0-5%)       |
| Riesgo de erosión     | Propensión a la erosión bajo condiciones húmedas | Baja                  |
| Estabilidad del suelo | Capacidad para soportar estructuras y plantas    | Alta estabilidad      |

*Nota: Modificado de (Vymazal, 2020).*

*2. Tipo de suelo y permeabilidad*

El tipo de suelo es crucial, ya que afecta la capacidad del humedal para filtrar y retener agua. Los suelos limosos y arenosos, que tienen buena permeabilidad, son ideales, ya que permiten un flujo adecuado de agua a través del sistema sin provocar saturación ni estancamiento. Este flujo uniforme es esencial para asegurar la interacción efectiva entre las raíces de las plantas y el agua contaminada.

Además, el suelo debe ser capaz de mantener una humedad adecuada para soportar la vegetación acuática. La capacidad de retención del suelo, medida en términos de capacidad de campo, debe estar en un rango que permita el suministro continuo de agua

a las plantas sin crear condiciones anaerobias excesivas, que pueden reducir la eficiencia de los procesos de biodegradación. Los suelos arcillosos, aunque tienen alta capacidad de retención, suelen tener baja permeabilidad y deben evitarse en la medida de lo posible (Ding et al., 2020).

**Tabla 6**

*Tipo de suelo y permeabilidad*

| <b>Criterio</b>        | <b>Descripción</b>               | <b>Especificación</b> |
|------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Tipo de suelo          | Textura y permeabilidad          | Limoso o arenoso      |
| Capacidad de retención | Habilidad para retener humedad   | Moderada a alta       |
| Drenaje                | Flujo del agua sin estancamiento | Buen drenaje          |

Nota: Tomado de (Ding et al., 2020).

*3. Proximidad a la fuente de contaminación*

La eficiencia del humedal aumenta cuando se ubica cerca de la fuente de contaminación. Al situarlo a menos de 500 metros de la descarga del río Mashcón, el humedal puede interceptar contaminantes antes de que se dispersen aguas abajo, lo que maximiza su impacto en la mejora de la calidad del agua. Además, un sitio cercano a la fuente permite reducir la infraestructura necesaria para canalizar el agua al humedal.

Este criterio incluye también considerar el flujo y volumen de agua contaminada que llega al humedal. Un caudal continuo es esencial para asegurar un tratamiento constante y efectivo. Por lo tanto, el sitio debe estar ubicado de manera que el humedal reciba un flujo regulado, evitando posibles sobrecargas que podrían afectar su capacidad de tratamiento (Vymazal & Kröpfelová, 2018).

**Tabla 7**

*Proximidad a la fuente de contaminación*

| <b>Criterio</b>       | <b>Descripción</b>                      | <b>Especificación</b> |
|-----------------------|---|-----------------------|
| Distancia a la fuente | Cercanía al punto de descarga           | Menos de 500 metros   |
| Caudal de agua        | Volumen y continuidad del flujo de agua | Flujo continuo        |
| Accesibilidad al agua | Facilidad de acceso directo             | Canalización mínima   |

Nota: Tomado de (Vymazal & Kröpfelová, 2018).

*4. Nivel freático y disponibilidad de agua*

El nivel freático, o profundidad del agua subterránea, debe ser suficientemente cercano a la superficie para mantener condiciones húmedas en el humedal sin necesidad de un sistema de bombeo. Un nivel freático entre 1 y 2 metros es ideal, ya que proporciona una fuente de agua constante sin que esta se eleve demasiado y provoque estancamientos.

En la construcción de un humedal, la disponibilidad de agua es crítica. El sitio debe contar con un suministro de agua constante, especialmente en estaciones secas, para mantener la vegetación en condiciones óptimas. Esto asegura que las plantas acuáticas no se vean sometidas a estrés hídrico y mantengan su capacidad de depuración (Ding et al., 2020).

**Tabla 8**

*Nivel freático y disponibilidad de agua*

| <b>Criterio</b>        | <b>Descripción</b>                                    | <b>Especificación</b> |
|------------------------|---|-----------------------|
| Nivel freático         | Profundidad de la capa de agua subterránea            | Entre 1 y 2 metros    |
| Disponibilidad de agua | Constancia de suministro, incluso en estaciones secas | Permanente            |
| Necesidad de bombeo    | Requerimiento de sistemas de bombeo                   | Ninguno o mínimo      |

Nota: Tomado de (Ding et al., 2020).

*5. Accesibilidad y facilidad de mantenimiento*

La accesibilidad del sitio es un factor esencial para el mantenimiento y monitoreo del humedal, actividades críticas para su funcionamiento continuo. Se recomienda que el sitio esté cerca de caminos accesibles para el personal de mantenimiento, lo que permite la cosecha de biomasa contaminada y la revisión periódica de las condiciones del humedal.

Además, el sitio debe permitir la instalación de equipos de monitoreo, como sensores para medir la concentración de contaminantes y el nivel de agua. La proximidad a infraestructuras de servicios, como caminos de acceso, minimiza los costos de transporte y facilita el manejo de biomasa y la reposición de plantas según sea necesario (Liu et al., 2022).

**Tabla 9**

*Accesibilidad y facilidad de mantenimiento*

| <b>Criterio</b>             | <b>Descripción</b>                           | <b>Especificación</b> |
|-----------------------------|--|-----------------------|
| Acceso a infraestructura    | Cercanía a caminos y accesos                 | Accesible             |
| Frecuencia de mantenimiento | Necesidad de visitas y supervisión           | Acceso semanal        |
| Instalación de equipos      | Espacio para sensores y equipos de monitoreo | Alta disponibilidad   |

Nota: Tomado de (Liu et al., 2022).

### 6. Impacto ambiental y compatibilidad con la biodiversidad local

El sitio debe minimizar el impacto ambiental y preservar la biodiversidad local. Es ideal ubicar el humedal en áreas donde no se afecten especies nativas o sensibles. Asimismo, el diseño del humedal debe incluir áreas que promuevan la biodiversidad, como franjas de vegetación nativa, para crear un hábitat que sea favorable para la fauna y flora locales.

Este enfoque asegura que el humedal no solo funcione como sistema de depuración de agua, sino que también actúe como un ecosistema auxiliar que fortalezca la biodiversidad de la región. El sitio debe elegirse de forma que el impacto sobre la flora y fauna autóctonas sea mínimo y permita la integración del humedal al ecosistema circundante sin alterarlo (Vymazal, 2020).

**Tabla 10**

*Impacto ambiental y compatibilidad con la biodiversidad local*

| <b>Criterio</b>                  | <b>Descripción</b>                          | <b>Especificación</b> |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| Impacto ecológico                | Minimización de alteración en flora y fauna | Bajo                  |
| Fomento de biodiversidad         | Integración de hábitats adicionales         | Alta                  |
| Compatibilidad con el ecosistema | Adaptación a la biodiversidad local         | Compatible            |

Nota: Tomado de (Vymazal, 2020).

### 3.3 Seleccionar el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.

Como tercer objetivo específico se propuso la selección del tipo de humedal más adecuado, para lograr el objetivo se define que los humedales construidos se clasifican como sigue:

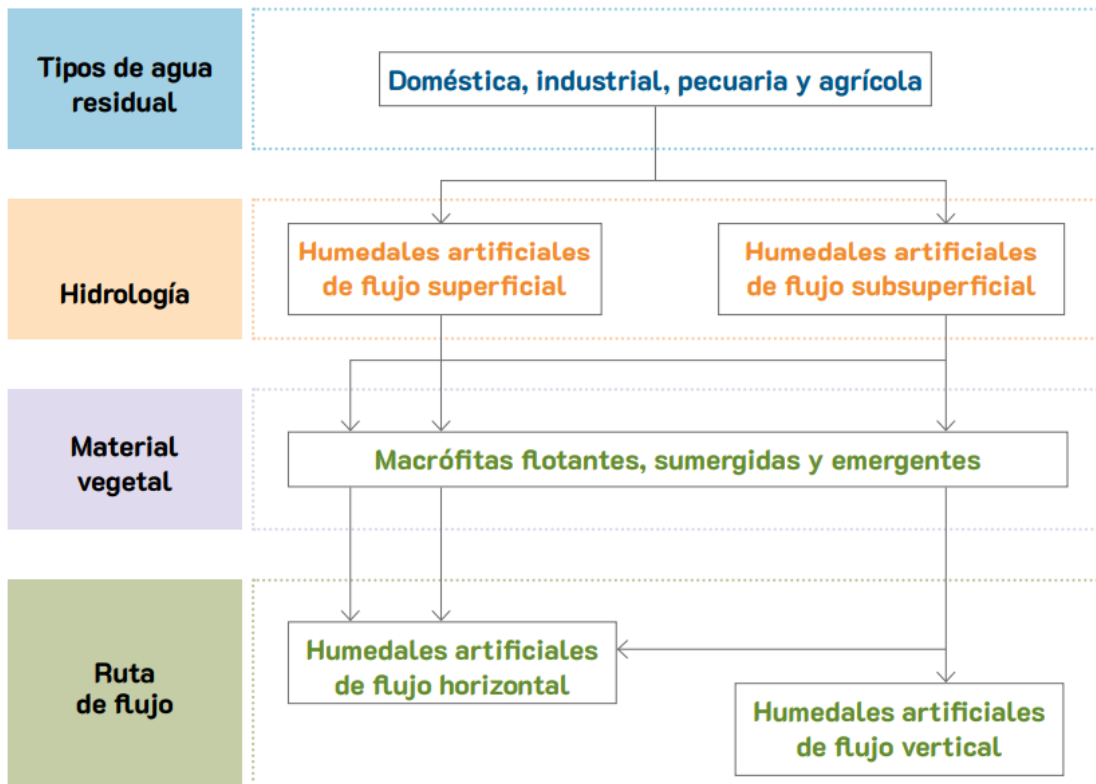
Vymazal (1998), sugiere una clasificación de acuerdo con las características del material vegetal predominante en los lechos, así se tiene:

- a) Humedales construidos, basados en macrófitas flotantes. Ej.: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), Lenteja de agua (*Lemna minor*).
- b) Humedales construidos, basados en macrófitas de hojas flotantes. Ej.: Lirio de agua (*Nymphaea alba*), Espiga de agua (*Potamogeton gramineus*).
- c) Humedales construidos, con macrófitas sumergidas. Ej.: Litorela (*Littorella uniflora*), Rizos de agua (*Potamogeton crispus*).
- d) Humedales construidos, con macrófitas emergentes. Ej.: Totorá (*Thypha latifolia*), Carrizos (*Phragmites australis*)

Para el caso de nuestro estudio y en concordancia con lo revisado en la parte 3.1 se confirma que la especie vegetal que se usará para el diseño Carrizos (*Phragmites australis*)

### **Figura 1**

*Clasificación de los sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes líquidos.*



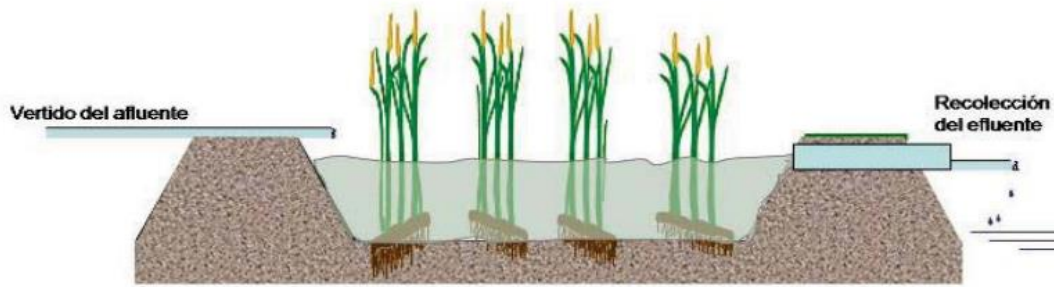
Nota Adaptado de Wallace y Knight (2006), A. Gonzales et al..

### Humedales de flujo superficial

En los sistemas de flujo superficial el agua está directamente expuesta a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas, tal y como se muestra en la siguiente figura. Estos humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural, con una profundidad de la lámina de agua de entre 0.3-0.4 m y con vegetación

### Figura 2

*Humedales de flujo superficial*



Nota: Tomado de *Humedales con flujo superficial de flujo horizontal*. Serrano & Corzo Hernández, (2008)

### **Humedales de flujo subsuperficial.**

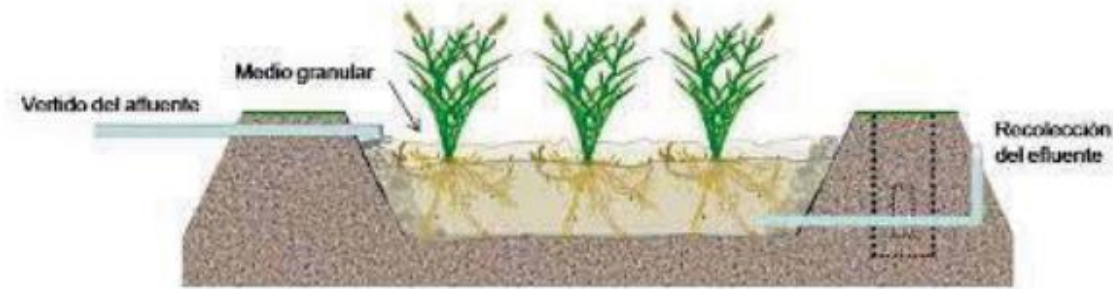
En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular (arena, grava, gravilla) y en contacto con las raíces y los rizomas de las plantas. Serrano, Corzo, Hernández, (2008).

Humedales subsuperficiales con flujo horizontal (FHSS), en estos tipos de sistemas, la alimentación se efectúa de forma continua, aunque también pueden funcionar de forma intermitente si fuese necesario.

El agua circula de forma horizontal a través del medio granular, los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentre entre 0,05 y 0,2 m por debajo de la superficie).

### **Figura 3**

*Humedales de flujo subsuperficial horizontal*



Nota: *Humedales con flujo subsuperficial de flujo horizontal. Serrano & Corzo Hernández, (2008)*

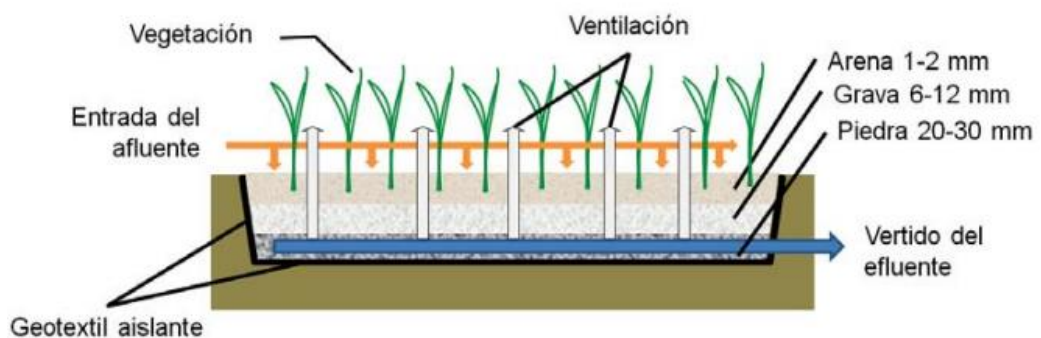
### Humedales subsuperficiales de flujo vertical

En los humedales de flujo subsuperficiales de flujo vertical, la alimentación se efectúa de forma intermitente, para lo que se recurre generalmente al empleo de bombes, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado.

El agua circula verticalmente a través del medio granular del orden de 0,5-0,8 m de espesor en el que se fija la vegetación. En el fondo de estos humedales una red de drenaje permite la recogida de los efluentes depurados. A esta red de drenaje se conecta un conjunto de conductos, que sobresalen de la capa de áridos y sirven para airear el lecho en profundidad, favoreciendo así los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.

**Figura 4**

*Humedales subsuperficial de flujo vertical*



Nota: *Tomado de Humedales con flujo superficial de flujo vertical. Serrano & Corzo Hernández, (2008)*

De acuerdo con la bibliografía, es más común el uso de los humedales con diseño tipo subsuperficial, dado que estos presentan ventajas en comparación a los humedales de tipo superficial tales como: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), restricción del contacto directo con personas a las aguas residuales Boano (2020), disminución de la aparición de insectos (Serrano & Corzo Hernández, 2008) y de olores debido a la naturaleza subterránea del flujo Álvarez et al (2005). Otro parámetro importante y en especial para la ciudad de Cajamarca, debe ser el área superficial, Vidal y Hormazábal (2018) indican que los humedales son sistemas de bajo costo de operación y mantenimiento, pero se requiere una extensa superficie por habitante para su instalación, que no se encuentra fácilmente en zonas urbanas.

A continuación, se presenta los criterios más relevantes para elegir el tipo de humedal a diseñar:

- Exposición de la superficie
- Tasa de reacción
- Área de humedal
- Nuevos Hábitats
- Aparición de insectos
- Aves acuáticas
- Contacto con personas
- Protección térmica
- Costo
- Facilidad de construcción
- Generación de olores

**Tabla 11**

*Seleccionar el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024*

| <b>Variable</b>            | <b>HC-HS</b> | <b>HC-HSS</b>       | <b>HC-HV</b> | <b>Comentarios</b>  |
|----------------------------|--------------|---------------------|--------------|---|
| Exposición a la Superficie | Acuosa       | <b>suelo sólido</b> | suelo sólido | Flujo subsuperficial genera áreas libres y suelo sólido                               |
| Tasa de reacción           | Menor        | <b>Mayor</b>        | Mayor        | La superficie de contacto con la grava acelera las reacciones químicas HC-HSS y HC-HV |
| Área de humedal            | Mayor        | Menor               | Menor        | Mayor superficie de contacto reduce el área superficial en HC-HSS y HC-HV             |
| Nuevos Hábitats            | Mayor        | Menor               | Menor        | Ventaja para HC-HS, la humedad genera nuevos hábitats                                 |
| Aparición de insectos      | Mayor        | <b>Menor</b>        | Menor        | Ventaja para HC-HSS y HC-HV, debido a que no se fomenta la presencia de mosquitos     |
| Aves acuáticas             | Mayor        | Menor               | Menor        | Ventaja para HC-HS, la humedad genera hábitats para aves acuáticas                    |
| Contacto con personas      | Menor        | <b>Mayor</b>        | Mayor        | Ventaja para HC-HSS y HC-HV, debido que presenta áreas libres de esparcimiento        |
| Protección térmica         | Menor        | <b>Mayor</b>        | Mayor        | Ventaja para HC-HSS y HC-HV, debido que presenta una protección térmica               |
| Costo                      | Menor        | <b>Mayor</b>        | Mayor        | Ventaja para HC-HS, menor costo de implementación                                     |
| Facilidad de construcción  | Menor        | Mayor               | Mayor        | Ventaja para HC-HS, menor facilidad de construcción                                   |
| Generación de olores       | Mayor        | Menor               | Menor        | Ventaja para HC-HSS y HC-HV, debido a que los humedales con olores no son deseados    |

De acuerdo a la evaluación y las ventajas que indica se selecciona el humedal tipo HC-HSS, es decir el humedal construido subsuperficial de flujo horizontal

### **3.4 Diseño técnico para construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024**

El dimensionamiento y las características técnicas del humedal que requerimos construir dependen de la localización del humedal, lo cual fue desarrollado en el ítem 3.2 de las características climáticas de la zona donde se construirán, de la calidad y variaciones en el tiempo del flujo a tratar, de la calidad deseada del agua efluente después del tratamiento y de las restricciones de vertido de aguas tratadas exigidas por las autoridades locales.

Con respecto al diseño técnico de las estructuras del humedal y al dimensionamiento de los lechos, es frecuente el uso de ecuaciones de primer orden, de regresiones estadísticas desarrolladas a partir de información obtenida de bases de datos locales, el empleo de modelos numéricos empíricos y la asimilación de todo el sistema a una combinación de reactores de mezcla completa en serie. Las dimensiones obtenidas por estos métodos generan áreas mínimas de tratamiento, que dependen del contaminante que se quiera tratar, de la concentración original, del objetivo de calidad final, de la ubicación geográfica de la planta y de las condiciones climáticas. Posteriormente, el área de tratamiento obtenida debe ajustarse a una serie de recomendaciones que incluyen el área específica de tratamiento mínima por Persona Equivalente (PE), relación largo-ancho, profundidad y pendiente. Adicionalmente, se debe verificar que los medios filtrantes seleccionados (cuando se trate de humedales con flujo subsuperficial horizontal o vertical y los tecnificados) cumplan con ciertas características físicas, que incluyen porosidad, granulometría, conductividad hidráulica y resistencia mecánica del material de relleno. G. Vidal y S. Hormazábal (2018)

A continuación, se presenta en la Tabla 12, las características biológicas de las aguas, dicho estudio fue desarrollado al tomar muestras de las aguas del río Mashcón en 5 puntos a través de su recorrido en la ciudad de Cajamarca, se consideró un promedio de DBO<sub>5</sub>

Si consideramos un promedio de los valores de las 5 estaciones que evaluó Palomino (2016), 94, 7.7, 2.0, 9.4 y 2.0, tenemos un promedio de 23.0 de DBO<sub>5</sub> (grO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)

**Tabla 12**

*Parámetros de calidad de agua registrados por estación de muestreo en el río Mashcón*

| Parámetro   | Unidad              | Estación           |                    |      |       |      | ECA's   |
|---|---------------------|--------------------|--------------------|------|-------|------|---------|
|   |                     | E1                 | E2                 | E3   | E4    | E5   |         |
| Potencial de hidrógeno (pH)                       | pH                  | 7,10               | 7,08               | 7,25 | 7,30  | 7,40 | 6,5-8,4 |
| Conductividad eléctrica (CE)                      | μS/cm               | 746                | 446                | 424  | 423   | 419  | 2500    |
| Sólidos totales disueltos (TDS)                   | mg/L                | 520                | 310                | 300  | 300   | 290  | -       |
| Temperatura (T)                                   | °C                  | 19,5               | 17,5               | 16,8 | 15,2  | 14,0 | Δ 3     |
| Salinidad   | mg/L                | 360                | 210                | 190  | 190   | 200  | -       |
| Cloruro (Cl <sup>-</sup> )                        | mg/L                | 6,94               | 1,30               | 1,16 | 1,09  | 0,92 | 500     |
| Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )           | mg/L                | 0,41               | 1,59               | 1,15 | 0,91  | 0,96 | 100     |
| Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )          | mg/L                | 1,25               | 0,06               | 0,06 | 0,06  | 0,06 | -       |
| Sólidos suspendidos totales (SST)                 | mg/L                | 101,0              | 120,0              | 31,8 | 948,0 | 3,2  | -       |
| Oxígeno disuelto                                  | mg/L                | 5,69               | 5,79               | 6,30 | 6,59  | 6,93 | ≥4      |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) | mgO <sub>2</sub> /L | 94,0               | 7,7                | 2,0  | 9,4   | 2,0  | 15      |
| Demanda química de oxígeno (DQO)                  | mgO <sub>2</sub> /L | 250                | 26                 | 8    | 66    | 8    | 40      |
| Coliformes totales                                | NMP/100mL           | 92*10 <sup>3</sup> | 14*10 <sup>3</sup> | 7000 | 2000  | 1400 | -       |

*Nota:* Tabla tomada del artículo científico “Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016”, Palomino (2016).

### **Cálculo de la superficie total del humedal**

Para definir y calcular el área de la superficie total, se tienen diversos métodos de diseño, considerando que seleccionamos el humedal construido de flujo subsuperficial con flujo horizontal (HC-HSS), se tienen las:

- Áreas prescritas – conocidas como reglas generales
- Correlación carga – concentración de descarga – Forma gráfica
- Constantes de primer orden (Modelos de flujo pistón o de tanques en serie)

Como base de cálculo se considera lo siguiente:

- El objetivo en el agua de salida debe ser menor al ECA's: DBO<sub>5</sub> = 15mgO<sub>2</sub>/L.
- Generación promedio per cápita de aguas residuales de 150 L/(hab-d)
- El DBO<sub>5</sub>/hab-d : 23 grO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>
- El valor de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>/hab-d) será considerado el valor promedio de los valores medidos en la bibliografía, Palomino (2016): 23 grO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>

**a) Primer método Áreas prescritas – conocidas como reglas generales.**

Como regla general se tiene de acuerdo con la directriz danesa (Brix y Johansen, 2004) los humedales de HC-HSS deben tener un tamaño aproximado de  $5\text{m}^2/(\text{hab-Eq})$ , población que tomaremos como base de cálculo será de 100 habitantes:

Número de habitantes equivalentes : 100 hab-Eq

Tamaño aproximado de :  $5\text{m}^2/(\text{hab-Eq})$

Cálculo de área prescrita considerando las reglas generales danesas

$$A=100 \text{ hab-Eq} \times 5\text{m}^2/(\text{hab-Eq})=500\text{m}^2$$

Con un tamaño de  $5\text{m}^2/(\text{hab-Eq})$ , se espera una reducción del 90% en  $\text{DBO}_5$

Así la concentración final del efluente será:

$$\text{DBO}_5\text{F} = 0.1 \times 94 = 9.4 \text{ mg/L}$$

El valor anterior de  $500\text{m}^2$  es una aproximación inicial, no es un diseño, a continuación, se realizará cálculos más técnicos para y se comprobará el valor obtenido anteriormente.

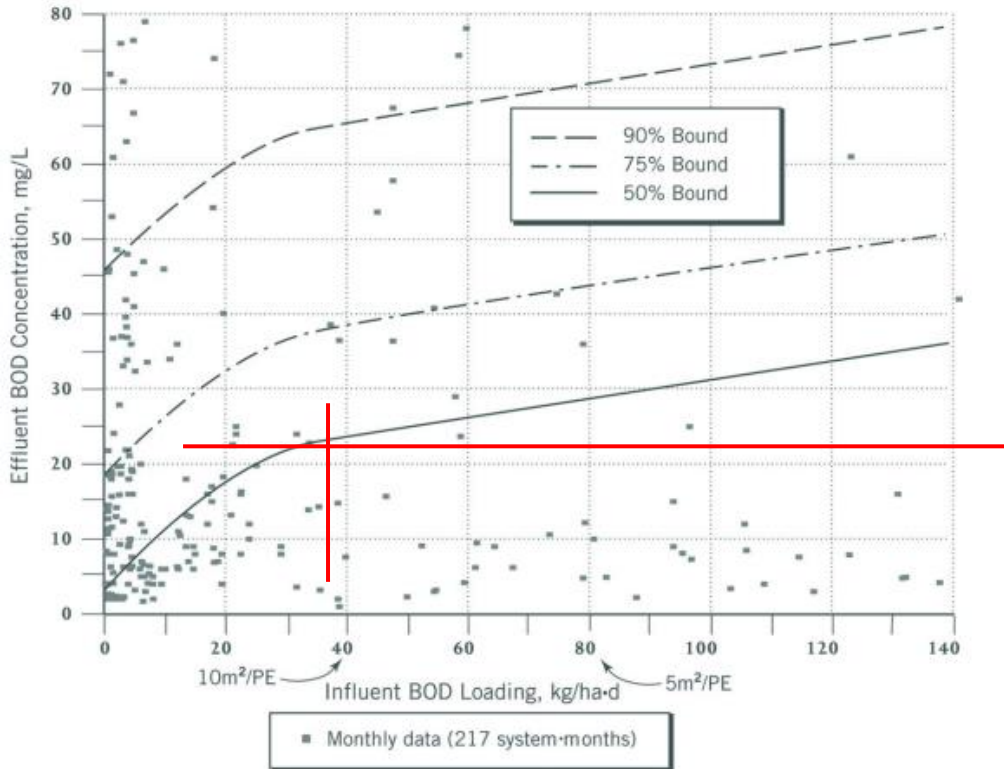
**b) Segundo método Correlación carga – concentración de descarga –  
Forma gráfica.**

El otro enfoque posible es el uso de gráficos de carga de masa DBO. El manual de diseño de humedales de tratamiento a pequeña escala escrito por Wallace y Knight (2006) se creó a partir de una recopilación de datos de calidad del agua de más de 1.500 humedales de tratamiento a pequeña escala en todo el mundo. Los datos se utilizaron para crear gráficos de dispersión que muestran las tasas de carga de masa del afluente frente a las concentraciones de efluente. Este manual de diseño fue el primero de su tipo que considera el concepto de tolerancia al riesgo en el diseño de humedales, Dotro et al. (2009)

Los gráficos de carga de Wallace y Knight (2006) proporcionan una visualización de la tolerancia al riesgo del diseño, incluidas las líneas que corresponden al percentil 50, 75 y 90 de los datos recopilados, ver la siguiente figura. Utilizando estos gráficos, se puede elegir el diseño de un nuevo humedal de tratamiento a pequeña escala en función de la tasa de carga de masa del afluente, la concentración de efluente deseada y la tolerancia al riesgo. Un diseño elegido en función del percentil 50 indica que un sistema cumpliría con la concentración de efluente deseada el 50% del tiempo. Se podría predecir que un diseño elegido en función de la línea del percentil 90 alcanzaría la concentración de efluente deseada el 90% del tiempo (por ejemplo, nueve veces de cada diez), pero requeriría un área mucho más grande. otro método que presentamos es el uso de gráficos de carga de masa.

**Figura 5**

*Correlación carga – concentración de descarga*



*Nota:* Tomado de Dotro et al. (2009), Wallace y Knight (2006).

Considerando que nosotros necesitamos un efluente de DBO5 de 15 mg/L y lo proyectamos al nivel de confiabilidad de 50%, posteriormente se proyecta desde el punto que intercepta a la curva de probabilidad al eje X, podemos encontrar el valor del influente

Del gráfico se obtiene la carga orgánica superficial de diseño:

$$21\text{kgDBO5/Ha-d}) \times 1000\text{g/kg} \times 1\text{Ha}/10,000\text{m}^2=2.1\text{gDBO5}/(\text{m}^2.\text{d})$$

Con este valor de carga total se puede estimar el área del sistema:

Considerando DBO5/hab-d : 23

$$\text{Carga total}=23 \text{ grDBO5/hab-d} \times 100\text{hab} = 2,300\text{grDBO5/d}$$

$$A=2,300 \text{ grDBO5/d}/2.1 \text{ gDBO5}/(\text{m}^2.\text{d})=1,095\text{m}^2$$

La desventaja principal de este método gráfico es que no toma en cuenta explícitamente los coeficientes de velocidades de reacción o de corrección en función de la temperatura, adicionalmente se puede comentar que no toma en cuenta las características de la población de Cajamarca.

**c) Tercer método Utilizando constantes de primer orden k.C\*.**

Este método último método es más técnico y toma en cuenta las cinéticas de reacción de primer orden y con una constante cinética, es también conocido en la química clásica como modelos de flujo pistón.

La constante cinética que se considera en la bibliográfica es:

Contaminante (DBO5) Tasa Cinética 25 (k(m/y)

A continuación, la ecuación que nos permite calcular el área superficial

$$\text{Area} = \frac{Q}{K} \ln \left[ \frac{C_{out}-C^{\circ}}{C_{in}-C^{\circ}} \right]$$

Donde:

Caudal = Q

Constante de primer orden = k

Concentración de entrada =C<sub>in</sub>

Concentración de salida =C<sub>out</sub>

Concentración de fondo =C<sup>o</sup>

Reemplazando en la ecuación los valores:

$$A = -\frac{5475m^3}{\frac{25m}{año}} \ln \left[ \frac{15 \frac{mg}{L} - 10 \frac{mg}{L}}{153.3 \frac{mg}{L} - 10 \frac{mg}{L}} \right] = 734.9 m^2$$

Obtenemos el área calculada de 734.9 m<sup>2</sup>, área mayor a la estimada según regla

de aplicación.

**d) Tercer método Utilizando constantes de primer orden P.k.C\*.**

Este modelo es conocido por ser de primer orden, y es una derivación de los modelos de flujo pistón de los tanques en serie:

$$\left[ \frac{C - C^*}{C_i - C^*} \right] = \frac{1}{(1 + k/Pq)^P} = \frac{1}{(1 + k_v\tau/P)}$$

**Donde:**

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>C=C<math>\omega</math>A</b> | Concentración efluente, mg /L   |
| <b>C<sub>I</sub></b>           | Concentración afluente, mg/L  |
| <b>C*</b>                      | Concentración de fondo, mg/L  |
| <b>k=k<sub>A</sub></b>         | Constante cinetica de primer orden por unidad de área, m/año                  |
| <b>P</b>                       | Numero aparente de tanques en serie NTIS (con meteorización del contaminante) |
| <b>q</b>                       | Carga hidráulica, m/año (Q/A)   |
| <b>k<sub>v</sub></b>           | Constante cinetica de primer orden basada en volumen, $\sigma^{-1}$           |
| <b>T</b>                       | Tiempo de retención hidráulico, días (Q/V)                                    |

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left( \frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}}$$

También utilizamos la misma constante cinética

**Tabla 13**

| Contaminante | Tasa Cinética<br>k(m/y) |
|--------------|-------------------------|
| DBO5         | 25                      |

$$A = -3 \cdot \frac{5475m^3}{\frac{25m}{año}} \left( \left[ \frac{153.3 \frac{mg}{L} - 10 \frac{mg}{L}}{15 \frac{mg}{L} - 10 \frac{mg}{L}} \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \right) = 902.5 m^2$$

Finalmente se muestra una comparación de los resultados del uso de los tres métodos en la siguiente Tabla 14

**Tabla 14**

*Comparación de los resultados de los 3 métodos utilizados*

| <b>Método utilizado para el cálculo de área superficial</b>                          | <b>Área (m2)</b> |
|--|------------------|
| Primer método Áreas prescritas – conocidas como reglas generales                     | 500.0            |
| Segundo método Correlación carga – concentración de descarga – Forma gráfica.        | 1,095.2          |
| Tercer método Utilizando constantes de primer orden (modelo flujo piston k.C*.)      | 734.9            |
| Tercer método Utilizando constantes de primer orden (Modelo tanques en serie P.k.C*) | 902.5            |

Podemos concluir que el cálculo más técnico para el diseño del área superficial es el que se consiguió utilizando la P.k.C\*, el cual es de 902.5 m<sup>2</sup>, ya que según bibliografía sería es que mejor representa el comportamiento de un Hc-HSS. Es importante considerar que la variable cinética k debe ser obtenida por pruebas a nivel laboratorio o piloto, el cambio de la variable cinética puede dar una mejor área de estimación.

**Profundidad del humedal.**

La profundidad de los humedales es estándar y varían de 0.5 a 0.7 metros de profundidad, así que se considerará 0.7 metros.

Depende la altura del lecho de grava la transferencia de oxígeno.

**Relación larga/ancho.**

Existen dos principales relaciones entre el largo y el ancho, varían entre 2/1 y de 4/1 comúnmente, y deben ser seleccionadas esas relaciones en función al área del terreno superficial que se tiene disponible para la construcción del humedal, nosotros seleccionamos un valor medio de 3/1.

Conociendo en área 902.2m<sup>2</sup>

$$\text{Área Ar} = L * \text{An}$$

$$902.2 = L * \text{An}$$

$$L / \text{An} = 3 : \text{An} = L / 3$$

$$902.2 = L * L / 3$$

$$902.2 = L^2 / 3$$

$$L^2 = 902.2 * 3$$

$$L = \sqrt{2,706.6}$$

$$L = 52.02$$

$$\text{An} = \text{Ar} / L$$

$$\text{An} = 902.2 / 52.02$$

$$\text{An} = 17.3$$

**Finalmente, el largo con 52 y el ancho 17.3 metros respectivamente, se puede homologar a 50 metros de largo y 18 metros de ancho que son los 900m<sup>2</sup> que se requiere**

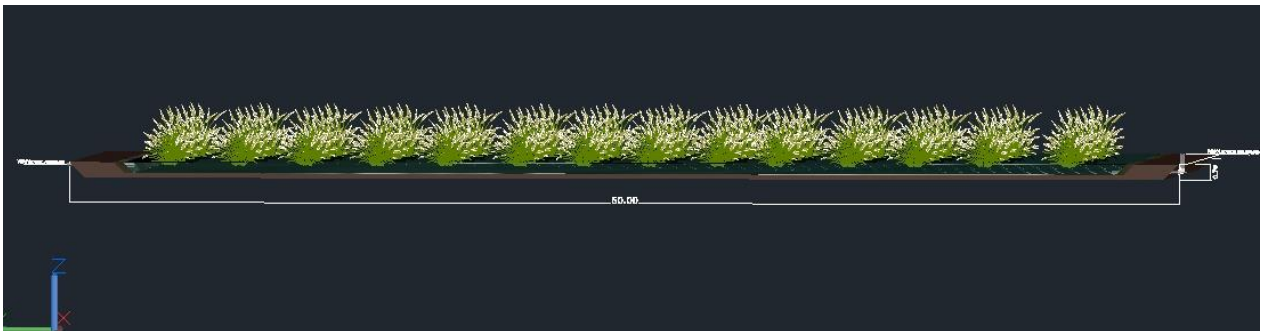
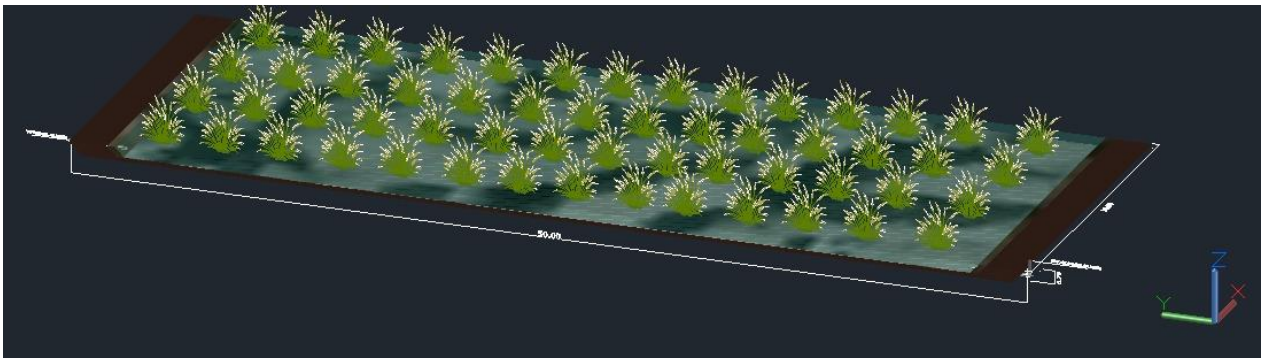
**Largo (L)** = **50m**

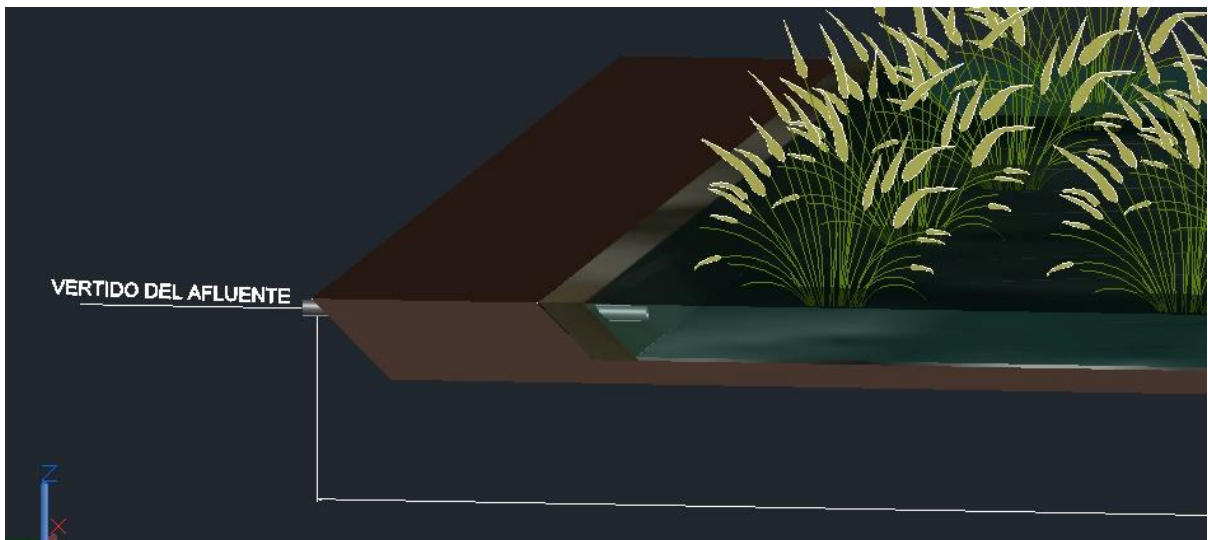
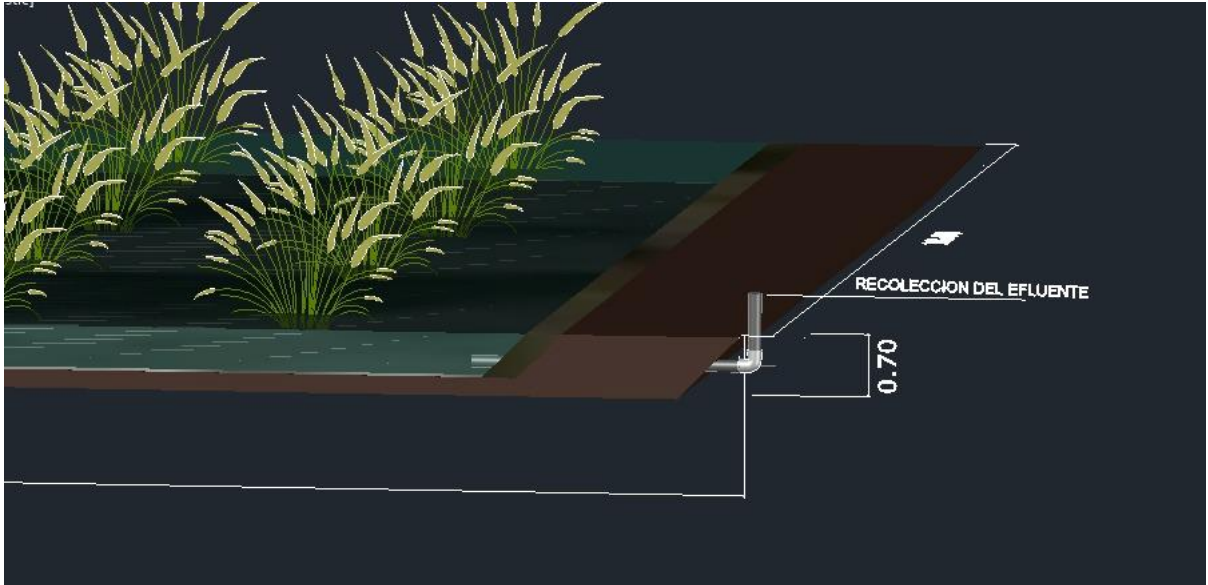
**Ancho (An)** = **18m**

**Profundidad** = **0.7m**

**Figura 6**

*Humedal subsuperficial con carrizo – AutoCAD*

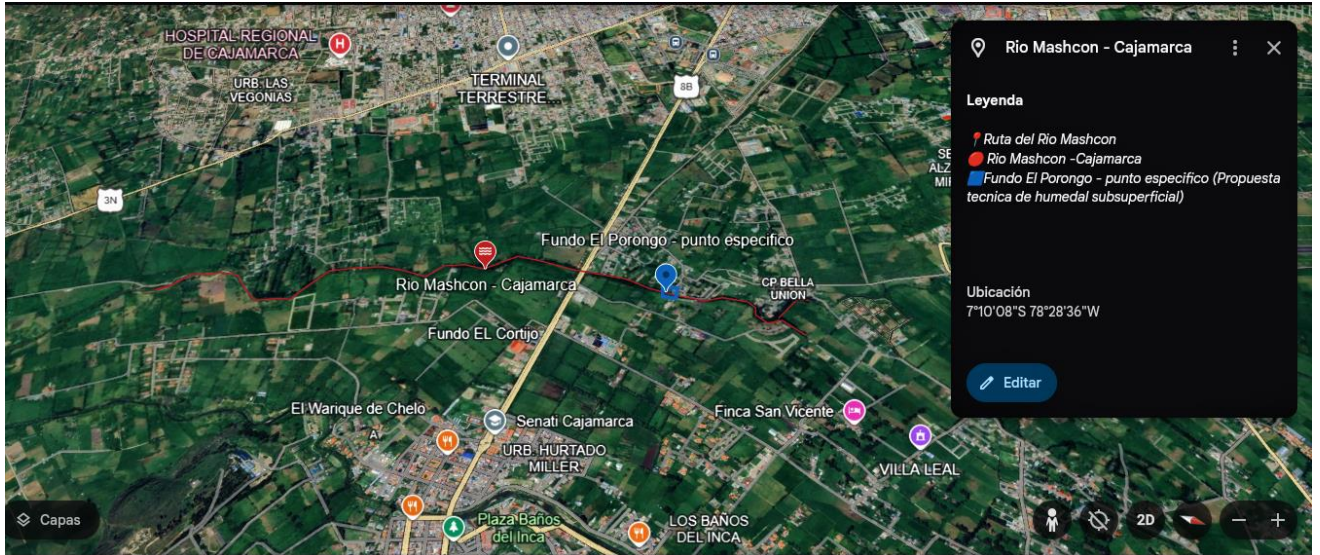




*Nota:* Elaboracion propia en AutoCad 3D del Humedal supsuperficial de flujo horizontal.

**Figura 7**

*Ubicación del humedal construido en las riveras del río Mashcón*



*Nota:* Elaboración propia del mapa de ubicación del río Mashcón en Google Earth

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Diversos estudios han evidenciado que el uso indiscriminado de productos químicos, la urbanización y la deforestación contribuyen al aumento de contaminantes en los ríos y lagos de todo el mundo (World Health Organization [WHO], 2020). En el río Mashcón de Cajamarca también se tiene la evidencia de efluentes que lo contaminan, Según P. Palomino (2018), se evidencia un fuerte grado de perturbación en el cuerpo de agua, por lo que se concluye que la calidad del agua es deficiente en el río Mashcón.

Diversos autores en la bibliografía aseveran que los humedales construidos utilizan plantas que actúan como filtros biológicos que capturan nutrientes y metales pesados a través de sus raíces, tallos y hojas O. Delgadillo et. al. (2010), Gonzales-Diaz et al. (2022), Vidal y Hormazábal (2018). Diferentes autores indican que esta capacidad de absorción es esencial para mitigar los efectos negativos de nutrientes en exceso, como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que pueden provocar eutrofización y deterioro de la calidad del agua, son afirmaciones que nos permitieron desarrollar una propuesta técnica para la construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024.

También estamos de acuerdo a que el río Mashcón esta severamente contaminado, lo cual es demostrado en el estudio “Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016”, realizado por Palomino (2016), donde se pudo encontrar que el río Mashcón está fuertemente contaminado y requiere planes para su descontaminación.

Son muchas las especies vegetales que sirven para la construcción de humedales, lo que se requiere es evaluar las distintas características y en base a eso recomendar alguna especie que tenga una alta capacidad de remoción tanto de nutrientes. Las *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis* tienen una alta capacidad de remoción tanto de nutrientes, por otro lado, *typha latifolia* y *Scirpus spp.* presentan buenos niveles de remoción de metales pesados O. Delgadillo et. al. (2010)

En la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales, la pendiente del terreno recomendada debe tener un grado de inclinación del terreno moderada (0-5%) para evitar la erosión y propiciar el flujo de soluciones que tratará el

humedal (Vymazal, 2020). Referente al tipo de suelo y permeabilidad se prefiere un tipo de suelo limoso o arenoso y de buen drenaje. Referente a la proximidad a la fuente de contaminación, se recomienda que se ubique a menos de 500 metros, fácil acceso y con pendiente para que pueda ingresar un caudal de agua (Vymazal & Kröpfelová, 2018).

Según la bibliografía, es más habitual la utilización de humedales de diseño subsuperficial, ya que estos ofrecen beneficios en comparación con los humedales de diseño superficial como: mayor capacidad de tratamiento (soportan una mayor carga orgánica y sostienen la carga una mayor temperatura), limitación del contacto directo con personas en las aguas residuales Boano (2020).

El resultado obtenido en esta investigación demuestra que el cálculo del área superficial del humedal utilizando la P.k.C\* resultó en un valor de 902.2 m<sup>2</sup>, lo que se considera el más técnico y preciso para el diseño del área superficial. Este valor se obtuvo considerando la variable cinética k, la cual es fundamental para representar el comportamiento de un Hc-HSS. La profundidad del humedal se estableció en 0.7 metros, lo que se considera estándar para este tipo de sistemas. La altura del lecho de grava es fundamental para la transferencia de oxígeno, por lo que se debe considerar cuidadosamente en el diseño. La relación larga/ancho se estableció en 3/1, lo que se considera un valor medio adecuado para el diseño del humedal. Esto se seleccionó en función del área del terreno superficial disponible para la construcción del humedal. Finalmente, se calculó el largo y el ancho del humedal, resultando en valores de 50 metros y 18 metros, respectivamente. Estos valores se consideran adecuados para el diseño del humedal y se ajustan a los requisitos establecidos.

De acuerdo al caudal vertido (678.607 barriles/día) y a la concentración de DBO<sub>5</sub> se diseñó un sistema de humedales construidos de flujo sub superficial horizontal de aproximadamente 12 hectáreas de área superficie, de igual manera el sistema de HC FSSH propuesto permite alcanzar eficiencias de depuración coherentes con los estándares ambientales y legales vigentes. Igualmente, facilita la utilización de plantas acuáticas nativas como estrategia de conservación y optimización (Sergio Eduardo Días Edwin Ricardo Zamora, 2013) por eso mismo se tomó en cuenta método Utilizando constantes de primer orden (Modelo tanques en serie P.k.C\*) ya que según bibliografía cumple con los requisitos más óptimos para el comportamiento del humedal subsuperficial flujo

horizontal.

Referente a las limitaciones que se tuvo durante el desarrollo de la presente investigación, fue la información práctica de implementación de proyectos de humedales, tales como los detalles de diseños, memorias de cálculo, software especializado para el diseño de humedales.

Para la selección del sitio, fue difícil encontrar personas que permitieron el ingreso a sus propiedades, mucho mas complejo fue la toma de muestras a pesar de que los ríos y riveras de los ríos son zonas públicas, la población se oponen al ingreso de personas extrañas.

La operatividad de los humedales puede ser afectada por los cambios estacionales, considerando que Cajamarca tiene dos estaciones marcadas, de mayo a octubre un tiempo de seco y de noviembre hasta abril una temporada húmeda.

Según la bibliografía, las respuestas de los humedales en cuanto al tratamiento de aguas servidas no son inmediata y se requiere que la humedad esté operando periodos de tiempo para que pueda tener respuestas en el tratamiento de efluentes.

La contaminación de los ríos es un problema que estamos viviendo y que puede escalar a un problema mayor de salud pública, dicha contaminación debe ser tomada en cuenta por organismos locales como las municipalidades, gobiernos regionales y entidades privadas, también por el gobierno central; se debe promover proyectos de descontaminación de los ríos.

## CONCLUSIONES

Después de analizar la información de “Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016”, Palomino (2016), se pudo encontrar que el río Mashcón está fuertemente contaminado y requiere planes para su descontaminación, la propuesta técnica que presentamos es factible para aportar en la descontaminación.

Como primer objetivo específico nos propusimos definir cuál es la especie vegetal más adecuada a incluir en el diseño de humedal para el río Mashcón Cajamarca 2024, después de evaluar las distintas características se recomienda *Phragmites australis* debido a que es una especie silvestre en Cajamarca, por su resistencia a la altitud (3000 msnm) y porque proporcionan una mayor superficie de rizosfera, lo que facilita la colonización de microorganismos especializados en la descomposición de contaminantes.

Como segundo objetivo específico nos planteamos establecer criterios para la selección del sitio más adecuado para la construcción de los humedales; referente a la pendiente del terreno, se recomienda un grado de inclinación del terreno moderada (0-5%) para evitar la erosión y propiciar el flujo de soluciones que tratará el humedal (Vymazal, 2020); referente al tipo de suelo y permeabilidad se prefiere un tipo de suelo limoso o arenoso y de buen drenaje; con respecto a la proximidad a la fuente de contaminación, se recomienda que se ubique a menos de 500 metros, fácil acceso y con pendiente para que pueda ingresar un caudal de agua.

Como tercer objetivo específico nos planteamos seleccionar el tipo de humedal más adecuado como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024, después de las evaluaciones técnicas, se seleccionó el humedal tipo HC-HSS, es decir el humedal construido subsuperficial de flujo horizontal, ya que propicia nuevas áreas libres de esparcimiento, no genera la aparición de insectos, permite la protección térmica, tiene una mayor tasa de reacción lo que propicia utilizar una menor área, lo cual le dará mayor factibilidad por el costo de los terrenos en Cajamarca.

Como último objetivo específico nos propusimos el diseño técnico para construcción de humedales como soporte en la descontaminación del río Mashcón en Cajamarca, 2024, se evaluó distintos métodos de cálculo, se inició el cálculo con el valor de 23.0 de  $DBO_5$  ( $grO_2/m^3$ ) y para una población cercana al río Mashcón de 100 personas,

y se utilizó 3 metodologías de cálculo, áreas prescritas – conocidas como reglas generales, Correlación carga – concentración de descarga – Forma gráfica y constantes de primer orden (Modelos de flujo pistón y de tanques en serie) dado como resultado, 500, 605, 735 y 903 m<sup>2</sup> respectivamente, debido a las componentes cinéticas y otras componentes que lleva el cálculo como tanques en serie se eligió 903m<sup>2</sup> como área que se requiere, la distribución geométrica del humedal podría ser 50 x18 m<sup>2</sup> con una altura de 0.7m.

## REFERENCIAS

- Droto et al. (2009), The Biological Wastewater Treatment series is based on the book Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions and on a highly acclaimed set of best-selling textbooks.
- Fidias G. y Arias-Odón (2024) Terminología en Metodología de la Investigación. Casos controversiales y confusiones, [https://www.researchgate.net/publication/382685587\\_Terminologia\\_en\\_Metodologia\\_de\\_la\\_Investigacion\\_Casos\\_controversiales\\_y\\_confusiones](https://www.researchgate.net/publication/382685587_Terminologia_en_Metodologia_de_la_Investigacion_Casos_controversiales_y_confusiones)
- Gonzales-Diaz et al. (2022), Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento terciario de efluentes de planta de beneficio de palma de aceite, Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, Bogotá, Colombia.
- O. Delgadillo et. al. (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Cochabamba, Bolivia.
- Palomino (2016), Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016, Website: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/index>, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.
- Vidal y Hormazábal (2018), Humedales Construidos, Diseño y Operación, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile.
- Vymazal, J., et al. (1998). Removal mechanisms and types of constructed wetlands. En: Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Editores.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Green, M. & Haberl, R. Ediciones: Backhuys Publisher
- Wallace y Knight (2006), Treatment wetlands / Robert H. Kadlec and Scott Wallace. -- 2nd ed. Printed in the United States of America on acid-free paper
- O et al. (2013), Diseño de humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo colombiano, Bucaramanga, Colombia, 2016, Website: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/download/3831/4388>, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.

## ANEXOS

### ANEXO N° 1. Contaminación de Río Mascón en Cajamarca





Cajamarquinos reclaman por colapso de planta de aguas residuales | RPP Noticias



**ANEXO N° 2. Ubicación específica de una de las áreas contaminadas del Río Mashcon-Cajamarca.**



Identificación de otros puntos de contaminación en una de las áreas del Río Mashcon



