

**AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA XIV  
TITICACA  
PROYECTO GIRH - TDPS  
PROYECTO PILOTO "TÉCNICAS DE  
FITORREMEDIACIÓN EN CUERPOS DE AGUA  
AFECTADOS POR AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  
EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO"**



**"MANUAL DE HUMEDAL DEL PROYECTO PILOTO "TÉCNICAS DE  
FITORREMEDIACIÓN EN CUERPOS DE AGUA AFECTADOS POR AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO"**

**PUNO, OCTUBRE DEL 2022**

---

**ELABORADO Y REVISADO POR:**

Ing. Rocío Guísela Gómez Paredes, Profesional Responsable del proyecto piloto 07-P-02.

Ing. Jhon Lewis Soncco Juanito, Técnico Ambiental del proyecto piloto 07-P-02.

**REVISADO POR:**

Área técnica de la Autoridad Administrativa del Agua XIV Titicaca

**APROBADO POR:**

Dirección de la Autoridad Administrativa del Agua XIV Titicaca



## Índice

Prefacio .....	7
Introducción.....	8
1 ¿Qué es un humedal artificial?.....	9
1.1 Ventajas de los humedales construidos.....	10
1.2 Limitaciones de los humedales construidos .....	10
2 Configuraciones de humedales artificiales.....	10
2.1 Flujo horizontal (FH).....	11
2.2 Flujo vertical (FV) .....	11
2.3 Híbrido.....	12
3 ¿Cómo funciona un humedal artificial? .....	13
4 Diseño del sistema de tratamiento del proyecto piloto 07-P-02. ....	16
4.1 Limpieza y eliminación de desechos del terreno.....	16
4.2 Señalización en los humedales durante la implementación. ....	16
4.3 Nivelación y compactación del terreno.....	16
4.4 Construcción de humedales artificiales de tratamiento. ....	16
4.4.1 Preparación del soporte.....	16
4.4.2 Instalación de humedales artificiales. ....	17
4.5 Sistema de recolección y distribución de agua. ....	17
4.5.1 Bombeo de agua .....	17
4.5.2 Conducción del fluido .....	17
4.5.3 Almacenamiento de agua .....	17
4.5.4 Distribución de agua.....	18
4.6 Selección, distribución y acondicionamiento de la vegetación. ....	18
4.7 Instalación de medidores de caudal.....	18
4.8 Cerco perimetral y accesos a los humedales.....	19
4.8.1 Delimitación y estandarización de área de trabajo .....	19
4.8.2 Instalación de cerco de seguridad .....	19
4.9 Sistema de fumigación activo para posibles ataques de plagas y otros	19
4.10 Sistema de aireación .....	19
4.11 Instalación de paneles solares y conexiones eléctricas.....	19
4.11.1 Instalación de paneles solares .....	19
4.11.2 Instalación de conexiones eléctricas .....	20
4.12 Plan de seguridad y salud laboral .....	20

4.13	Instalación de componentes auxiliares .....	20
5	Construcción del sistema de tratamiento del proyecto piloto 07-P-02.....	21
5.1	Limpieza y eliminación de desechos del terreno.....	21
5.2	Señalización en los humedales durante la implementación.....	21
5.3	Nivelación y compactación del terreno.....	22
5.4	Construcción de humedales artificiales de tratamiento.....	22
5.4.1	Trazo y excavación para los humedales sobre la superficie nivelada. 22	
5.4.2	Compactación de la zona de los humedales.....	23
5.4.3	Retiro de elementos cortantes y excavación de zanja para borde de geomembrana (superficie de apoyo).....	24
5.4.4	Instalación de la geomembrana para los humedales artificiales... 25	
5.5	Sistema de recolección y distribución de agua.....	26
5.5.1	Bombeo de agua .....	26
5.5.2	Conducción del fluido .....	27
5.5.3	Almacenamiento de agua .....	28
5.5.4	Distribución de agua.....	28
5.6	Selección, distribución y acondicionamiento de la vegetación.....	29
5.7	Instalación de medidores de caudal.....	30
5.8	Cerco perimetral y accesos a los humedales.....	31
5.8.1	Delimitación y estandarización de área de trabajo .....	31
5.8.2	Instalación de cerco de seguridad .....	31
5.9	Sistema de fumigación activo para posibles ataques de plagas y otros 31	
5.10	Sistema de aireación .....	32
5.11	Instalación de paneles solares y conexiones eléctricas.....	32
5.11.1	Instalación de paneles solares .....	32
5.11.2	Instalación de conexiones eléctricas .....	33
5.12	Plan de seguridad y salud laboral .....	34
5.13	Instalación de componentes auxiliares .....	34
6	Operación y mantenimiento .....	35
6.1	Sistema eléctrico.....	35
6.2	Ingreso de caudal a los humedales.....	37
6.3	Sistema de tratamiento.....	38
6.4	Fumigación.....	38
6.5	Podas.....	39

7	Mantenimiento de componentes del sistema .....	39
7.1	Sistema Eléctrico .....	39
7.1.1	Limpieza de paneles solares .....	39
7.1.2	Cableado .....	39
7.1.3	Detección de errores en el Variador .....	39
7.2	Sistema de bombeo y almacenamiento. ....	39
7.2.1	Bomba de agua .....	39
7.3	Sistema de conducción y control.....	40
7.4	Sistema de tratamiento. ....	40
7.5	Componentes auxiliares.....	40
8	Consideraciones de seguridad personal. ....	41
9	Cierre del sistema. ....	41
9.1	Cosecha de especies vegetales.....	41
9.2	Desmontaje del sistema hidráulico.....	42
9.3	Desmontaje Del Sistema Eléctrico .....	42

### Índice de tablas.

Tabla 1	Mecanismos de eliminación de contaminantes en humedales construidos .....	13
Tabla 2.	Descripción de parte del variador .....	37
Tabla 3.	Detección de errores en el Variador.....	39

### Índice de figuras.

Figura 1	Sección transversal esquemática de un humedal construido de flujo horizontal, adaptado de Morel y Diener, 2006.....	11
Figura 2	Sección transversal esquemática de un humedal construido de flujo vertical, adaptado de Morel y Diener, 2006 .....	12
Figura 3 .	Mecanismo de eliminación de contaminantes, modificado de Wetlands International, 2003.....	13
Figura 4	Transferencia de oxígeno desde las raíces, modificado de Wetlands International, 2003.....	14
Figura 5	Transformaciones del nitrógeno en un sistema de humedales construidos, adaptado de Fitorremediación en humedales construidos (Herath y Vithanage, 2015). ....	15
Figura 6.	Teclado inteligente en parte frontal e interior del variador.....	36
Figura 7.	Uso de equipo de protección personal. ....	41

### Índice de imágenes.

Imagen 1.	Limpieza y eliminación de desechos del terreno. ....	21
Imagen 2.	Señalización en los humedales durante la implementación. ....	21
Imagen 3.	Nivelación y compactación del terreno.....	22

Imagen 4. Trazo y excavación para los humedales. ....	23
Imagen 5. Compactación de las áreas excavadas. ....	23
Imagen 6. Compactación de la zona de los humedales. ....	24
Imagen 7. Retiro de elementos cortantes y excavación de zanja para borde de geomembrana (superficie de apoyo). ....	24
Imagen 8. Instalación de la geomembrana para los humedales artificiales. ....	25
Imagen 9. Se colocó la geomembrana en toda la dimensión de la poza, con equipos de termofusión y extrusión. ....	25
Imagen 10. La instalación de la bomba se realiza en la orilla del Lago Titicaca a una profundidad de 1.3 m. ....	27
Imagen 11. Se instalaron las tuberías utilizando politubos los cuales son de rápida instalación. ....	27
Imagen 12. Se instaló un tanque de fibra de vidrio de 2 500 litros de capacidad. ....	28
Imagen 13. Se instaló un tren de descarga del fluido para abastecer a ambos humedales. ....	28
Imagen 14. Se incorporaron las especies vegetales. ....	30
Imagen 15. Flotadores artificiales. ....	30
Imagen 16. Se instalará un medidor de caudal (caudalímetro). ....	31
Imagen 17. La aireación del tanque de almacenamiento se realizará con el ingreso de agua al mismo. ....	32
Imagen 18. El sistema solar se instaló sobre el techo de la caseta-oficina. ....	33
Imagen 19. Panel de control. ....	33
Imagen 20. Se instaló una caseta – oficina temporal. ....	34
Imagen 21. Esquema del sistema de tratamiento. ....	35
Imagen 22. Mediciones diarias del humedal. ....	37
Imagen 23. Realizar las lecturas con el multiparámetro. ....	38

## **Prefacio**

Las actividades poblacionales (urbanas y rurales) y productivas son las principales fuentes generadoras de contaminantes en la cuenca del lago Titicaca. Estas actividades descargan aguas residuales y residuos sólidos a los cuerpos de agua los cuales son considerados fuentes específicas o puntuales de contaminación. Considerando que el lago Titicaca es una gran masa de agua conformada por cuatro zonas morfométricas y batimétricas bien definidas (lago Mayor o Chucuito, bahía Mayor de Puno, bahía Interior de Puno y lago Menor o Huiñaymarca), el presente servicio se presta en atención a la problemática de eutrofización de las aguas de la Bahía interior de Puno (BIP) la cual es un cuerpo natural de agua de 17,5 km<sup>2</sup> equivalente al 0,02 % de la superficie total del lago Titicaca (8400 km<sup>2</sup>) (ANA, 2017).

En el marco del programa de trabajo del proyecto piloto "Técnicas de Fitorremediación en cuerpos de aguas afectados por aguas residuales domésticas, Bahía Interior de Puno", las lecciones aprendidas a través del proyecto piloto se documentan para una mayor difusión. Esta publicación sobre el diseño, la construcción, el funcionamiento y el mantenimiento de los humedales construidos se preparó en el marco del programa sobre la base de las experiencias y en reconocimiento de la necesidad de una alternativa viable a las tecnologías convencionales de tratamiento y eliminación de aguas residuales. No obstante, hay que tener en cuenta que los humedales artificiales tienen sus limitaciones: la falta de disponibilidad o el coste del terreno pueden hacerlos inviables; y los aspectos climatológicos y los parámetros de las aguas residuales pueden afectar a su correcto funcionamiento

## Introducción

En el marco de las acciones de la Comisión Multisectorial para la Prevención y Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago Titicaca y sus Afluentes (Ley N° 29906 y D.S. N° 075-2013-PCM), de la que la Autoridad Nacional del Agua forma parte; el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, del inglés Global Environment Facility) aprobó el financiamiento del Proyecto 00087268 - 00094352 "Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (TDPS)", por USD 6 563 750, cuyo segundo componente está enfocado en desarrollar 11 proyectos piloto que generen aprendizajes para la gestión de los recursos del TPDS. Ello forma parte de los múltiples esfuerzos binacionales orientados a revertir los severos problemas de contaminación y degradación de los sistemas socioecológicos altiplánicos, y a implementar enfoques de gestión integrada de recursos hídricos transfronterizos, que permitan fortalecer la resiliencia de estos sistemas a las crecientes presiones producto de los acelerados procesos insostenibles de urbanización, a la inadecuada gestión ambiental de las actividades productivas, y a los cada vez más evidentes efectos del cambio climático.

Así, la Autoridad Nacional del Agua mediante la Autoridad Administrativa del Agua XIV Titicaca y el Área Técnica en Calidad de los Recursos Hídricos, formuló y viabilizó 2 de los proyectos piloto, uno de ellos es el Proyecto Piloto 07-P-02 "Estudio Técnicas de Fitorremediación en cuerpos de agua afectados por aguas residuales domésticas - Bahía Interior de Puno" con un presupuesto de 1,5 millones de dólares; con el propósito de coadyuvar a la recuperación de la calidad ambiental de la bahía interior de Puno, mediante procesos físicos y técnicas de fitorremediación, permitirá recuperar la capacidad de resiliencia de un ecosistema mayor, como el Lago Titicaca por tanto, la oferta de los servicios ecosistémicos de los cuerpos de agua se verá beneficiada directamente al recuperar los procesos ecológicos que deben producirse de manera natural; los mismos que redundan en la reducción de riesgos de salud (bioacumulación y biomagnificación) para la biota (flora y fauna) y la salud humana.

Los sistemas de gestión y tratamiento de aguas residuales más pequeños y descentralizados, como los humedales artificiales, pueden ser una alternativa viable para muchas zonas urbanas de los países en desarrollo. Los humedales construidos son relativamente baratos de construir donde el terreno es asequible y pueden ser fácilmente operados y mantenidos incluso por la comunidad.

Este manual no es un alegato para la aplicación de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, sino que pretende ofrecer una descripción exhaustiva de las cuestiones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. Este manual se ha preparado como una guía general para el diseño, la construcción, el funcionamiento y el mantenimiento de los humedales construidos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

## 1 ¿Qué es un humedal artificial?

Un humedal artificial o construido es un área poco profunda rellena con algún tipo de material filtrante (sustrato), normalmente arena o grava, y plantada con vegetación que tolera las condiciones de saturación. Las aguas residuales se introducen en el humedal y fluyen sobre la superficie o a través del sustrato, y se descargan fuera de esta a través de una estructura que controla la profundidad de las aguas residuales en el humedal.

Un humedal construido consta de los siguientes cinco componentes principales:

- Área o terreno
- Sustrato
- Vegetación
- Revestimiento
- Sistema de disposición de entrada/salida.

EL terreno excavado se rellena con un sustrato permeable (por lo general se emplea roca, grava, arena y tierra), y el nivel del agua se mantiene por debajo de la parte superior del sustrato, de modo que todo el flujo se supone subsuperficial. Este sustrato soporta el sistema de raíces de los mismos tipos de vegetación emergente, que se plantan en la superficie superior del sustrato. La distribución y recogida equitativa de las aguas residuales se consigue mediante sistemas de disposición de entrada y salida. Si la protección de las aguas subterráneas es importante, se utiliza un revestimiento impermeable.

Desde la década de 1950, los humedales artificiales se han utilizado efectivamente para tratar diferentes aguas residuales con diferentes configuraciones, escalas y diseños en todo el mundo. Los sistemas existentes de este tipo van desde los que sirven a las viviendas unifamiliares hasta los sistemas municipales a gran escala. Hoy en día, los humedales construidos son sistemas de tratamiento alternativos comunes en Europa en las zonas rurales y más del 95% de estos humedales son humedales de flujo subsuperficial. Se espera que en los próximos años el número de estos sistemas supere los 10 000 sólo en Europa (Platzer, 2000).

Aunque el potencial de aplicación de la tecnología de humedales en el mundo en desarrollo es enorme, el ritmo de adopción de la tecnología de humedales para el tratamiento de aguas residuales en esos países ha sido lento. Se ha identificado que las limitaciones actuales para la adopción generalizada de la tecnología de los humedales para el tratamiento de las aguas residuales en los países en desarrollo se deben al hecho de que tienen un conocimiento y una experiencia limitada en el diseño y la gestión de estos humedales.

Debido al enorme potencial de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, se organizan varias conferencias internacionales para la difusión de los nuevos avances en este campo. Además de otras

conferencias internacionales, la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) organiza cada dos años la Conferencia Internacional sobre Sistemas de Humedales para el Control de la Contaminación del Agua

### **1.1 Ventajas de los humedales construidos**

- Los humedales pueden ser menos costosos de construir que otras opciones de tratamiento,
- Se aprovecha de los procesos naturales,
- Son de construcción sencilla (puede construirse con materiales locales),
- Se caracterizan por un funcionamiento y un mantenimiento relativamente sencillo,
- Poseen de una conveniente rentabilidad (bajos costes de construcción y explotación),
- Y estabilidad de los procesos.

### **1.2 Limitaciones de los humedales construidos**

- Necesidad de una gran superficie;
- El tratamiento de los humedales puede ser económico en comparación con otras opciones sólo cuando el terreno está disponible y es asequible;
- Los criterios de diseño aún no se han desarrollado para los diferentes tipos de aguas residuales y climas.

## **2 Configuraciones de humedales artificiales**

Hay varias configuraciones de diseño de los humedales construidos (Haberl, 1999) y pueden clasificarse según los siguientes elementos:

- Forma de vida de los macrófitos dominantes (libres, emergentes, sumergidos),
- Patrón de flujo en los sistemas de humedales (flujo superficial de agua libre; flujo subsuperficial: horizontal y vertical),
- Tipo de configuraciones de las celdas de los humedales (sistemas híbridos, sistemas de una etapa, sistemas de varias etapas),
- Tipo de aguas residuales a tratar,
- Nivel de tratamiento de las aguas residuales (primario, secundario o terciario),
- Tipo de pretratamiento,
- Estructuras influentes y efluentes,
- Tipo de sustrato (grava, tierra, arena, etc.), y
- Tipo de carga (carga continua o intermitente).

Entre las diversas clasificaciones enumeradas anteriormente, en este manual sólo se han considerado los humedales construidos con flujo subterráneo. En estos humedales se utilizan principalmente dos tipos de direcciones de flujo, como son el flujo horizontal (FH) y el flujo vertical (FV).

## 2.1 Flujo horizontal (FH)

La figura 2 muestra un corte transversal esquemático de un humedal construido en flujo horizontal. Se denomina humedal FH porque las aguas residuales se introducen por la entrada y fluyen lentamente a través del sustrato poroso bajo la superficie del lecho en una trayectoria más o menos horizontal hasta llegar a la zona de salida. Durante este paso, las aguas residuales entrarán en contacto con una red de zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas. Las zonas aeróbicas estarán alrededor de las raíces y rizomas de la vegetación del humedal que filtran oxígeno al sustrato. Durante el paso de las aguas residuales por la rizosfera, las aguas residuales se limpian por degradación microbológica y por procesos físicos y químicos (Cooper et al. 1996). El humedal FH puede eliminar eficazmente los contaminantes orgánicos (SST, DBO5 y DQO) de las aguas residuales. Debido a la limitada transferencia de oxígeno dentro del humedal, la eliminación de nutrientes (especialmente el nitrógeno) es limitada, sin embargo, los humedales FH eliminan los nitratos de las aguas residuales.

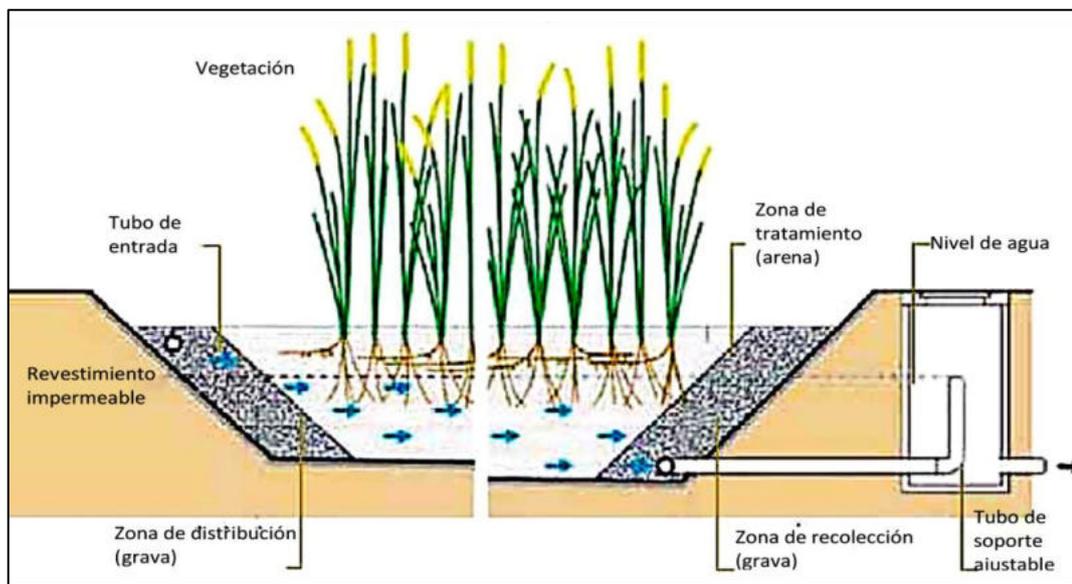


Figura 1 Sección transversal esquemática de un humedal construido de flujo horizontal, adaptado de Morel y Diener, 2006.

## 2.2 Flujo vertical (FV)

El humedal construido FV está formado por un lecho de arena/grava cubierta con arena/grava y vegetación (ver figura 3). Las aguas residuales se alimentan desde la parte superior y luego se filtran gradualmente a través del lecho y son recogidas por una red de drenaje en la base.

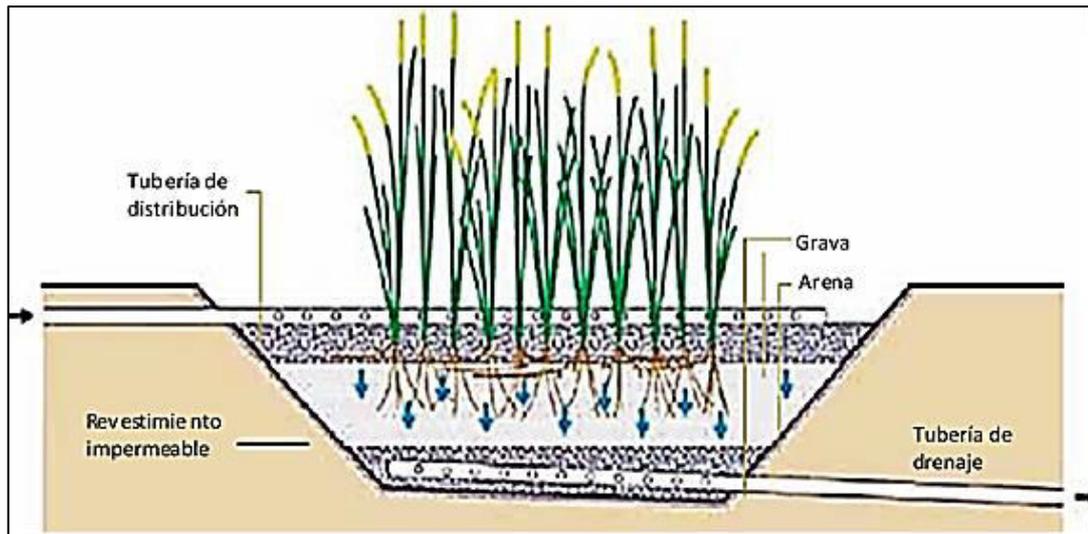


Figura 2 Sección transversal esquemática de un humedal construido de flujo vertical, adaptado de Morel y Diener, 2006

Los humedales FV se alimentan de forma intermitente en un gran lote que inunda la superficie. El líquido desciende gradualmente por el lecho y es recogido por una red de drenaje en la base. El lecho drena completamente libre y permite que el aire vuelva a llenar el lecho. La siguiente dosis de líquido atrapa este aire y esto, junto con la aireación causada por la rápida dosificación en el lecho, conduce a una buena transferencia de oxígeno y, por tanto, a la capacidad de nitrificación. La difusión de oxígeno del aire creada por el sistema de dosificación intermitente contribuye mucho más a la oxigenación del lecho de filtración en comparación con la transferencia de oxígeno a través de la planta. Platzer (1998) demostró que el sistema de dosificación intermitente tiene una transferencia potencial de oxígeno de 23 a 64 g de O<sub>2</sub> .m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, mientras que Brix (1997) demostró que la transferencia de oxígeno a través de la planta (especie de caña común) tiene una transferencia potencial de oxígeno de 2 g de O<sub>2</sub> .m<sup>-2</sup>. d<sup>-1</sup> a la zona de las raíces, que es utilizada principalmente por las propias raíces y rizomas.

La última generación de humedales construidos se ha desarrollado como sistema de flujo vertical con carga intermitente. Las razones del creciente interés por el uso de sistemas de flujo vertical son:

- Tienen una capacidad de transferencia de oxígeno mucho mayor, lo que resulta en una buena nitrificación,
- Son considerablemente más pequeños que el sistema FH,
- Pueden eliminar eficientemente la DBO<sub>5</sub>, la DQO y los patógenos.

### 2.3 Híbrido

El humedal FH está aprobado para eliminar la DBO<sub>5</sub> y los SST para el tratamiento secundario de aguas residuales, pero no para la nitrificación debido a su limitada capacidad de transferencia de oxígeno. Por ello, ha aumentado el interés por los humedales FV, ya que tienen una capacidad

de transferencia de oxígeno mucho mayor y requieren una superficie considerablemente menor que los FH. Pero los humedales FV también tienen algunas limitaciones, como una menor eficiencia en la eliminación de sólidos y pueden obstruirse si la selección del medio no es correcta. Por estos motivos, ha aumentado el interés por los humedales combinados (híbridos). En estos sistemas, las ventajas y desventajas del FH y del FV pueden combinarse para complementarse. Dependiendo de la finalidad, los humedales híbridos pueden ser humedales FH seguidos de humedales FV, o viceversa.

### 3 ¿Cómo funciona un humedal artificial?

Un humedal artificial es un complejo conjunto de aguas residuales, sustrato, vegetación y una serie de microorganismos (sobre todo bacterias); donde la vegetación desempeña un papel fundamental en los humedales, ya que proporciona superficies y un entorno adecuado para el crecimiento microbiano y la filtración. Los contaminantes se eliminan dentro de los humedales mediante varios procesos físicos, químicos y biológicos complejos.

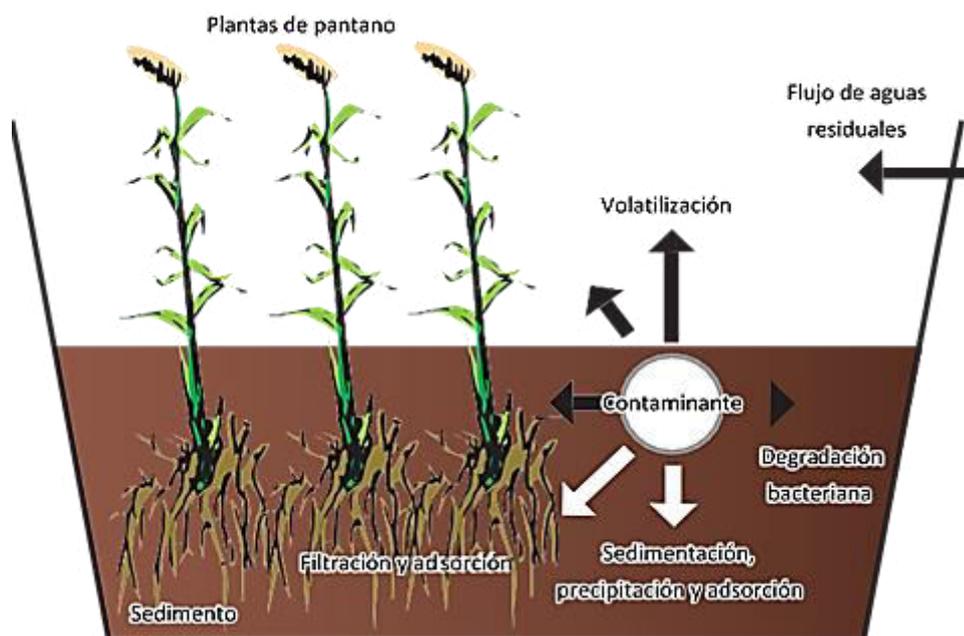


Figura 3 . Mecanismo de eliminación de contaminantes, modificado de Wetlands International, 2003.

Los mecanismos de eliminación de contaminantes en el humedal artificial se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Mecanismos de eliminación de contaminantes en humedales construidos

Constituyentes de las Aguas Residuales	Mecanismos de eliminación
Sólidos en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentación</li> <li>- Filtración</li> </ul>
Orgánicos solubles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradación microbiana aeróbica</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradación microbiana anaeróbica</li> </ul>
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sorción de la matriz</li> <li>- Absorción por parte de las plantas</li> </ul>
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amonificación seguida de nitrificación microbiana</li> <li>- Desnitrificación</li> <li>- Absorción por las plantas</li> <li>- Adsorción en la matriz</li> <li>- Volatilización del amoníaco (principalmente en el Sistema SF)</li> </ul>
Metales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adsorción en intercambio de cationes</li> <li>- Complejización</li> <li>- Precipitación</li> <li>- Absorción por plantas</li> <li>- Oxidación /reducción microbiana</li> </ul>
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentación</li> <li>- Filtración</li> <li>- Muerte natural</li> <li>- Depredación</li> <li>- Irradiación UV (Sistema SF)</li> <li>- Excreción de antibióticos desde las raíces de los macrófitos</li> </ul>

Los sólidos sedimentables y en suspensión que no son eliminados en el tratamiento primario se eliminan eficazmente en el humedal por filtración y sedimentación. Las partículas se asientan en microbolsas estancadas o son filtradas por constricciones del flujo.

El crecimiento microbiano adherido y suspendido es responsable de la eliminación de los compuestos orgánicos solubles, que se degradan biológicamente tanto de forma aeróbica (en presencia de oxígeno disuelto) como anaeróbica (en ausencia de oxígeno disuelto). El oxígeno necesario para la degradación aeróbica se suministra directamente desde la atmósfera por difusión o por fuga de oxígeno desde las raíces de la vegetación hacia la rizosfera, sin embargo, la transferencia de oxígeno desde las raíces es insignificante.

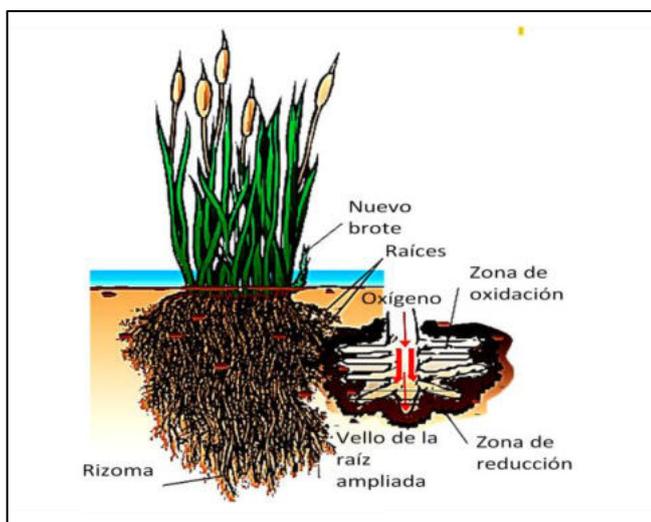


Figura 4 Transferencia de oxígeno desde las raíces, modificado de Wetlands International, 2003.

Los mecanismos de eliminación de fósforo en los humedales construidos son la adsorción, la complejación y la precipitación, el almacenamiento, la absorción por las plantas y la asimilación biótica (Watson et al., 1989).

Los mecanismos de eliminación de nitrógeno en los humedales artificiales son múltiples e incluyen la volatilización, la amonificación, la nitrificación/desnitrificación, la absorción por parte de las plantas y la adsorción de la matriz. El principal mecanismo de eliminación en la mayoría de los humedales construidos es la nitrificación/desnitrificación microbiana. El amoníaco es oxidado a nitrato por las bacterias nitrificantes en las zonas aeróbicas. Los nitratos son convertidos en gas dinitrógeno por las bacterias desnitrificantes en las zonas anóxicas y anaeróbicas.

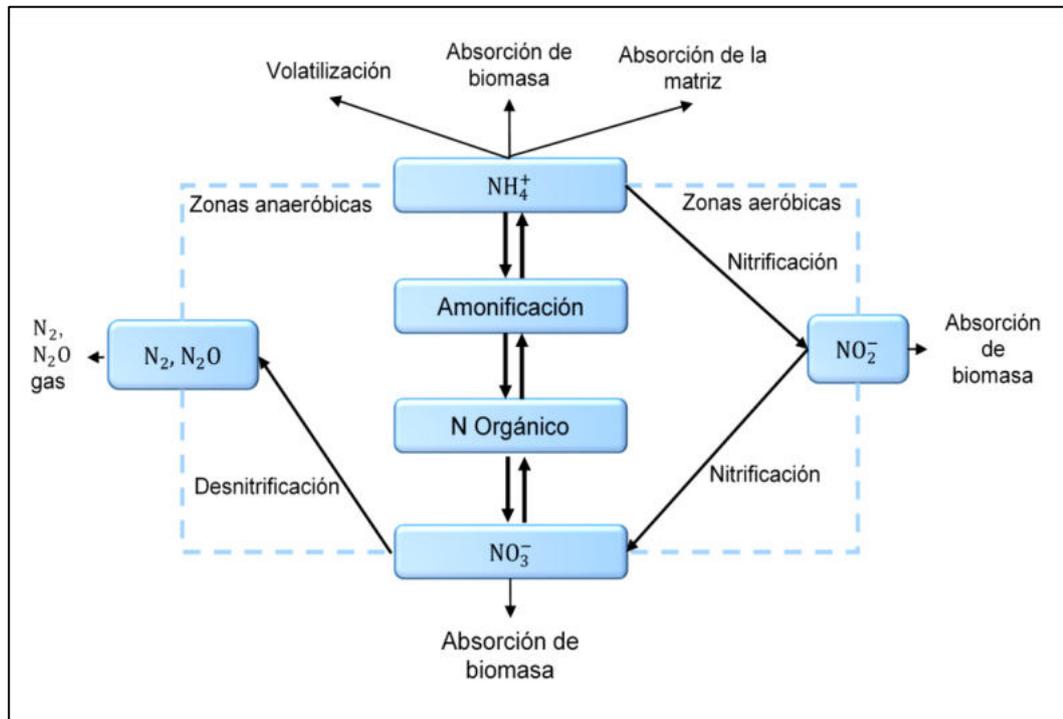


Figura 5 Transformaciones del nitrógeno en un sistema de humedales construidos, adaptado de Fitorremediación en humedales construidos (Herath y Vithanage, 2015).

El proceso de eliminación de metales en los humedales incluye la sedimentación, la filtración, la adsorción, la complejación, la precipitación, el intercambio de cationes, la absorción por parte de las plantas y las reacciones mediadas por los microbios, especialmente la oxidación (Watson et al., 1989). La adsorción implica la unión de iones metálicos a la superficie de la planta o de la matriz, mientras que la presencia de bacterias provoca la precipitación de óxidos y sulfuros metálicos dentro del humedal. Algunas especies de humedales tienen una capacidad bien establecida de absorción directa de metales.

Los patógenos se eliminan en el humedal durante el paso de las aguas residuales por el sistema de tratamiento, principalmente por sedimentación, filtración y adsorción por la biomasa. Una vez que estos organismos quedan atrapados en el sistema, su número disminuye

rápida, principalmente por los procesos de muerte natural y depredación (Cooper et. al, 1996)

## **4 Diseño del sistema de tratamiento del proyecto piloto 07-P-02.**

### **4.1 Limpieza y eliminación de desechos del terreno.**

Se retirará toda la vegetación existente, aproximadamente 10 centímetros de capa vegetal superficial, en el área del proyecto. Se realizará la carga y el transporte del material recogido y su adecuada disposición. Asimismo, se eliminarán todos los restos de vegetación y raíces con herramientas manuales, dejando el área óptima para la siguiente etapa.

### **4.2 Señalización en los humedales durante la implementación.**

Durante las fases del proyecto (construcción, implantación, acondicionamiento y mantenimiento de los humedales) se colocará señalización utilizando franjas con cintas reflectivas que adviertan sobre los riesgos identificados. Además, se dotará de elementos de protección personal (EPP) a los trabajadores que intervengan en las obras.

Durante la etapa de construcción se instalarán y mantendrán letreros de hombres trabajando, prohibido el ingreso de personas no autorizadas y letreros de distanciamiento social, en lugares visibles de modo que, a través de su lectura, cualquier persona pueda enterarse de la obra que se está ejecutando, los cuales se mantendrán hasta el final de la etapa constructiva.

### **4.3 Nivelación y compactación del terreno.**

La nivelación y compactación del terreno se realizará sobre la zona de construcción de los humedales la cual tendrá las siguientes dimensiones: 87x 7 x 2 m (L x A x H). Se levantará el nivel del terreno hasta una altura de 2 m sobre la superficie actual. Primero, se añadirá aproximadamente 1218 m<sup>3</sup> de material de préstamo (tierra) hasta alcanzar una altura de 2.0 m sobre el nivel del suelo. La tierra será abastecida por volquetes de 10 a 15 toneladas y el será compactado manualmente. El nivelado del material se realizará por una retroexcavadora.

Se instalará una zanja para eventos mayores la cual evitará que los humedales sean afectados por posibles deslizamientos provenientes de la zona con mayor elevación cercana al proyecto.

### **4.4 Construcción de humedales artificiales de tratamiento.**

La evaluación del sistema de tratamiento de aguas para el presente proyecto se realizará en dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales invertidos.

#### **4.4.1 Preparación del soporte.**

Se realizará la preparación de la superficie de apoyo del humedal procurando que el material del soporte sea homogéneo, con

granulometría continua y ausencia de elementos que pueden dañar la geomembrana. De esta manera, se realizarán ensayos

básicos (granulometría, densidad, límite líquido, límite plástico, ensayos de consolidación) del suelo (material de préstamo) sobre el cual se construirán los humedales.

#### 4.4.2 Instalación de humedales artificiales.

Una vez obtenida la superficie de apoyo de los humedales se realiza la instalación de la geomembrana, los humedales tendrán las siguientes dimensiones 40 x 3 x 1.5 m.

### 4.5 Sistema de recolección y distribución de agua.

La succión de agua desde el lago y su distribución se realizará a través de un sistema que comprende las siguientes etapas y procesos: bombeo de agua, conducción del fluido, almacenamiento y distribución hacia los humedales de tratamiento.

#### 4.5.1 Bombeo de agua

El bombeo de agua desde el Lago Titicaca hasta la zona de emplazamiento de los humedales se hará a través de una bomba sumergible solar de 1 HP de 1" de descarga. La instalación de la bomba se realizará con un armazón de fierro que mantenga a la bomba sumergida a 1.5 m dentro del lago. Esta bomba succionará agua hacia el tanque de almacenamiento y será controlada por un reloj timer con un tiempo de trabajo de 15 minutos por cada dos horas. La instalación se realizará manualmente utilizando las medidas de seguridad necesarias como: chalecos salvavidas, aro de seguridad, botas tobilleras y arnés retráctil.

Las características técnicas de la electrobomba sumergible son: 750W, 1 HP, 7.5 m de altura y un caudal máximo de 188 litros/minuto. Esta bomba tiene una salida de 1 ½" a la cual se colocará un acople de reducción a 1". Esta bomba es accionada por su propio flotador incorporado, que transmite las señales de bajo y alto nivel hacia el Variador de corriente, para el control automático correspondiente.

#### 4.5.2 Conducción del fluido

Se instalarán tuberías PVC de 1" de diámetro desde la salida de la bomba sumergible hasta el ingreso al tanque de almacenamiento. La instalación se realizará manualmente requiriendo el pegado de los tubos de PVC hasta su ingreso a las estructuras indicadas.

La tubería será enterrada en su mayor tramo, principalmente en los lugares de acceso de vehículos o de personal para evitar accidentes a las personas o vehículos y daños a la estructura de conducción.

#### 4.5.3 Almacenamiento de agua

Se instalará un tanque de fibra de vidrio de 2 500 litros de capacidad para el almacenamiento del agua. La instalación del tanque se efectuará sobre

suelo firme previamente compactado que permita una base firme y libre de obstáculos.

#### 4.5.4 Distribución de agua

Se instalará una tubería de 1" para la distribución de agua desde el tanque de almacenamiento. La tubería contendrá dos válvulas: una válvula de ½" para el muestreo y una válvula de 1" para la conducción del fluido hacia los humedales.

#### 4.6 Selección, distribución y acondicionamiento de la vegetación.

Se incorporarán las especies vegetales en el humedal considerando las mejores condiciones para su extracción, transporte, acondicionamiento y reposición en el proceso de operación de los humedales. Se considerará el uso de especies hidrofitas autóctonas de la zona como *Schoenoplectus sp.* "totora" e *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" que se encuentren en zonas contaminadas de la bahía interior. Las plantas a extraer de *Schoenoplectus sp.* "totora" tendrán 3-4 tallos cada una con yemas y rizomas; mientras que los individuos de *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" procurarán uniformidad en la longitud de sus raíces. Todos los individuos a extraer deben observarse en buen estado y presentar similar vigor.

Se implementarán dos humedales: Un humedal con *Schoenoplectus sp.* "totora" soportada en flotadores y un humedal con *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" flotante. La densidad de siembra y el total de plantas a sembrar se presenta en el cuadro 05.

Los tratamientos a implementar permitirán obtener una elevada capacidad de intercambio asegurando la retención de sólidos y posterior transformación del material orgánico e inorgánico. Los humedales de tratamiento y su correspondiente medio de soporte y funcionamiento esperado se detallan a continuación:

- Humedal 1, con *Schoenoplectus sp.* "totora" soportada en flotadores artificiales manteniendo sumergiendo sus raíces.
- Humedal 2, con *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" flotante, cuyas raíces mantendrán un filtro biológico para retener sólidos y elementos contaminantes.

Los procesos de instalación de los humedales serán manuales, al igual que con el relleno interno de soportes de plantas y la plantación de las especies botánicas a evaluar.

Todos los humedales cuentan con una tubería de ingreso y una descarga especial que mantiene el nivel hidráulico del humedal, y en la cual se cuenta también con válvula para tomar muestras.

#### 4.7 Instalación de medidores de caudal.

Se instalará un medidor de caudal (caudalímetro), en las tuberías de 1" de ingreso de agua a cada humedal. Los caudalímetros nos permitirán

determinar el caudal actual y el acumulado para los cálculos correspondientes de la carga contaminante.

El agua tratada será conducida a través de tuberías de 2" de diámetro hacia dos puntos de ingreso al lago Titicaca. Las tuberías serán de PVC y se instalarán manualmente.

#### **4.8 Cerco perimetral y accesos a los humedales**

e contará con una delimitación y estandarización del área de trabajo, así como de la instalación del cerco de seguridad, detallados a continuación:

##### **4.8.1 Delimitación y estandarización de área de trabajo**

Se delimitarán las áreas del proyecto con cinta de seguridad color amarillo y rojo, atada a parantes de madera para los ajustes correspondientes, en las zonas que se tengan que desarrollar los trabajos, estandarizando el área de trabajo de acuerdo a la establecido para cada servicio constructivo. Así mismo se implementarán letreros de señalización y contenedores para residuos no aprovechables y el rojo de residuos biocontaminados en el área de trabajo.

##### **4.8.2 Instalación de cerco de seguridad**

Se instalarán cercos de seguridad en las zonas requeridas del proyecto de los humedales: un cerco que aisle la zona de los humedales artificiales y sus componentes principales; y otro en la zona de recepción de agua (tanque receptor). Esta labor se ejecutará manualmente colocando postes de media altura y cinta o malla de seguridad con señalética que indique la prohibición del ingreso a las mencionadas instalaciones.

#### **4.9 Sistema de fumigación activo para posibles ataques de plagas y otros**

Se realizarán fumigaciones mensuales ante posibles ataques de plagas o similares

#### **4.10 Sistema de aireación**

Se implementará un sistema de aireación para el tanque de almacenamiento a través de una pequeña bomba la cual será encendida para airear el remanente de agua que pueda quedar en el tanque previo a su distribución hacia los humedales.

#### **4.11 Instalación de paneles solares y conexiones eléctricas**

El sistema de bombeo será realizado por una bomba sumergible solar (5.1.5.1). Para proveer de energía renovable a la bomba y a los sistemas de aireadores, se implementará un sistema de abastecimiento de energía renovable solar luego de la cual se efectuarán las conexiones eléctricas como se detalla a continuación:

##### **4.11.1 Instalación de paneles solares**

El sistema solar será instalado sobre el techo de la caseta-oficina con paneles solares de 375 W monocristalino de 48.4 V.

Estos paneles serán unidos en serie (positiva-negativa) hacia un VARIADOR de frecuencia de 750 Watts de salida, el cual se instalará con un gabinete metálico con IP 65, que contiene una llave termoswitch de control de acceso de corriente de los paneles y un guardamotor de 2.5 a 4 Amperios para la electrobomba.

Así mismo se incluirá un reloj controlador el cual permitirá un funcionamiento de la bomba cada dos horas por 15 minutos. Esta frecuencia se irá variando de acuerdo a los requerimientos del proyecto. La instalación tanto de paneles como del panel eléctrico será realizada por personal especialista en energía renovable.

#### 4.11.2 Instalación de conexiones eléctricas

Se instalará un tendido eléctrico desde el panel de control hasta la bomba sumergible principalmente y a conexiones menores como el del aireador desde la caseta oficina instalada en el proyecto. Se utilizará cable AWG#12 siendo el cableado instalado en tuberías para luz de ½". Este trabajo será manual por el personal especialista en energía renovable.

#### 4.12 Plan de seguridad y salud laboral

Se cuenta con el Plan Básico de Seguridad y Salud ocupacional (PBSSO) desarrollado para este proyecto, que incluye la matriz de Identificación de peligros riesgos y consecuencias (IPERC); y, con el "Plan para la Vigilancia, prevención y control COVID en el trabajo". Adicionalmente se tienen los procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS) y los formatos requeridos para mantener la seguridad y salud ocupacional durante las labores de construcción y operación en el presente proyecto, tomando todas las medidas de prevención de riesgos de accidentes laborales y enfermedades profesionales.

El PBSSO podrá ser modificado en función del proceso de ejecución de la obra y de las posibles incidencias que puedan surgir a lo largo del mismo.

Se instalará una estación de emergencia en el área de trabajo que contará con todos los elementos de primeros auxilios: botiquín, extintor, kit anti derrame y panel informativo en el que contará el mapa de riesgos y los números de emergencia.

#### 4.13 Instalación de componentes auxiliares

Se instalará una caseta – oficina temporal que cuente con las mínimas facilidades para desarrollar actividades administrativas y protección de equipos de muestreo. Esta caseta contará con la seguridad de llave para evitar ingresos no controlados a la documentación y equipos existentes en su interior.

## 5 Construcción del sistema de tratamiento del proyecto piloto 07-P-02

### 5.1 Limpieza y eliminación de desechos del terreno.

Se retiró toda la vegetación existente en la zona de construcción de los humedales extrayendo las plantas arbustivas (maleza). La carga y el transporte del material recogido se dispusieron en zona fuera del proyecto. Asimismo, se eliminaron los restos de vegetación y raíces con herramientas manuales.



Imagen 1. Limpieza y eliminación de desechos del terreno.

### 5.2 Señalización en los humedales durante la implementación.

Se colocó señalización utilizando franjas con cintas plásticas de que advierte el peligro de obra. Además, se dotó al personal de la obra de los elementos de protección personal (EPP). Durante la etapa de construcción se instaló la cinta que advierte el peligro de la obra, prohibiendo el ingreso, en lugares visibles hasta el final de la etapa constructiva.



Imagen 2. Señalización en los humedales durante la implementación.

### 5.3 Nivelación y compactación del terreno.

El relleno se realizó en dos etapas: la primera con rocas de 30 a 40" de diámetro con una altura de 0.50 m. Luego se rellenó con lastre hasta lograr la altura de 2.20 m. sobre la superficie actual. Se añadió aproximadamente 1 125 m<sup>3</sup> (75 volquetadas de 15m<sup>3</sup>) de material de préstamo (tierra) hasta alcanzar la altura de 2.0 m sobre el nivel del suelo. Luego se procedió a una compactación preliminar con la retroexcavadora, quedando en una altura total de 2.00 m. para luego nivelar con la misma toda el área. La zona de construcción de los humedales tiene las siguientes dimensiones: 87x 7 x 2 m (L x A x H). La compactación final del terreno se realizó de forma manual con una compactadora de plancha. Se excavó una zanja para eventos mayores la cual evitará que los humedales sean afectados por posibles deslizamientos provenientes de la zona con mayor elevación sobre ellos y los excesos de agua de lluvia.



*Imagen 3. Nivelación y compactación del terreno.*

### 5.4 Construcción de humedales artificiales de tratamiento.

Se realizó la construcción de dos humedales artificiales subsuperficiales horizontales invertidos.

#### 5.4.1 Trazo y excavación para los humedales sobre la superficie nivelada.

Se procedió al trazo de la superficie a las dimensiones propuestas para cada humedal de 40 x 3m. Se procedió a la excavación de los humedales hasta lograr la profundidad vertical de 1.5 m. Las paredes se acondicionaron de forma inclinada para lograr acortar el ancho de la base a 1 m.



*Imagen 4. Trazo y excavación para los humedales.*

#### 5.4.2 Compactación de la zona de los humedales.

Se procedió a la compactación de las áreas excavadas del humedal tanto de paredes como de piso, en forma manual con la compactadora de plancha.



*Imagen 5. Compactación de las áreas excavadas.*



*Imagen 6. Compactación de la zona de los humedales.*

#### 5.4.3 Retiro de elementos cortantes y excavación de zanja para borde de geomembrana (superficie de apoyo).

Se realizó la inspección de toda el área del humedal en su conformación interna eliminando todos los elementos rocas punteagudas que puedan afectar la instalación de la geomembrana. Así mismo, se excavó una zanja de 0.30 m x 0.20 m (A x H), en todo el borde de la poza del humedal, dejando 0.50 m de pisada (borde a la zanja) para lograr el anclaje de la geomembrana. Se realizó un análisis de suelos del material de préstamo (granulometría, límite líquido, límite plástico) usado para la construcción de los humedales.



*Imagen 7. Retiro de elementos cortantes y excavación de zanja para borde de geomembrana (superficie de apoyo).*

#### 5.4.4 Instalación de la geomembrana para los humedales artificiales.

Una vez obtenida la superficie de apoyo de los humedales se instaló la geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) lisa de 2.00 mm de espesor nominal. Se colocó la geomembrana en toda la dimensión de la poza, con equipos de termofusión y extrusión. Previo a ello, se realizó prueba in situ de termofusión de la geomembrana para la calibración de tiempo de calentamiento y velocidad de corrida de la misma.



Imagen 8. Instalación de la geomembrana para los humedales artificiales.



Imagen 9. Se colocó la geomembrana en toda la dimensión de la poza, con equipos de termofusión y extrusión.

## 5.5 Sistema de recolección y distribución de agua.

La succión de agua desde el lago y su distribución se realizará a través de un sistema que comprende las siguientes etapas y procesos: bombeo de agua, conducción del fluido, almacenamiento y distribución hacia los humedales de tratamiento.

### 5.5.1 Bombeo de agua

El bombeo de agua desde el Lago Titicaca hasta la zona de emplazamiento de los humedales (tanque receptor de 2500 litros) se realiza través de una bomba sumergible solar de las siguientes características:

- Marca: MEBA
- Potencia de bomba: 1 hp = 750W
- Caudal de bomba: 116 litros /minuto = 6960 litros /hora.
- H: 10 metros
- RPM: 3450 min-1
- Voltaje: 220 V
- Ciclo: 60 Hz

La conducción del bombeo de agua hasta el tanque elevado de 2500 litros, se realiza a través de 87m de manguera politubo HDPE de 1" calibre 10, para soportar alta presión.

La instalación de la bomba se realiza en la orilla del Lago Titicaca a una profundidad de 1.3 m, colocando a la bomba para su protección dentro de una estructura metálica de aluminio, con patas de anclaje de 0.20 m. Esta bomba succiona el agua hacia el tanque de almacenamiento, siendo controlado el funcionamiento por electrodos de sensor de nivel (alto y bajo) que la encenderá de acuerdo al consumo que se proporcione a los humedales. La instalación se realizó manualmente utilizando las medidas de seguridad necesarias como: trajes de agua (pecheras con bota y pantalón unidos), chalecos salvavidas, aro de seguridad, botas tobilleras y arnés retráctil.

Esta bomba tiene una salida de 2" a la cual se le colocó un acople de reducción a 1". Esta bomba es accionada por el sensor de nivel (con electrodos), que recibe las señales de bajo y alto nivel provenientes del Variador de corriente, realizando el control automático de funcionamiento de la misma.



Imagen 10. La instalación de la bomba se realiza en la orilla del Lago Titicaca a una profundidad de 1.3 m.

#### 5.5.2 Conducción del fluido

Se instalaron las tuberías utilizando politubos los cuales son de rápida instalación y, al no requerir piezado, representan menor riesgo de fugas y de rompimiento.

La tubería fue sumergida y enterrada en su mayor tramo, principalmente en los lugares de acceso a la zona de emplazamiento de los humedales, por el posible tránsito de vehículos o de personal para evitar accidentes a las personas o vehículos y daños a la estructura de conducción.



Imagen 11. Se instalaron las tuberías utilizando politubos los cuales son de rápida instalación.

### 5.5.3 Almacenamiento de agua

Se instaló un tanque de fibra de vidrio de 2 500 litros de capacidad para el almacenamiento del agua (figura 30). La instalación del tanque se efectuó sobre una losa de concreto que permite una base firme y libre de obstáculos.



Imagen 12. Se instaló un tanque de fibra de vidrio de 2 500 litros de capacidad.

### 5.5.4 Distribución de agua

Se instaló un tren de descarga del fluido para abastecer a ambos humedales, el cual contiene: una válvula PVC de 1" que controla el ingreso de agua al ramal de cada humedal, un caudalímetro (con totalizador y registro de litros /minuto), una válvula de muestreo PVC de 1/2".



Imagen 13. Se instaló un tren de descarga del fluido para abastecer a ambos humedales.

## 5.6 Selección, distribución y acondicionamiento de la vegetación.

Se incorporaron las especies vegetales en el humedal considerando las mejores condiciones para su extracción, transporte, acondicionamiento y reposición en el proceso de operación de los humedales.

Se consideraron el uso de especies hidrófitas autóctonas de la zona como *Schoenoplectus* sp. "totora" e *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" que se encuentren en zonas de aguas contaminadas de la bahía interior.

Se instaló en el humedal 2 el *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" procurando uniformidad en la longitud de las raíces, las cuales tienen un largo de 0.20 m promedio. Todos los individuos a extraer deben observarse en buen estado y presentar similar vigor.

Las plantas a extraer de *Schoenoplectus* sp. "totora" tendrán 3-4 tallos cada una con yemas y rizomas, su instalación se desarrollará en soportes SFHV de polietileno de forma hexagonal, que le dará soporte y flotabilidad, permitiendo la facilidad de su manejo. A la fecha aún no llega estos soportes por los problemas de tráfico naviero por la coyuntura mundial actual, su fecha estimada, según el último boletín será el 29 de marzo a puerto de Callao, estimándose su arribo a Puno para el 4 ó 5 de abril como se evidencia en el anexo 05.

Se implementarán dos humedales: Un humedal con *Schoenoplectus* sp. "totora" soportada en flotadores y un humedal con *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" flotante. La densidad de siembra y el total de plantas a sembrar se presenta en el cuadro 01

Humedal	Medio de soporte para plántulas	Especie	Densidad (plantas / m <sup>2</sup> )	Área de siembra (m <sup>2</sup> )	Total, de plántulas
1	Artificial flotante	<i>Schoenoplectus</i> sp.	9	100	900
2	Natural flotante	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	260	100	26000

Los tratamientos a implementar permitirán obtener una elevada capacidad de intercambio asegurando la retención de sólidos y posterior transformación del material orgánico e inorgánico.

Los humedales de tratamiento y su correspondiente medio de soporte y funcionamiento esperado se detallan a continuación:

- Humedal 1, con *Schoenoplectus* sp. "totora" soportada en flotadores artificiales manteniendo sumergiendo sus raíces.
- Humedal 2, con *Hydrocotyle ranunculoides* "sombbrero de agua" flotante, cuyas raíces mantendrán un filtro biológico para retener sólidos y elementos contaminantes.

Los procesos de instalación de los humedales son manuales, al igual que con el 0023 relleno interno de soportes de plantas y la plantación de las especies botánicas a evaluar.

Todos los humedales cuentan con una tubería de ingreso y una descarga especial que mantiene el nivel hidráulico del humedal a 0.50 a 0.60 m de altura, contando con un tubo de descarga de 2" para toma de muestras.



*Imagen 14. Se incorporaron las especies vegetales.*



*Imagen 15. Flotadores artificiales*

## **5.7 Instalación de medidores de caudal.**

Se instalará un medidor de caudal (caudalímetro), en las tuberías de 1" de ingreso de agua a cada humedal. Los caudalímetros nos permitirán

determinar el caudal actual y el acumulado para los cálculos correspondientes de la carga contaminante.

El agua tratada será conducida a través de tuberías de 2" de diámetro hacia dos puntos de ingreso al lago Titicaca. Las tuberías serán de PVC y se instalarán manualmente.



Imagen 16. Se instalará un medidor de caudal (caudalímetro).

## 5.8 Cerco perimetral y accesos a los humedales

Se cuenta con una delimitación y estandarización del área de trabajo, así como de la instalación del cerco de seguridad, detallados a continuación:

### 5.8.1 Delimitación y estandarización de área de trabajo

Se delimitó las áreas del proyecto con cinta de seguridad color amarillo y rojo, instalando alambrado de púas, atada a parantes de madera para los ajustes correspondientes, en las zonas que se tengan que desarrollar los trabajos, estandarizando el área de trabajo de acuerdo a la establecido para cada servicio constructivo. Así mismo se implementarán letreros de señalización y contenedores para residuos.

### 5.8.2 Instalación de cerco de seguridad

Se instalaron cercos de seguridad en las zonas requeridas del proyecto de los humedales: un cerco que aisle la zona de los humedales artificiales y sus componentes principales; y otro en la zona de recepción de agua (tanque receptor). Esta labor se ejecutó manualmente colocando postes de media altura y alambre de púas.

## 5.9 Sistema de fumigación activo para posibles ataques de plagas y otros

Se realizarán fumigaciones mensuales ante posibles ataques de plagas o similares

### 5.10 Sistema de aireación

La aireación del tanque de almacenamiento se realizará con el ingreso de agua al mismo, por un efecto vortex desarrollado por la conformación del politubo instalado en su interior.



*Imagen 17. La aireación del tanque de almacenamiento se realizará con el ingreso de agua al mismo.*

### 5.11 Instalación de paneles solares y conexiones eléctricas

El sistema de bombeo será realizado por una bomba sumergible solar. Para proveer de energía renovable a la bomba y a los sistemas de aireadores, se implementará un sistema de abastecimiento de energía renovable solar luego de la cual se efectuarán las conexiones eléctricas como se detalla a continuación:

#### 5.11.1 Instalación de paneles solares

El sistema solar se instaló sobre el techo de la caseta-oficina con 4 paneles solares fotovoltaicos de 270 W monocristalino de 31.35 V.

Estos paneles serán unidos en serie (positiva-negativa) hacia un INVERSOR VARIADOR de frecuencia de 750 Watts de salida, el cual se instalará con un gabinete metálico con IP 65, que contiene una llave termoswitch de control de acceso de corriente de los paneles.

El INVERSOR VARIADOR también cuenta con un controlador de nivel (alto y bajo) para el tanque de almacenamiento. Esta frecuencia se irá variando de acuerdo a los requerimientos del proyecto. La instalación

tanto de paneles como del panel eléctrico fue realizada por personal especialista en energía renovable.



Imagen 18. El sistema solar se instaló sobre el techo de la caseta-oficina.

#### 5.11.2 Instalación de conexiones eléctricas

Se instaló un tendido eléctrico desde el panel de control hasta la bomba sumergible principalmente con cable vulcanizado 3x14 AWG ELCOPE, el cual en las zonas superficiales fue protegido con politubo HDPE de 1/2". Este trabajo fue realizado manualmente por el personal especialista en energía renovable.



Imagen 19. Panel de control.

### 5.12 Plan de seguridad y salud laboral

Se cuenta con el Plan Básico de Seguridad y Salud ocupacional (PBSSO) desarrollado para este proyecto, que incluye la matriz de Identificación de peligros riesgos y consecuencias (IPERC); y, con el "Plan para la Vigilancia, prevención y control COVID en el trabajo". Adicionalmente se tienen los procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS) y los formatos requeridos para mantener la seguridad y salud ocupacional durante las labores de construcción y operación en el presente proyecto, tomando todas las medidas de prevención de riesgos de accidentes laborales y enfermedades profesionales.

El PBSSO podrá ser modificado en función del proceso de ejecución de la obra y de las posibles incidencias que puedan surgir a lo largo del mismo.

Se instalará una estación de emergencia en el área de trabajo que contará con todos los elementos de primeros auxilios: botiquín, extintor, kit anti derrame y panel informativo en el que contará el mapa de riesgos y los números de emergencia.

### 5.13 Instalación de componentes auxiliares

Se instaló una caseta – oficina temporal que cuente con las mínimas facilidades para desarrollar actividades administrativas y protección de equipos de muestreo, y en la cual está instalado el módulo de control eléctrico. Esta caseta contará con la seguridad de llave para evitar ingresos no controlados a la documentación y equipos existentes en su interior. Como medida de protección disuasiva, se instaló una luminaria solar de 90W con sensor de movimiento, la cual fue colocada con un poste de 4 m de altura. La zona de la caseta ha sido protegida por un alambrado de púas adicional con una puerta y candado.



*Imagen 20. Se instaló una caseta – oficina temporal.*

## 6 Operación y mantenimiento

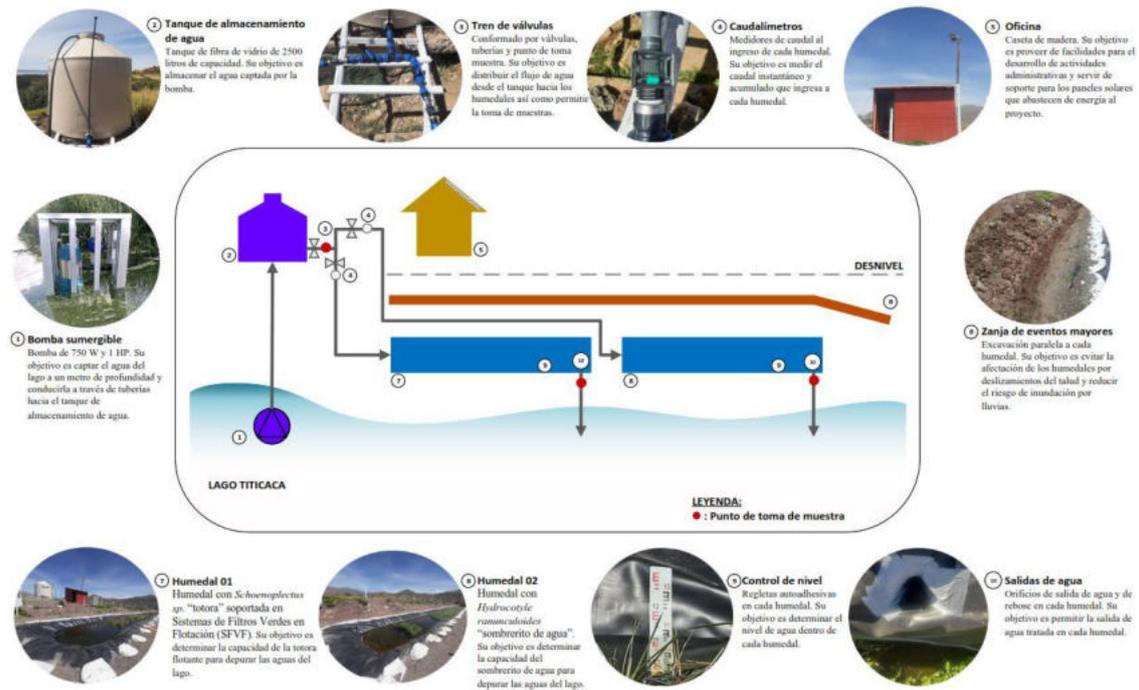


Imagen 21. Esquema del sistema de tratamiento.

### 6.1 Sistema eléctrico

La operación del sistema eléctrico es completamente automática, sólo debería corroborarse que el variador se encuentre funcionando, el Variador de voltaje con el teclado inteligente presente en la parte frontal del mismo.

La energía de los paneles es dirigida hacia una llave TERMOSWICHT, la cual controla el paso de energía hacia el variador. La posición de la llave en posición de encendido es subiendo la palanca hacia la zona superior: ON.

De esta manera el variador recibe energía. La pantalla del variador mostrará la indicación OFF (no working), que es APAGADO (no trabajando).

Para el encendido del variador, se deberá pulsar un "botón de encendido" ubicado en la parte inferior del mismo. Lo encontrará al costado de los cables de ingreso de corriente hacia el Variador. Luego de encenderlo la pantalla mostrará la indicación ON (working), que significa PRENDIDO (trabajando).

Luego presione la tecla ENTER y aparecerá una clave 0000, pulse 4 veces ENTER y aparecerá el MENU del equipo. Avance con la flecha hasta la posición 5. WELL SENSOR, presione ENTER y luego presione ENABLE para que el sistema trabaje en automático con los sensores ubicados en el tanque receptor del efluente fitosanitario. Cuando el agua toca el sensor

de nivel alto, la electrobomba prende hasta llegar al sensor de nivel bajo en que se apaga.

En el caso que se requiera vaciar el tanque receptor del efluente fitosanitario en 5. WELL SENSOR se coloca DISABLE, el cual deja prendida la electrobomba manualmente. Es preferible que esta función sea aplicada con mucho cuidado ya que puede dejar sin agua a la electrobomba y causar serios problemas a la misma.

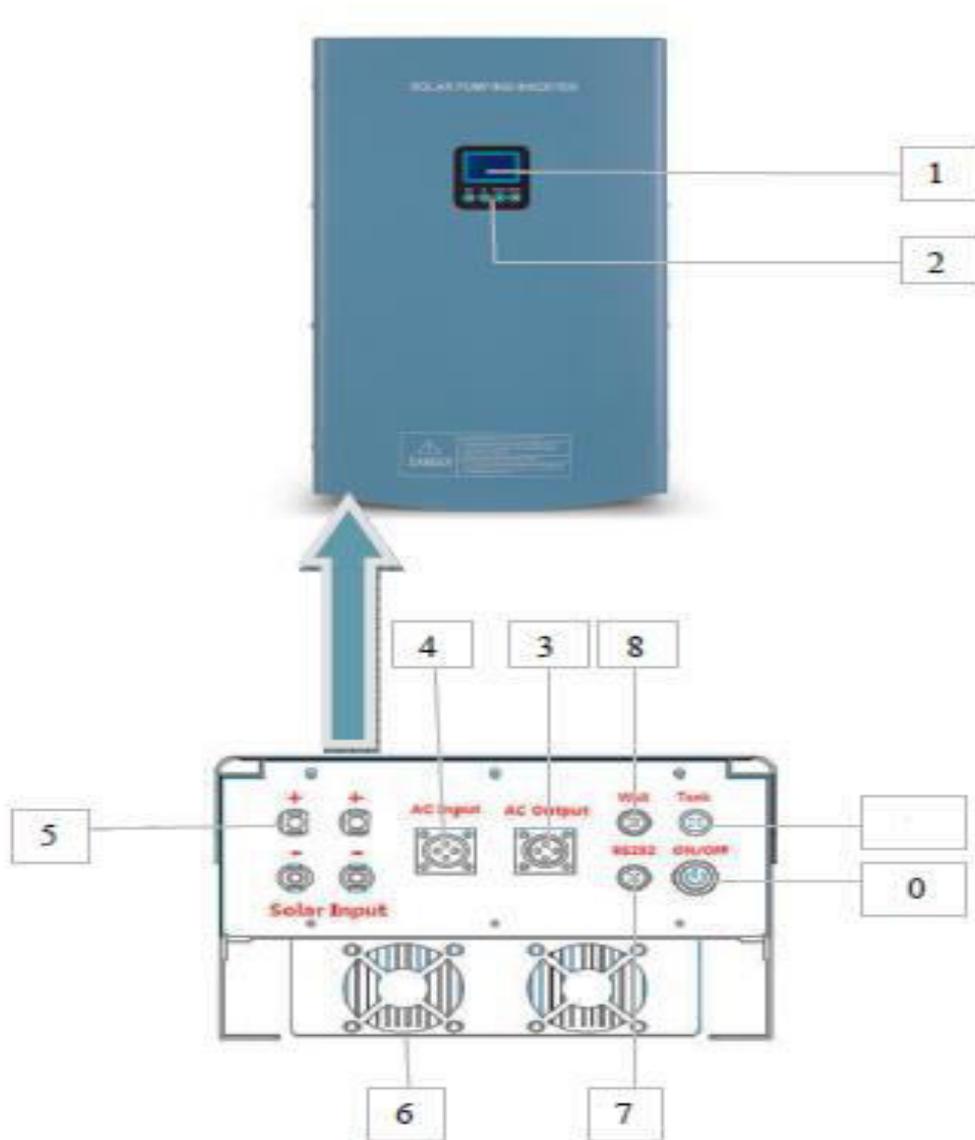


Figura 6. Teclado inteligente en parte frontal e interior del variador.

Tabla 2. Descripción de parte del variador

NÚMERO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETROS
1	Pantalla LCD con convertor	128*64px 16*4 caracteres
2	Teclado	Esc, Up, Down, Enter
3	AC Salida	Cuatro líneas (3Fases y Línea a Tierra) Rojo/amarillo/azul/amarillo_Verde IP65
4	AC/Ingreso de batería	Cuatro líneas (3 Fases y línea a tierra)
5	DC ingreso	Negativo y Positivo MC4 / IP68
6	Ventilador de enfriamiento por aire	IP68
7	Comunicaciones	RS485 / RS232 IP65
8	Sensor de cisterna	IP65
9	Sensor de tanque elevado	IP65
10	Control de encendido ON/OFF	Encendido del inversor: el LED ON Parada: El LED OFF IP65

## 6.2 Ingreso de caudal a los humedales

Se da inicio al sistema de conducción colocando los "paneles de control" a los caudalímetros, los cuales son guardados en el interior de la caseta durante la noche. Estas piezas se encuentran debidamente rotuladas.

Una vez que el sistema comienza a operar se puede proceder a las mediciones diarias del humedal. Durante la operación se realizaron 03 mediciones diarias a las 08:00, 12:30 y 16:30.



Imagen 22. Mediciones diarias del humedal.

Una vez tomadas las muestras se llevan al interior de la caseta para realizar las lecturas con el multiparámetro de pH, Temperatura, Conductividad y Oxígeno disuelto. Los datos se registran en un formato diariamente para poder realizar el seguimiento de los tratamientos, además se registra el caudal diario.



*Imagen 23. Realizar las lecturas con el multiparámetro.*

Al finalizar el día, después de la tercera toma de muestras se procede a retirar las tapas de control de los caudalímetros y guardarlas en la caseta, así como cualquier otro elemento usado durante el día, se cierran las llaves de paso y se cierra la puerta y coloca el candado para seguridad del material.

### **6.3 Sistema de tratamiento.**

Los humedales deben ser revisados a diario mediante una inspección visual de las instalaciones para corroborar que todo se encuentra en orden y no ha ocurrido ningún incidente.

Adicionalmente, dos veces por semana se deben realizar una inspección de las plantas llenando el formato correspondiente en el que se registra observaciones de características de las plantas como: % de cobertura, vigor de plantas, largo de raíces, etc.

### **6.4 Fumigación**

Se realiza el control de plagas con las trampas amarillas, ubicadas en los extremos del humedal. Cuando el grado de infestación sea severo (supere los 150 individuos/trampa) deberá procederse a la fumigación con insecticida.

## 6.5 Podas

Las plantas aun estando secas siguen inyectando oxígeno dentro del humedal, sin embargo, la acumulación de material vegetal sobre los sistemas flotantes, no favorece la aparición de nuevos plantones al principio de cada ciclo vegetativo es por eso que de realizarse debería hacerse en una época que no represente un riesgo para las plantas.

## 7 Mantenimiento de componentes del sistema.

### 7.1 Sistema Eléctrico

#### 7.1.1 Limpieza de paneles solares

Se debe retirar la suciedad acumulada sobre los paneles solares al menos 3 o 4 veces al año. Para dicha limpieza se puede usar un trapo o cepillo de poliéster de cerdas gruesas y un balde con agua y unas gotas de jabón.

#### 7.1.2 Cableado

Debe realizar una inspección del cableado una vez al mes para corroborar que se encuentra en buenas condiciones.

#### 7.1.3 Detección de errores en el Variador

El variador emitirá señales de alerta por cada error detectado de manera que sea rápidamente solucionable.

En el cuadro 02, se presentan los errores posibles, sus códigos y la descripción en español. El tratamiento de cada error se encuentra especificado en el manual del Variador páginas del 25 al 30. (2019 Solar Pumping Inverter User Manual versión 3.20.19), que es parte del Dossier de calidad.

*Tabla 3. Detección de errores en el Variador.*

ESTADO DEL ERROR	CÓDIGO DEL ERROR	DESCRIPCIÓN DEL ERROR
OVER LOAD	E1	Sobrecarga
OVER VOLTAGE	E2	Sobre voltaje
IGBT ERROR	E4	IGBT error
AC OUTPUT OVER CURRENT	E8	Sobre corriente de salida AC
OVER TEMPERATURE	E16	Sobre temperatura
POWER SUPPLY ERROR	E32	Error de suministro eléctrico
AC OUTPUT PHASE LOST ERROR	E64	Error por pérdida de fase de salida AC
OVER LOAD + OVER TEMPERATURE	E18	Sobre carga + sobre temperatura

### 7.2 Sistema de bombeo y almacenamiento.

#### 7.2.1 Bomba de agua

La electrobomba tiene un volumen hidráulico de bombeo de fábrica. Deberá verificarse cualquier reducción en el bombeo.

Podría presentarse cualquier reducción del bombeo por un ensuciamiento de partículas muy grandes en la zona de succión de la electrobomba. En este caso se requiere detener el paso de energía a la bomba, apagando el Variador.

La tubería de descarga de la electrobomba cuenta con una conexión universal de 2" de diámetro, la cual puede desenroscarse girando en sentido anti horario para soltar la conexión hidráulica. Se puede jalar la bomba hacia el exterior haciendo uso de la cadena que se encuentra atada hacia el manubrio de la misma.

Se deberá inspeccionar y limpiar cualquier elemento obstructor, que pudiese impedir el buen funcionamiento de succión. Luego de ello volver a reconectar la conexión universal girando en sentido horario, ajustando la tubería de la electrobomba suavemente. Prender el sistema y colocar el guardamotor en posición ON.

### **7.3 Sistema de conducción y control.**

La inspección visual de las conexiones hidráulicas se realizará sobre cualquier opción de goteo en las uniones de los componentes de PVC del sistema.

En caso se cuente con cualquier goteo se puede detener el sistema de bombeo, secar la zona que se encuentre goteando y pasar pegamento para PVC (cemento de sellado) o colocar cinta teflón en las roscas y juntas de unión.

### **7.4 Sistema de tratamiento.**

Se debe mantener el perímetro de los humedales libres de cualquier residuo, y hacer una revisión diaria de los humedales para descartar tener presencia de animales salvajes.

### **7.5 Componentes auxiliares.**

- a) Oficina: debe mantener limpia y ordenada de manera diaria.
- b) Cercos perimétricos: debe verificarse su buen estado y de percibirse algún deterioro deben realizarse el mantenimiento correspondiente.
- c) Zanja de eventos mayores: debe verificarse su buen estado sobre todo durante la época de lluvias y de ser necesario realizar el mantenimiento con picos y palanas.
- d) Trampas amarillas: Deben limpiarse semanalmente, en caso el plástico se haya gastado proceder a su reemplazo.
- e) Mochila fumigadora: Antes de cada uso, debe revisarse cuidadosamente si hay escapes en el tanque o alrededor de la bomba de la aspersora. Si se encuentran goteos arreglarse inmediatamente. Revise que todas las partes estén bien ajustadas.
- f) Señalética: Deben limpiarse mensualmente y de presentar algún signo de deterioro ser reemplazadas.

## 8 Consideraciones de seguridad personal.

El operario es la persona que aplica un control específico en cada fase del sistema, control esencial para prevenir, reducir a niveles aceptables o eliminar las causas que puedan afectar al funcionamiento de dicho sistema.

- El operario deberá conocer y aplicar las siguientes medidas para evitar riesgos de salud:
- Utilizar guantes y botas de hule en todas las actividades que requieran contacto con el agua.
- Utilizar un overol o ropa, que se use exclusivamente en el área de trabajo.
- El operario debe tomar una ducha de agua al término de la jornada para evitar transportar microorganismos a su casa. Mínimo, debe lavarse los brazos, manos y cara con jabón y agua abundante.
- Es conveniente que cualquier persona que visite el humedal se cuide lo máximo posible de no tener contacto con el agua residual.

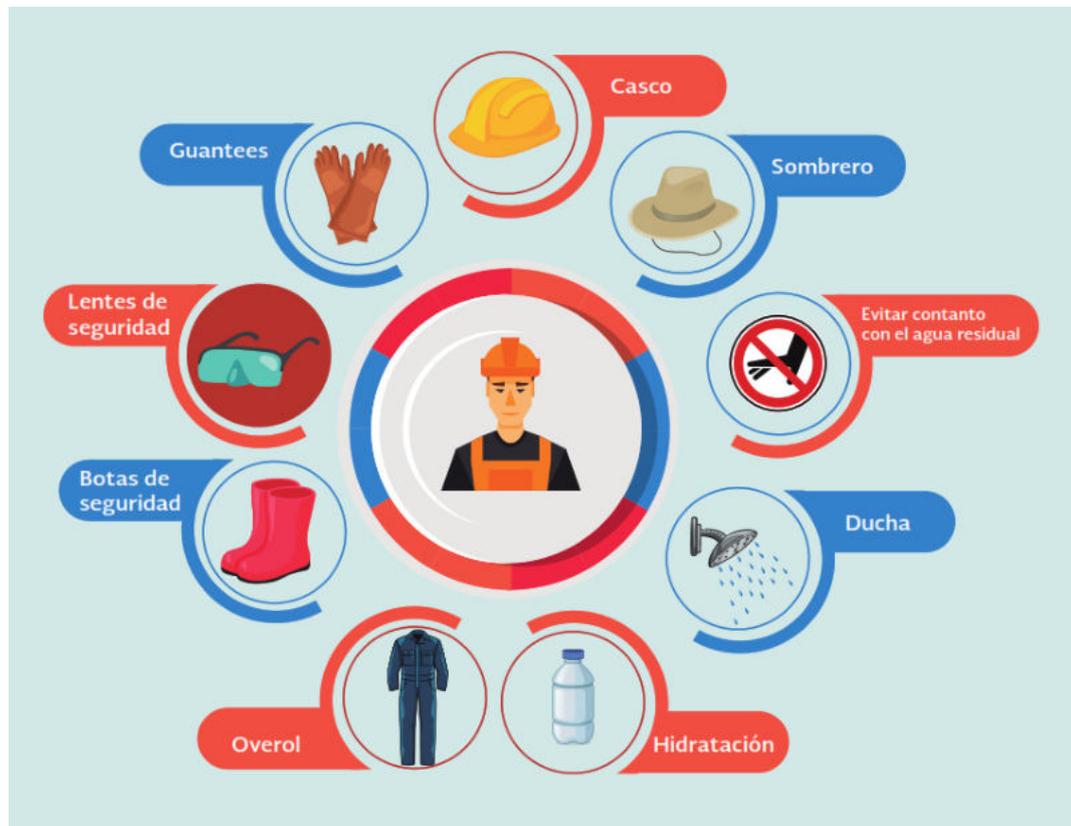


Figura 7. Uso de equipo de protección personal.

## 9 Cierre del sistema.

### 9.1 Cosecha de especies vegetales

Los individuos de *Hydrocotyle ranunculoides* "sombrecito de agua" deberán ser trasladados desde el humedal 02 hacia el lago Titicaca mientras que los individuos de *Schoenoplectus sp.* "totora" serán cortados e incorporados en el suelo como materia orgánica. Luego, se retirarán los

soportes hexagonales y se retirarán las anclas del sistema de flotación. Los materiales obtenidos podrán ser reutilizados o gestionados como residuos según la normativa vigente al momento de realizar la operación.

## **9.2 Desmontaje del sistema hidráulico**

Se vaciará el tanque de almacenamiento de agua en los humedales abriendo las correspondientes válvulas. Luego, el agua dentro de los humedales será bombeada hacia el lago. Posteriormente, se retirarán los ladrillos de cemento al costado de los humedales y se retirará la geomembrana. Finalmente, se desacoplarán las válvulas, tubos y politubos conectados desde y hacia el tanque de almacenamiento de agua. Los materiales obtenidos podrán ser reutilizados o gestionados como residuos según la normativa vigente al momento de realizar la operación.

## **9.3 Desmontaje Del Sistema Eléctrico**

El desmontaje del sistema eléctrico se debe realizar asegurándose que todos los equipos se encuentren apagados. El especialista en instalaciones eléctricas se asegurará que los componentes se encuentren desenergizados y desconectará los componentes del tablero. Posteriormente desacoplará los paneles solares y desmontará la bomba y el compresor. Finalmente, desinstalará el tablero de control.