

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOYA DESCONTAMINADORA PARA REMOCIÓN DE
PLOMO II DEL LAGO CHINCHAYCOCHA”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO FÍSICO

ELABORADO POR

ROGER ROBINSON VERAMENDI FERNÁNDEZ

ASESORA

Dra. MARÍA ESTHER QUINTANA CÁCEDA

LIMA-PERÚ

2020

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia de quienes recibí el constante apoyo a lo largo de mis estudios universitarios y, por supuesto, durante la elaboración de este manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por todo su amor y apoyo a lo largo de mi formación académica, siempre deseando lo mejor para mí.

A mi amigo José Sánchez, por su apoyo moral y sus consejos expertos acerca del trabajo de investigación.

A mi profesora María Quintana por darme la oportunidad de ser parte del proyecto RetoBio, por el soporte brindado y valiosas sugerencias durante todo del trabajo.

A la investigadora Anjuli Jain por su ayuda y valiosa asesoría brindada durante su estadía en el Perú, sus expertos comentarios fortalecieron la propuesta e implementación del trabajo.

A todo el equipo RetoBio, en particular a Noe Cabanillas, con quien sacamos adelante el proyecto, por ser un excelente compañero de trabajo.

A Innóvate Perú, por el financiamiento otorgado para la ejecución de lo programado y el alcance de los objetivos trazados

A la dirección de SERNANP por su disposición a ayudar y permitirnos laborar en los días de campo del proyecto.

A la empresa Seinen S.A.C por su asesoría acertada con respecto al diseño del prototipo para navegación.

A todos los colegas y amigos investigadores del Laboratorio de Películas Delgadas de la Facultad de Ciencias, por sus comentarios y ayuda incondicional para completar el trabajo.

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un prototipo basado en nanoadsorbentes para remoción de especies de plomo II del Lago Chinchaycocha. Se emplea una metodología de diseño escalonado o por etapas en el que los parámetros de entrada inicial hacen referencia al rendimiento del nanoadsorbente en una columna de adsorción, las condiciones de campo como la disponibilidad de solar y de navegación. Así, en el prototipo se identifica tres sistemas: la red de conducción hidráulica, el sistema autónomo fotovoltaico y el sistema de flotación. El proceso de diseño inicia con ensayos de columna del nanoadsorbente bajo condiciones de campo de la zona de operación. En dicha experiencia se determina la curva de ruptura y con ello se caracteriza el rendimiento del filtro. Con estos resultados se simula condiciones de operación escalada y se determina la cantidad de adsorbente necesaria. Las dimensiones de la red de descontaminación se seleccionan de tal manera que la bomba hidráulica pueda sostener la altura manométrica generada en los filtros. Luego se dimensiona el sistema fotovoltaico autónomo necesario para sostener la energía diaria demandada por los dispositivos eléctricos, principalmente por el sistema de bombeo. Estos dispositivos son empaquetados en cubículos para su instalación. Con todos los componentes dimensionados, el sistema de flotaje se diseña de tal forma que otorgue al prototipo flotabilidad y estabilidad durante su navegación. Finalmente se identificó los materiales necesarios y se establecen pasos sencillos para la instalación del prototipo. Empleando el procedimiento expuesto y conociendo el principio de funcionamiento de los sistemas instalados en el prototipo, se identifica los principales aspectos a controlar en su diseño y son: el nivel de carga del adsorbente en la columna y la altura manométrica total en la red de conducción hidráulica. Para el caso del sistema fotovoltaico autónomo se establecieron condiciones que garanticen una operación óptima y larga durabilidad de los componentes eléctricos debido a que en su dimensionamiento se utilizó un factor de seguridad para los cálculos, permitiendo así, cubrir la demanda energética para el generador fotovoltaico y el acumulador energético. Se realizó el montaje del sistema de flotación a partir de materiales disponibles y de bajo costo. El método desarrollado, si bien es cierto, emplea un método intuitivo, no obstante garantiza

alcanzar los resultados de operación esperados. Finalmente, para el análisis económico, se considera el prototipo diseñado como suministro de agua potable a la población más cercana, y se determina el menor precio venta que garantice rentabilidad para la inversión en el proyecto. Los resultados indican la necesidad de establecer las condiciones para que pueda comercializarse el servicio ya que su puesta en marcha requiere de una inversión inicial considerable. El precio de venta determinado, por otro lado, resulta comparable al valor establecido por el mercado de forma que, su inserción a éste no presentaría inconveniente alguno. Entre las principales recomendaciones, se tiene el de analizar las especies presentes en la matriz del lago para optimizar el rendimiento del filtro y el de seguir mejorando el proceso de síntesis del nanoadsorbente, así se pueda lograr un menor costo de fabricación y otorgara al servicio mayor competitividad .

ABSTRACT

In the present work, a prototype based on nanoadsorbents for the removal of lead species II from Lake Chinchaycocha is designed and built. A phased or staged design methodology is used in which the initial input parameters refer to the performance of the nanoadsorbent in an adsorption column, field conditions such as solar availability and navigation. Thus, in the prototype three systems are identified: the hydraulic conduction network, the autonomous photovoltaic system and the flotation system. The design process begins with nanoadsorbent column tests under field conditions in the area of operation. In this experience, the breakthrough curve is determined and thus the filter performance is characterized. With these results, scaled operating conditions are simulated and the amount of adsorbent needed is determined. The dimensions of the decontamination network are selected in such a way that the hydraulic pump can support the manometric height generated in the filters. Then the autonomous photovoltaic system necessary to sustain the daily energy demanded by the electrical devices, mainly by the pumping system, is sized. These devices are packaged in cubicles for installation. With all the dimensioned components, the floating system is designed in such a way that it gives the prototype buoyancy and stability during navigation. Finally, the necessary materials were identified and simple steps are established for the installation of the prototype. Using the procedure outlined and knowing the principle of operation of the systems installed in the prototype, the main aspects to be controlled in its design are identified: the level of adsorbent load in the column and the total manometric height in the hydraulic conduction network. In the case of the autonomous photovoltaic system, conditions were established that guarantee an optimal operation and long durability of the electrical components due to the fact that in its dimensioning a safety factor was used for the calculations, thus allowing to cover the energy demand for the photovoltaic generator and the energy storage. The flotation system was assembled from available and low-cost materials. The developed process, although it employs an intuitive method, however it guarantees to achieve the expected operating results. Finally, for the economic analysis, the designed prototype is considered as a drinking water supply to the nearest population, and the lowest

sale price that guarantees profitability for the investment in the project is determined. The results indicate the need to establish the conditions for the service to be marketed since its commissioning requires a considerable initial investment. The determined sale price, on the other hand, is comparable to the value established by the market so that its insertion into it would not present any inconvenience. Among the main recommendations, we have to analyze the species present in the matrix of the lake to optimize the performance of the filter and to continue improving the process of synthesis of the nanoadsorbent, so that a lower manufacturing cost can be achieved and it will give the service greater competitiveness.

INDICE

PRÓLOGO.....	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. ANTECEDENTES.....	5
1.2. JUSTIFICACION.....	6
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.4. HIPÓTESIS.....	11
1.5. OBJETIVOS.....	11
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO	13
2.1. PLOMO (II) EN ECOSISTEMA ACUÁTICO	13
2.2. COLUMNAS DE ADSORCIÓN PARA REMOCIÓN DE PLOMO (II).....	16
2.3. RED DE CONDUCCIÓN HIDRÁULICA.....	26
2.4. SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO	32
2.5. SISTEMA DE FLOTACIÓN.....	41
2.6. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	45
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	48
3.1. CASO DE ESTUDIO: LAGO CHICNCHAYCOCHA	48
3.2. MATERIAL ADSORBENTE: AREMAGO	52
3.3. ENSAYOS DE COLUMNA CON EL ADSORBENTE	53

3.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO BOYA DESCONTAMINADORA	56
3.5. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	58
CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES	63
4.1. ENSAYO DE COLUMNA CON EL ADSORBENTE	63
4.2. DISEÑO DE LA RED DE CONDUCCIÓN HIDRÁULICA	67
4.3. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO	76
4.4. IMPLEMENTACIÓN DE CUBÍCULOS.....	82
4.5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN	85
4.6. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL PROTOTIPO	88
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	91
5.1. ENSAYO DE COLUMNA CON EL ADSORBENTE	91
5.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RENDIMIENTOS	93
5.3. FACTORES PARA EL DISEÑO DE LA RED HIDRÁULICA.....	98
5.4. CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO	103
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE COSTOS	106
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES.....	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

ANEXOS 126

PRÓLOGO

El presente trabajo tiene el propósito de abordar de forma original la problemática de la contaminación por plomo en aguas superficiales, a partir de una tecnología emergente como viene a ser la nanotecnología.

Resulta interesante el hecho de conocer una tasa de publicación científica de cerca de diez mil entregables diarios y la posibilidad de poder implementarlos en situaciones de campo abordando las necesidades reales de la población porque se tiene el convencimiento que la ciencia es finalmente concebida para mejorar el bienestar social. Si bien es cierto también es importante determinar si es que se ha generado el conocimiento suficiente para que cierta técnica o método sugerido se ponga a prueba. Desde luego, nada mejor que probarlo no bajo condiciones controladas sino reales en el que cada caso resulta inherentemente diferente por complejidad de las variables involucradas en su rendimiento, sobre todo para las tecnologías emergentes en el que el campo de conocimiento es muy escasa.

En este marco, la propuesta del presente trabajo es el diseño de un prototipo que permita la implementación de la nanotecnología en el tratamiento de aguas superficiales, en específico, para la remoción de especies de plomo existentes en lagos y lagunas del Perú. Llevará el nombre de boya descontaminadora. Se extiende una serie de pasos metódicos para el diseño del prototipo y se da a conocer una serie de aspectos en el proceso a tener en cuenta para garantizar la correcta operación del equipo. Es una propuesta que será útil a la hora de implementar sistemas de tratamiento de agua sobre todo en zonas remotas desconectadas del sistema de red eléctrica pero con alta disponibilidad solar. Finalmente, se analiza de forma atrevida la rentabilidad por invertir en la propuesta y las condiciones para su comercialización.

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados representa un problema de interés mundial por su impacto ambiental, social y económico. Tan sólo en el Perú existe un gran porcentaje considerable de lagos y lagunas contaminadas con especies metálicas ya sea por causas naturales o antropogénicas. Las investigaciones y actividades de monitoreo

evidencian que el estado de la contaminación se agrava principalmente por las actividades extractivas minero-metalúrgicas. Los pasivos ambientales de las manufactureras han demostrado representar enormes amenazas al ecosistema de la zona, perdiéndose en más de un caso, aquellos servicios ecosistémicos invaluableles que contribuyeron al bienestar social.

Los agradecimientos respectivos a todas aquellas personas que hicieron posible alcanzar los objetivos del presente trabajo. Sin más, le invito a leer el manuscrito.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Estudios revelaron hace poco que los cuerpos de agua local presentan niveles de concentración de metales pesados muy por encima de los límites establecidos por los estándares de calidad ambiental. El problema se extiende sobre todo en zonas que presentan una alta densidad de pasivos ambientales poniendo en riesgo el bienestar ambiental y social. En particular, la presencia de plomo II en estos recursos hídricos ha representado una amenaza evidente al ser una de las especies con mayor toxicidad y biodisponibilidad. Esta especie, a pesar de ser neutralizada por las condiciones físico-químicas del lago, su presencia en medio acuoso ha demostrado persistencia. Proyectos de monitoreo de calidad del agua indican que estas especies iónicas se extienden de forma no homogénea sobre todo el ecosistema lacustre siendo mayor su concentración en zonas próximas a las fuentes puntuales de contaminación.

Enmarcado en este contexto, numerosos trabajos de investigación abordan la problemática de la remoción de especies iónicas metálicas utilizando el método de adsorción con materiales sintetizados conocidas como nanoadsorbentes, los cuales presentaron, al menos en ensayos controlados, un alto rendimiento de operación. Un hecho que resulta interesante sobre todo si se necesita de materiales dotados de una extracción potente y selectiva de una matriz compleja como viene ser el caso de las aguas superficiales. Este hecho confirió un

marco positivo al adsorbente denominado Aremago (material compuesto formado de la arena, la magnetita y el óxido de grafeno), un material compuesto sintetizado en el Laboratorio de Películas Delgadas de La Facultad de Ciencias, el cual fue constituido a base de nanoadsorbentes y materiales que magnifican la capacidad resultante al unificar sus respectivos rendimientos. Prueba de ello se tienen los resultados de remoción de iones plomo que mostraron un alto poder extractivo bajo condiciones de operación controlados; una cinética de adsorción favorable y resultados de remoción iónica con el mayor rendimiento en una matriz sintética básica.

Estos resultados permitieron concebir la idea de implementar dicho nanomaterial novedoso para el tratamiento de aguas en los lagos y lagunas del Perú. Este acercamiento se da a partir de un diseño confiable adaptado a las condiciones de la zona de operación. Los principales variables de éxito son: eficacia, accesibilidad y eficiencia con grado de importancia conferida en ese orden. De esta forma, implementa un prototipo con tales funcionalidades impulsaría su empleo y cobraría mayor importancia como solución a la problemática de la contaminación ambiental por metales pesados. El trabajo tuvo muchos logros; la obtención del material adsorbente a base de nanopartículas, la elaboración de una patente industrial cuyo trámite se encuentra en curso y finalmente distinciones entre en el que destaca el Premio Proactivo.

El presente trabajo encuentra su justificación al considerar el impacto generado por la contaminación ambiental puesto que al abordarla se estaría haciendo frente a la alta tasa de exposición a metales pesados por parte de la población el cual tiene como resultado niveles de ingesta diaria de plomo nada despreciables (López Tarabochia, 2017; *Publicaciones-Labor Pasco*, 2018). Además se haría frente a la progresiva degradación ambiental, la cual se traduce en la pérdida de servicios ecosistémicos invaluable de biodiversidad, recurso hídrico, cultural, histórico y escénico. Además es preciso mencionar que si bien la comunidad académica local entiende el problema, existen escasas propuestas de remediación de recursos hídricos de forma directa y casi todos los trabajos de investigación están enfocados a la remediación de suelos empleando la técnica de la fitorremediación con especies nativas.

Este trabajo prueba la accesibilidad de recursos materiales y humanos de parte del grupo de investigadores.

1.1. Antecedentes

En los últimos años despertó el interés por materiales compuestos que unifican las capacidades de adsorción de sus constituyentes para el tratamiento de aguas contaminadas con especies orgánicas e inorgánicas (Yang et al., 2015), (Wei et al., 2019). Se necesita de una extracción potente y selectiva en una matriz acuosa compleja, debido a que otros solutos presentes pueden interferir en la adsorción del soluto deseado como es el caso de la materia orgánica natural, turbiedad y demanda química de oxígeno presentes en los ecosistemas lacustres (Nithyanandam, 2015), (Joseph et al., 2019). En ese sentido, muchos estudios encontraron resultados prometedores con respecto al nano material de óxido de grafeno, el cual presenta propiedades únicas en la remoción de especies metálicas, en particular de plomo con alta afinidad hacia ésta (Raghubanshi et al., 2016; Sitko et al., 2013).

Una investigación realizada en el marco del proyecto financiado por Innóvate Perú con código IDIBIO-1-P-262-17 («Concurso Reto Bio Innóvate Perú», 2017) encontró una forma sencilla de implementar el óxido de grafeno sobre un filtro de columna para el tratamiento de aguas. Permitted, a partir de un proceso de síntesis química, la obtención de un material adsorbente compuesto conformado por: arena, magnetita y óxido de grafeno, cada una con cierto poder de adsorción de plomo de acuerdo a la literatura consultada («Adsorption of metal ions on bed sediments: Hydrological Sciences Journal: Vol. 42, No 5», 2009; Raghubanshi et al., 2016; X. S. Wang, Lu, Zhu, Liu, & Ren, 2010). El material compuesto obtenido se caracteriza por un alto poder de remoción de plomo Pb (II) bajo diferentes condiciones de operación (concentración inicial, pH). Motivo por el cual, ya establecido un método para su producción escalada, pudo sugerirse como material adsorbente de plomo de lagos y lagunas. El rendimiento del material escalado en ensayos de agitación son listados en el Anexo 1.

Con respecto al diseño del equipo descontaminador, existen estudios realizados sobre la forma como se realiza el tratamiento, es decir, si se trata de cuerpos de agua estancados se

demonstró efectivo sistemas flotantes móviles para descontaminación in-situ («OLIVE - Natural Swimming Pool Filter», 2017). Es conveniente puesto que este tipo de sistema permite tratar aguas no solo de lagos sino también de pequeños estanques, relaves, reservorios sobre todo en lugares en el que no existe disponibilidad de espacio o está muy limitado por las condiciones del área, es decir, de difícil acceso. Aunque se encontraron desventajas respecto al modelo puesto que es susceptible de condiciones de marea alta o corriente superficial (C.-Y. Wang, 2013). En suma, las condiciones de la zona y el comportamiento del contaminante sobre un cuerpo de agua de gran extensión superficial justifican el modelo seguido (Hancock, 2013), (Poma, 2016).

1.2. Justificación

En el contexto local, la contaminación de lagos y lagunas por plomo Pb (II) representa un factor de riesgo considerable al bienestar social de manera que, las nuevas propuestas, deben de estar basadas en tecnología accesible, de fácil implementación pero sobre todo capaz de remover eficazmente (~99%) especies de plomo de los ecosistemas lacustres.

Hace poco, estudios revelaron problemas de contaminación de nuestros recursos hídricos por plomo (Pb II), como lo demostró una publicación hecha por IANAS (IANAS, 2019), el cual se realizó a partir de un informe titulado Diagnóstico de la Calidad de recursos hídricos (Autoridad Nacional del Agua, 2014). En este trabajo se consideró que la presencia de metales pesados podía deberse factores antropogénicos o naturales y fueron 59 unidades hidrográficas estudiadas de un total de 159 unidades en toda la extensión del país.

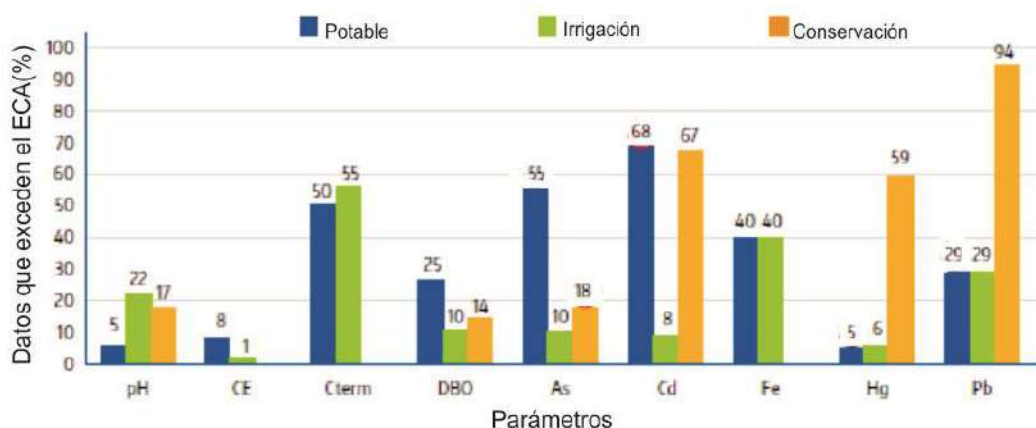


Figura 1. Número de cuerpos de agua que exceden el estándar de calidad medioambiental agrupado por tipo de uso (Castro de Esparza, 2016).

Como se puede observar un alto porcentaje cuerpos de agua (94%) excede el estándar calidad ambiental establecido («Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias», 2018) para conservación de lagos y lagunas. situación el cual no mostró signos de cambio positivo. Este hecho, el plomo (Pb II) en los ecosistemas lacustres, representa una amenaza seria pues genera una progresiva degradación ambiental y que finalmente perjudica el bienestar social al perderse los servicios ecosistémicos: biodiversidad, la provisión de agua de calidad, cultural, histórico y escénico. Se pierde la biodiversidad pues concentraciones por encima del estándar para lagos («Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias», 2018) generan efectos perjudiciales en el crecimiento y desarrollo del sistema vivo acuático y queda evidenciado en ensayos realizados (*Lead in Aquatic Environments—Understanding the Science & Responsibility | ILA - International Lead Association Website*, 2017) en el que se reconoce a la forma iónica libre Pb^{2+} como la especie con mayor biodisponibilidad y que además, en concentraciones moderadas tiende a la bioacumulación en organismos (Polat et al., 2015).

Este hecho es lamentable puesto que aumenta la exposición humana hacia esta sustancia tan tóxica. Primero, a través del consumo de agua. Si bien es cierto que el suministro de agua proviene de ríos las cuales son tratadas en plantas convencionales, las aguas de la cuenca lacustre podrían terminar penetrando los acuíferos lo que implica un aumento en la ingesta

diaria del ser humano. Finalmente, a través de la comida. Muchos pueblos de la zona alto andina utilizan las aguas del lago para fines de cultivo y ganadería y, como se mencionó anteriormente, estas especies se acumulan en animales y vegetales representando una amenaza. El nivel de ingesta diaria máxima consumida por una persona es de 25ug/kg de masa/semana(WHO | *Chemical hazards in drinking-water*, 2016) de manera que para una persona adulta es de 200ug/día mientras que para un niño de 80ug/día. Los cantidades altas de ingesta pueden resultar en apreciables niveles de concentración de plomo en la sangre lo cual representa un severo problema puesto que una vez en la sangre, hasta los niveles más pequeños de dosis (~5ug/dl) generan efectos adversos sobre la salud humana; la evidencia de mayor peso es el daño al desarrollo nervioso en los niños mientras que el aumento de presión sanguínea en los adultos (WHO | *Chemical hazards in drinking-water*, 2016). El impacto sobre la salud y el bienestar social ya es una realidad en territorio nacional, que en muchos lugares se magnificó por el tema de pasivos mineros ambientales(López Tarabochia, 2017). Es tal la situación, que MINSA implementó un programa de vigilancia epidemiológica para fines de monitoreo y control de las personas afectadas(«Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades», 2019).

Casos Expuestos a Metales Pesados y Metaloides-Perú

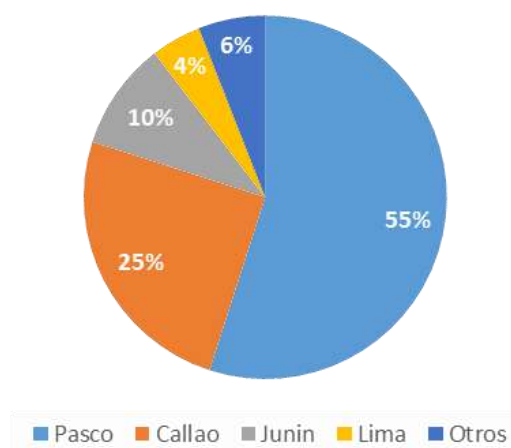


Figura 2. Notificación de casos expuestos a metales pesados y metaloides. Perú, 2018. («Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades», 2019)

En la figura 2, un caso expuesto se refiere a un individuo con los síntomas de intoxicación por plomo. Este diagrama circular se puede utilizar como criterio de selección de la zona de estudio al mostrar incidencia y gravedad del problema de contaminación por metales pesados. En otras palabras, es altamente probable encontrar cuerpos de agua contaminados por plomo en los lugares mencionados. Se tiene estudios sobre contaminación por metales pesados, en particular de plomo, en lagos y lagunas del Perú. Un hecho que encuentra explicación muchas veces por la alta presencia de pasivos ambientales mineros. En el siguiente cuadro listamos los casos encontrados que fueron resultados de extensa investigación y que muestran niveles de contaminación por plomo.

Tabla 1. Lagos y lagunas del Perú contaminados con plomo. Muchos son afectados por la presencia de pasivos ambientales mineros. Elaboración propia.

Nombre de Laguna	Ubicación	Referencia
Choquene	Putina, Puno	(Hanco, 2013)
Ticticocha	Huarochari, Lima	(ANA, 2014b) (Jara-Peña et al., 2017)
Canchis	Huarochari, Lima	(ANA, 2014b), (Tapía Ugaz et al., 2018)
Yanamate	Cerro de Pasco, Pasco	(Jara-Peña et al., 2017), («Publicaciones-Labor Pasco», 2018)
Quiulacocha	Cerro de Pasco, Pasco	(Jara-Peña et al., 2017), («Publicaciones-Labor Pasco», 2018)
Pun Run	Cerro de Pasco, Pasco	(Poma, 2016)
Huascacocha	Yauli, Junin	(Tapía Ugaz et al., 2018)
Lacsacocha	Yauli, Junin	(Tapía Ugaz et al., 2018)
El Paraíso	Huaura, Lima	(Sánchez et al., 2013)
Ventanilla	Lima, Lima	(Vidal et al., 2017)

A excepción de los dos últimos casos de la tabla que corresponde a los humedales de Ventanilla y El Paraíso en Lima, los cuerpos de agua con niveles de plomo por encima del estándar de calidad ambiental para la conservación del ecosistema («Estándares de Calidad

Ambiental (ECA) para Agua», 2018) se encuentran en zonas alto andinas del Perú en las que se tiene una alta disponibilidad solar

Se registra únicamente una propuesta con respecto a las laguna contaminada de Quiulacocha (Ledesma Velita, 2019) el cual sugiere neutralizar las aguas ácidas, secarlas y encapsularlas con geomembranas para finalmente proceder una cobertura vegetal. No considera la posibilidad de recuperar las ocho especies de metales pesados y obtener beneficio económico. Con los datos disponibles se estima una masa total extraíble de casi una tonelada únicamente para el plomo (Ledesma Velita, 2019; *Publicaciones-Labor Pasco*, 2018). Otras propuestas están enfocadas a la remediación del suelo en ecosistemas lacustres afectados por pasivos mineros utilizando fitorremediación con especies nativas (Chávez Rodríguez, 2014; Dextre Rubina, 2017; Jara-Peña et al., 2017). Por lo general, las propuestas de base tecnológica, no llegan a implementarse al no superar la barrera de la accesibilidad y eficiencia. Se encuentran escasos trabajos con respecto a una remediación directa (Berrospi Alania, 2019; *Burbujas nanotecnológicas para recuperar lagos contaminados*, 2015).

1.3. Planteamiento del Problema

El caso de estudio corresponde al Lago Chinchaycocha, Junín. Un cuerpo de agua que presenta niveles de plomo peligrosos para el ecosistema. Se tuvo que diseñar un sistema descontaminador que utilice la tecnología de la nano remediación para la remoción de plomo del lago. En específico, se utiliza un nano compuesto de óxido de grafeno, de excelentes resultados en laboratorio, para el tratamiento de las aguas del lago mencionado y se logre niveles aceptables acorde a los límites permisibles del plomo para el consumo humano. No es un trabajo enfocado a la recuperación ambiental del ecosistema lacustre. Los parámetros invariables que condicionaron el diseño del equipo fueron; las propiedades de adsorción del nano compuesto, la concentración de plomo en el agua, la disponibilidad solar y condiciones de flotaje en la zona de operación mientras que los parámetros variables fueron el volumen de agua tratada por día y el peso de la carga. Por lo tanto, el número de diseños posibles se redujo considerablemente.

1.4. Hipótesis

El diseño propuesto, presenta una alta eficacia en la remoción de plomo de la matriz lacustre. Esto se logra ya que la propuesta consta de un sistema de red de filtraje basada en la tecnología del nano compuesto de óxido de grafeno. Su operación es sostenida debido a que los componentes electrónicos y el sistema de alimentación están correctamente dimensionados y operan bajo tecnología confiable. Además, la propuesta se caracteriza por su accesibilidad pues los principales componentes utilizados son comerciales, es decir, se encuentran a disposición inmediata del usuario a bajos precios. Además, el método de su implementación es sencilla, lo que facilita la transferencia tecnológica del proceso para que el usuario pueda aplicarla sin mayor dificultad. Finalmente, el diseño da lugar a un prototipo reutilizable, ya que casi todos los materiales empleados son durables y se degradan en tiempos apreciables.

1.5. Objetivos

General:

Diseñar y prototipar un sistema que permita la implementación de nano compuestos de óxido de grafeno para el tratamiento de aguas en el Lago Chinchaycocha.

Específicos:

- Determinar la curva de ruptura del adsorbente en un ensayo de columna bajo condiciones campo.
- Determinar el volumen de material requerido y diseñar un sistema de red de filtros con el mismo poder de remoción.
- Diseñar la bomba hidráulica y seguidamente el suministro eléctrico basada en un cosechador de paneles fotovoltaicos.
- Diseñar la geometría del sistema descontaminador que constará de cuatro sub-sistemas; flotación, red de descontaminación y el suministro energético.

- Construir el sistema descontaminador con materiales accesibles y siguiendo un método de fácil implementación adaptado a las condiciones del área.
- Analizar costos y determinar las condiciones para comercialización del producto.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEORICO

2.1. Plomo (Pb II) en Ecosistema Acuático

El destino del plomo en las aguas superficiales es determinado por las propiedades físicas y químicas del agua como la concentración de iones hidrógeno (pH), salinidad, el estado de oxidación, flujo de agua, sedimentos en suspensión, materia orgánica e inorgánica. En efecto, la química del agua es crucial puesto que no solo afecta especiación de plomo en solución (iónica, en complejos orgánicos, en partículas coloidales y en partículas sólidas de mayor tamaño), sino también su disponibilidad y toxicidad hacia organismos acuáticos. (ILA - International Lead Association Website, 2019. Chapter 6)

El pH del agua es el más influyente sobre la tendencia de plomo en solución (figura 4,5). Por ejemplo en agua dulce (ríos, lagos y lagunas), el plomo existe como catión divalente (Pb^{2+}) bajo condiciones ácidas mientras que, bajo condiciones alcalinas ésta se encuentra formando carbonatos ($PbCO_3$) e hidróxidos ($Pb(OH)_2$).

Especies de plomo en agua dulce(%)-pH=6

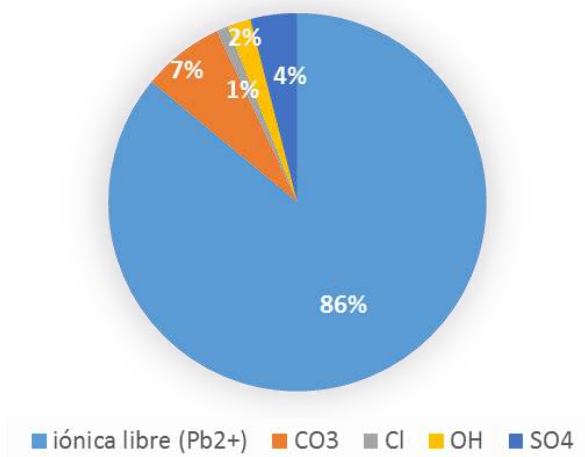


Figura 3. Especiación inorgánica de plomo en agua dulce (ríos, lagos y lagunas) a un pH=6 (ILA -International Lead Association Website, 2019. Chapter 6)

Especies de plomo en agua dulce(%)-pH=9

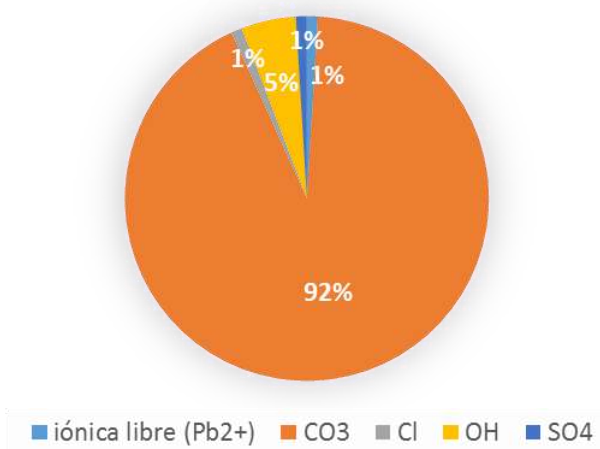


Figura 4. Especiación inorgánica de plomo en agua dulce (ríos, lagos y lagunas) a un pH=9 (ILA -International Lead Association Website, 2019. Chapter 6)

Los procesos naturales tienden a remover el plomo y depositarlo en sedimentos limitando de esta forma su biodisponibilidad y su movilidad (Thornton & Rautiu, 2001). Estos sedimentos forman depósitos de plomo en los ecosistemas lacustres con un gran tiempo de residencia y limitada movilidad. Sin embargo, la contaminación por plomo en estos ecosistemas acuáticos cobraría mayor impacto por las cantidades significativas vertidas a este por medios antropogénicos.

La especie de plomo con la mayor biodisponibilidad es la forma iónica libre Pb^{2+} , es decir, es la que tiene mayor tendencia a ser asimilada por un organismo vivo y causar en ella efectos tóxicos. Entre los procesos que pueden reducir la biodisponibilidad y toxicidad del plomo, se tiene el fenómeno de complejación orgánica e inorgánica y la presencia de otros cationes que podrían interrumpir su fijación al organismo vivo. En la práctica la parte biodisponible (toxicidad del agua) del agua es conocida con el nombre de "fracción disuelta" la cual se obtiene al hacerla pasar a través de un filtro de membrana de $0.45\mu m$ de diámetro (ILA - International Lead Association Website, 2019). En resumen, la biodisponibilidad y toxicidad del plomo depende exclusivamente de la química del agua. En el caso de agua dulce, además del pH, la presencia de material orgánico (NOM) en forma de carbono orgánico disuelto (DOC) reduce considerablemente la toxicidad del plomo. Fuente de la figura 6: (Grosell et al., 2006)

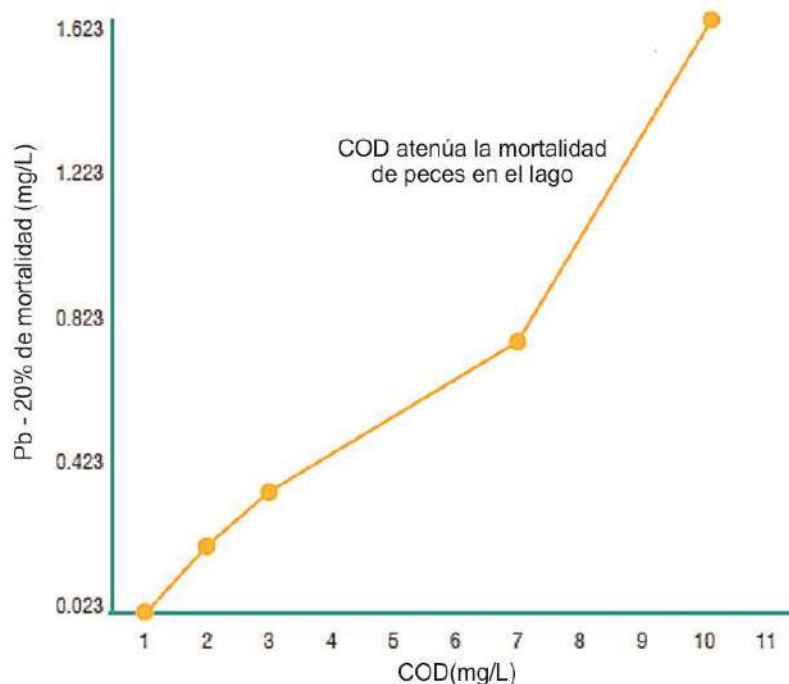


Figura 5. Efectos tóxicos de plomo en la mortalidad de peces disminuye a mayores niveles de carbono orgánico disuelto (DOC). (Grosell, Gerdes, & Brix, 2006).

La bioacumulación se da cuando un organismo absorbe una sustancia a una tasa mayor que aquella a la cual dicha sustancia se desecha del sistema por actividades metabólicas o

excreción. Naturalmente los sistemas vivos acumulan metales pesados, en este caso, especies de plomo a tal grado que podrían ser nocivos para la salud. Este fenómeno de bioacumulación se da sobre todo en mariscos, moluscos y otros insectos acuáticos. (Thornton & Rautiu, 2001) Con respecto a peces, se ha encontrado acumulación de metales en los tejidos óseos en una mayor concentración. En tejidos muscular las cantidades son muy pocas de forma que no representan cantidades de riesgo a la salud de la población que la consume.

2.2. Columnas de Adsorción para Remoción de Pb (II)

2.2.1. Fundamentos del Proceso

La adsorción en una columna es un proceso dependiente del tiempo y la distancia. En el proceso, cada partícula acumula en su superficie el adsorbato de la solución acuosa que circula a través de ella hasta que se alcance el estado de equilibrio, un estado en el que no se da el intercambio de masa entre las fases sólida y líquida. Debido a que la cinética de la adsorción es lenta el nivel de saturación del adsorbente se alcanza de forma gradual, motivo por el cual se establecen tres zonas, siendo la zona de transferencia másica la de mayor interés.

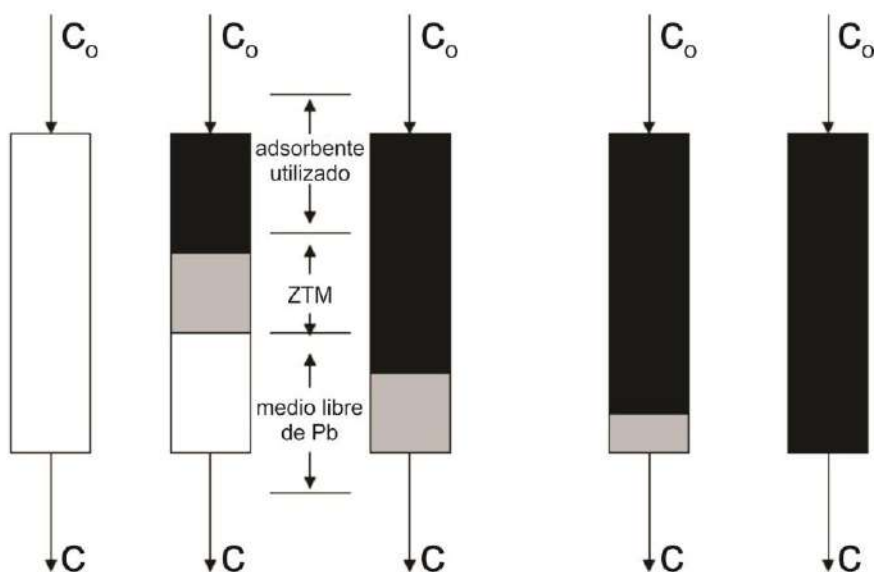


Figura 6. El proceso de remoción de contaminante en una columna de adsorción de lecho fijo (CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC, 2001)

La primera zona se encuentra entre la entrada de la columna y la zona de transferencia de masa (MTZ), el adsorbente se encuentra cargada con el adsorbato en la cantidad q_0 , cantidad que se encuentra en equilibrio con la concentración inicial c_0 . Esto quiere decir que, la capacidad disponible del material adsorbente está saturada y no tendrá lugar el proceso de transferencia de masa de manera que la concentración en la fase líquida se mantiene constante e igual a c_0 .

La zona de transferencia másica (MTZ) es aquella zona en el que se da el intercambio de masa de la fase líquida a la fase sólida y debido a este proceso, la concentración de adsorbato en la fase líquida disminuye de $c=c_0$ a $c=0$ y la cantidad adsorbida aumenta de $q=0$ a $q=q_0(c_0)$ la forma y dimensiones dependerán de la naturaleza de la adsorción, lo cual estará determinada por las interacciones entre el adsorbente y la solución que transporta el adsorbato y se traduce en la tasa de adsorción e isoterma de equilibrio. La tercera zona en la columna se encuentra libre del adsorbato con material adsorbente sin carga. La concentración de adsorbato en la fase líquida es de $c=0$. (*Engineering and Design*, 2001)

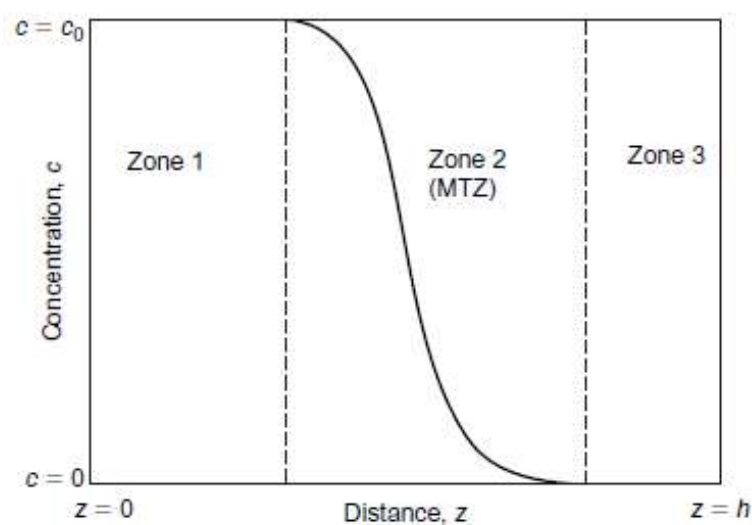


Figura 7. Perfil de la concentración en la adsorción de único soluto en un filtro de columna de altura h (Worch, 2012)

2.2.2. Parámetros de Operación

Son los principales parámetros de operación listados en la tabla 3. Están las condiciones externas de flujo, las condiciones internas que incluyen las dimensiones de la columna y las características del adsorbente. De estos parámetros se determinan otras propiedades de operación como la carga hidráulica, el tiempo de contacto de la columna vacía, la densidad de columna y su porosidad.

Tabla 2. Parámetros del proceso en una columna de adsorción

Parámetro de Operación	Símbolo	Unidad
Concentración inicial	C_o	mg/L
Flujo volumétrico	Q	L/min
Altura de la columna	h	cm
Masa de adsorbente	m_a	g
Velocidad de filtración	Q_h	cm/min
Tiempo de contacto de la columna vacía	ebct	min

Densidad de columna	ρ_B	g/cm^3
Porosidad	ε	---

$$Q_h = \frac{Q}{A_B} (m/h) \quad (1)$$

$$ebct = \frac{V_B}{Q} (min) \quad (2)$$

$$\rho_B = \frac{m_a}{V_B} (g/cm^3) \quad (3)$$

Durante el proceso de adsorción, la zona de transferencia de masa (MTZ) se ira desplazando a través de la columna. Decimos que alcanza el punto de ruptura t_b cuando la zona (MTZ) haya llegado al efluente de la columna. A partir de este tiempo, la concentración de adsorbato a la salida del filtro aumenta debido a que la disponibilidad de carga del adsorbente disminuye con el progreso de la adsorción.

Cuando la zona de transferencia másica haya pasado completamente el efluente, la concentración de salida será c_0 y todo el adsorbente se encuentra saturado con la carga de equilibrio q_0 , condición conocida como el punto de saturación t_s (figura 9). La misma gráfica presenta la curva de ruptura (BTC), la cual muestra la concentración de adsorbato en el efluente en función del tiempo. Esta curva es un espejo del perfil de concentración en la zona MTZ lo cual implica que ambas son afectadas por los mismos factores. Si la adsorción es óptima, la velocidad de la zona MTZ será pequeña, por lo que el punto de ruptura tardará en

ser alcanzada. Las líneas punteadas representan la curva de ruptura ideal el cual se obtiene al suponer un proceso sin dispersión y con una tasa infinitamente rápida de transferencia másica. Se obtiene un perfil de paso con un punto de ruptura ideal.

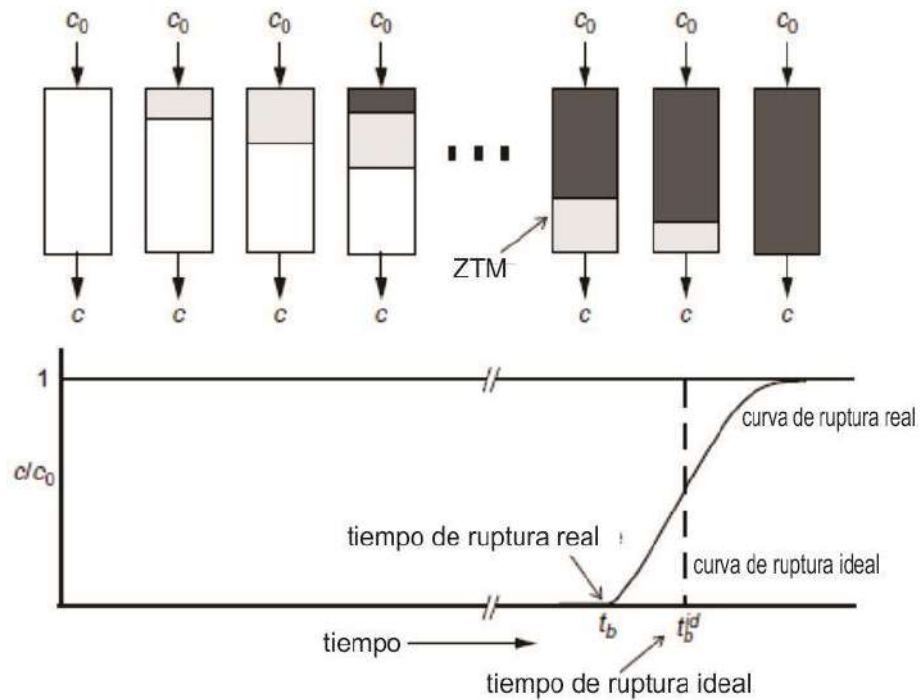


Figura 8. Zona de transferencia de masa a través de la columna de adsorción (ZTM) a través de la cama de adsorción y desarrollo de la curva de ruptura, (Worch, 2012)

Como ya se explicó se obtiene la curva de ruptura de la columna durante la remoción del adsorbato siendo las principales variables que describen la tendencia: la carga total q_t (mg/g) el cual tiene en el numerador a la cantidad total de soluto que ingresó a la columna hasta el agotamiento. La carga de equilibrio q_e (mg/g) tiene como dividendo al adsorbato retenida en la fase sólida en la columna y la carga ruptura q_b (mg/g) que tiene como numerador a la cantidad de adsorbato presente en la fase sólida hasta el punto ruptura, instante en el cual se deja de usar el filtro.

Además se tiene: la eficiencia de columna η definida para el caso práctico, esto es, para el instante en el que se dejaría de usar el filtro superando la concentración final permitida, la

longitud de la zona de transferencia de masa el cual dependerá de la velocidad de filtración Q_h . El número de volumen de columna NBV, que es adimensional y se utilizará para el escalamiento de un filtro y la tasa de agotamiento del adsorbente AER. Estas dos últimas variables son a su vez, índices de desempeño del proceso.

$$q_t = \frac{c_o Q t_s}{m_a} \quad (4)$$

$$q_o = \frac{c_o Q \int_0^{t_s} (1 - \frac{c}{c_o}) dt}{m_a} \quad (5)$$

$$q_b = \frac{c_o Q t_b}{m_a} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{q_b}{q_o} \times 100\% \quad (7)$$

$$MTZ = H(1 - \frac{t_b}{t_s}) \quad (8)$$

$$NBV = \frac{\text{volumen tratado (en ruptura)}}{m_a} \quad (9)$$

$$AER = \frac{m_a}{\text{volumen tratado (en saturación)}} \quad (10)$$

2.2.3. Modelos Experimentales

Se desarrollaron modelos para el proceso de adsorción en la columna puesto que describen la curva de ruptura. Una vez determinada, parámetros como el tiempo de ruptura t_b y el tiempo de saturación t_s son obtenidos, dando una idea de la transferencia de masa del proceso. Se listan las propuestas que serán utilizadas.

El modelo Adams-Bohart asume que el equilibrio no es inmediato. La adsorción es directamente proporcional a su concentración en la fase líquida y la capacidad residual adsorptiva del material adsorbente. No considera la dispersión axial en la transferencia másica. (Chatterjee et al., 2018)

$$\frac{c}{c_o} = \exp\left(\frac{k_{AB}C_oV}{Q} - \frac{k_{AB}N_o h}{Q_h}\right) \quad (11)$$

Donde k_{AB} (L/mg-min) es la constante cinética de Adams-Bohart, N_o (mg/L) es la concentración de saturación, V (L) el volumen del efluente al cabo de cierto tiempo de operación.

El modelo de Thomas fue desarrollado a partir de la expresión del balance de masa diferencial para sistemas con una isoterma de tipo Langmuir, sin dispersión axial y con una cinética que sigue el modelo de pseudo segundo orden. Se considera flujo de tipo laminar en el que no existe intercambio de partículas en el perfil del fluido. (Bonilla-Petriciolet et al., 2017)

$$\frac{c}{c_o} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{TH}q_o m_a}{Q} - \frac{k_{TH}c_o V}{Q}\right)} \quad (12)$$

Donde k_{TH} (L/mg-min) es la constante cinética de Thomas, q_o (mg/g) es la concentración máxima de soluto en la fase sólida, V (L) el volumen del efluente al cabo de cierto tiempo de operación.

El modelo Dosis-Respuesta se aplica ampliamente en los procesos de bioadsorción en columnas y puede ser representado por la siguiente ecuación (Lara et al., 2016).

$$\frac{c}{c_o} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{c_o V}{q_o m_a}\right)^a} \quad (13)$$

Donde a es la constante del modelo, q_o (mg/g) la concentración máxima de soluto en la fase sólida y V (L) el volumen del efluente al cabo de cierto tiempo de operación.

El modelo de Yoon-Nelson fue inicialmente propuesto para describir la curva de ruptura en los procesos de adsorción de gases. Está basado en la teoría de la probabilidad del adsorbato y asume que la tasa del decaimiento de la adsorción molecular es proporcional a la tasa de adsorción misma y la curva de ruptura del proceso (Bonilla-Petriciolet et al., 2017).

$$\frac{c}{c_o} = 1 + \exp\left(\tau k_{YN} - \frac{k_{YN} V}{Q}\right) \quad (14)$$

Donde k_{YN} (min^{-1}) es la constante cinética de Yoon-Nelson, τ (min) es el tiempo estimado para que lograr un avance del 50% del frente de adsorción y V (L) es el volumen del efluente al cabo de cierto tiempo de operación.

2.2.4. Métodos de Escalamiento

Se plantea el método “altura de columna no utilizada”, el cual permite estimar las dimensiones requeridas del filtro conocido el nuevo tiempo de ruptura t_b^* , para el cual se desea trabajar. Este método exige una misma velocidad de filtración Q_h (cm/min) tanto para la columna a pequeña y gran escala puesto que, asume el perfil de la zona de transferencia másica (MTZ) conserva sus características bajo tal condición. Esto implica que dichas características serán independientes de la dimensión longitudinal del filtro (Bonilla-Petriciolet et al., 2017; Worch, 2012). La altura de columna no utilizada (LUB) se obtiene de una relación entre la carga de equilibrio q_e y la carga útil q_b . Este valor será el mismo para el filtro diseñado.

$$LUB = \left(1 - \frac{q_b}{q_e}\right) h_B \quad (15)$$

Siendo h_B la longitud de columna útil. Este valor mencionado, de acuerdo al método, se considera directamente proporcional al tiempo de ruptura t_b en operación. De manera que, si se necesita que la columna a diseñar opere hasta el tiempo de ruptura t_b^* entonces la nueva longitud de columna útil h_B^* y total h_t^* se calculen a partir de las siguientes ecuaciones.

$$h_B^* = \left(\frac{t_b^*}{t_b}\right) h_B \quad (16)$$

$$h_t^* = LUB + h_B^* \quad (17)$$

El modelo de Tiempo de Servicio de la Columna (BDST) se implementa siempre que se disponga del conjunto de datos de tiempo de ruptura, longitud de columna y niveles de saturación. Este modelo asume que la tasa de adsorción es proporcional a la capacidad de adsorbente y concentración de adsorbato residual. Además, permite calcular el tiempo de servicio t_s para una respectiva longitud de columna L y nivel de saturación c_o/c_b . Al igual que el método anterior, la única condición para diseñar un filtro de mayores dimensiones es mantener la misma carga hidráulica de operación Q_h (cm/min), de manera que se pueda mantener las características de la zona de transferencia másica (ZTM) como lo son el perfil de concentración, la velocidad y su longitud (Chatterjee et al., 2018; Worch, 2012)

$$L_o = \frac{\varepsilon Q_h}{kN_o} \ln\left(\frac{c_o}{c_b} - 1\right) \quad (18)$$

$$t_s = \frac{N_o}{\varepsilon Q_h c_o} (L - L_o) = aL + b \quad (19)$$

Donde k (L/mg.min) es la constante de velocidad de adsorción descrita por la transferencia de masa de la fase líquida a la fase sólida, N_o (mg/L) la capacidad de adsorción, Q_h (cm/min) es la carga hidráulica de operación, L (cm) la altura de columna, L_o (cm) la altura de columna crítica para que en el instante inicial la concentración en el efluente no sobrepase la concentración de ruptura c_b (mg/L), c_o (mg/L) la concentración inicial y ε la porosidad (Lara et al., 2016). Las constantes k y N_o pueden calcularse con un ajuste lineal, a partir de la pendiente de la recta mostrada y su intercepción con el eje y .

Luego se tiene el método de escala proporcional. Podría considerarse el caso general del método de altura de columna no utilizada (LUB). En esta propuesta no se considera necesariamente una misma velocidad de filtración Q_h en el proceso de escalamiento. Por lo general, es preferible mantener dicho valor de modo que la caída de presión hidráulica se mantenga constante. Para ello, si el diseño escalado trabaja a mayor caudal, el área de la sección transversal incrementa en la misma proporción aunque finalmente dependerá de los materiales disponibles en el prototipado. La primera expresión establece un incremento proporcional del tiempo de ruptura t_b con respecto al tiempo de contacto de columna vacía $ebct$. La segunda expresión establece incremento proporcional del volumen tratado hasta el punto de ruptura V (L) con respecto a la masa del adsorbente m_a (Chatterjee et al., 2018; *Engineering and Design*, 2001).

$$t_b^* = \left(\frac{ebct^*}{ebct} \right) t_b \quad (20)$$

$$V^* = \left(\frac{m_a^*}{m_a} \right) V \quad (21)$$

$$V^* = \left(\frac{m_a^*}{m_a}\right) \left(\frac{c_o}{c_o^*}\right) V \quad (22)$$

Finalmente, el método cinético para escalamiento, que parte del modelo cinético (Thomas, Dosis-Respuesta o Yoon-Nelson) el cual describe la tendencia de la curva bajo ciertas condiciones establecidas. Una vez calculado las constantes del modelo con los parámetros de operación inicial, se procede a estimar bajo las nuevas condiciones de operación (Q , c_o , c) la masa de adsorbente necesaria m_a para tratar cierta cantidad de volumen V hasta el nuevo nivel de saturación c/c_o . A diferencia de las otras propuestas de escalamiento, este método permite realizar estimaciones bajo diferentes niveles de saturación y concentración inicial (Chatterjee et al., 2018; Lara et al., 2016).

$$\ln\left(\frac{c_o}{c} - 1\right) = \frac{k_1 q_o m_a}{Q} - \frac{k_1 c_o V}{Q} \quad (23)$$

2.3. Red de Conducción Hidráulica

Para determinar las características de la bomba hidráulica se analizará en particular el tramo que corresponde a la columna de adsorción, un medio que presenta cierta porosidad y por lo tanto establece una caída de presión en el tramo de impulsión. La velocidad superficial tiene relevancia al calcular la caída de presión a lo largo de la línea impulsión puesto que dichas cantidades siguen una relación directa de variación. Por ello, una vez conocido el caudal de flujo, se debe de elegir el área de sección transversal de la columna de adsorción de tal forma que se evite un esfuerzo mecánico considerable sobre el equipo. Una vez calculado la velocidad superficial, el cual se encuentra bajo los valores recomendados, se procede a determinar las pérdidas de carga.

2.3.1. Cálculo de las pérdidas de carga

Un medio poroso consiste de cavidades huecas en una fase particulada contenida en un sistema conocida como volumen de control. Esta fase particulada representa la fracción sólida mientras que la cavidad hueca es conocida como la porosidad. En la figura, un fluido con valor de flujo Q circula a través de la columna de sección transversal A estableciendo así, la velocidad superficial Q_H . En este caso el lecho tiene una porosidad ε de manera que se considera el concepto de velocidad intersticial, la cual es superior a la velocidad superficial debido a que el fluido circula a través de una sección transversal más pequeña.

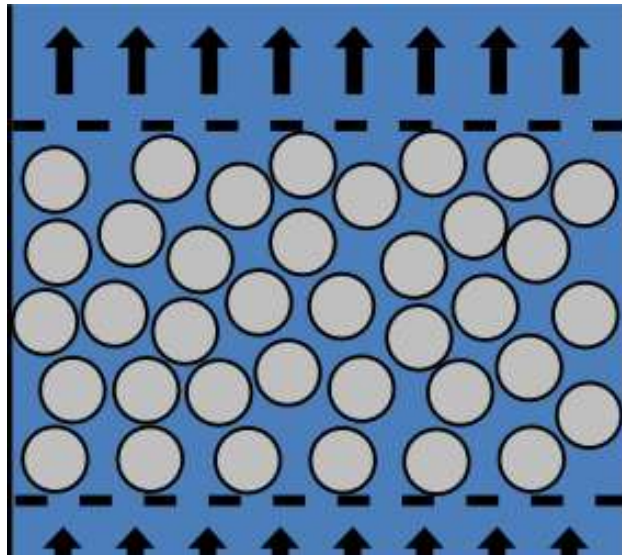


Figura 9. Flujo de fluido a través de un medio poroso

La resistencia del flujo de fluido a través de una columna de adsorción está relacionada directamente a su porosidad. Esta resistencia da lugar a una caída de presión en el fluido ΔP en la dirección de la velocidad de flujo. Note que esta caída se da debido a los efectos de la fricción (Holdich, 2002).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_P}$$

(24)

Para calcular la caída de presión en flujos a través de un material poroso, se utiliza la ecuación de Ergun, una expresión válida para un amplio rango de tamaño y forma de partículas, bajo condiciones de flujo laminar y turbulento. En flujo laminar, el primer término domina la ecuación de Ergun, de manera que, la caída de presión es independiente de la densidad del fluido y tiene una dependencia lineal con la velocidad superficial. Bajo estas condiciones la expresión comparte la forma dada por la ley de Darcy (Sobieski & Zhang, 2014), la cual es solamente válida para flujos laminares. La expresión de Ergun lleva ventaja pues trabaja la permeabilidad del lecho granular, de forma que no implica de experimentación previa para poder calcularlo.

$$-\frac{\Delta P}{L} = \left[150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \right] \mu Q + \left[1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \right] \rho_f Q^2 \quad (25)$$

Con respecto a las propiedades del fluido que circula a través de la columna; μ (kg/m.s) representa la viscosidad dinámica y ρ_f (kg/m³) su densidad. Con respecto a las propiedades del medio poroso; d_p (m) representa el diámetro de la partícula equivalente esférica y ε su porosidad. Finalmente, respecto a las condiciones de operación Q (m/s) representa la velocidad superficial. Para partículas esféricas, d_p es el diámetro de la partícula en el lecho granular mientras que para partículas no esféricas se trabaja con el diámetro esférico equivalente, esto al incluir la esfericidad de la partícula. El caso general corresponde a una distribución de tamaño de partículas no esféricas. Estudios previos sugieren diferentes expresiones para determinarla, por ejemplo se puede establecer correlaciones a partir del diámetro medio del tamizador para determinar el valor promedio de la esfericidad de la partícula y, por lo tanto, el diámetro esférico equivalente (Kaludjerovic-Radoicic et al., 2016). También se puede considerar el diámetro medio de la partícula y el diámetro medio de Sauter para los cálculos (Holdich, 2002).

$$Re = \left[\frac{d_p}{1 - \varepsilon} \right] \frac{\rho_f}{\mu} Q \quad (26)$$

$$-\frac{\Delta P}{L} = f(Re) \left[\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3 d_p} \right] \rho Q^2 \quad (27)$$

En general existen diferentes expresiones para determinar la caída de presión a lo largo de un material poroso (Kaludjerovic-Radoicic et al., 2016). El procedimiento general es: calcular el número de Reynolds para caracterizar el régimen de flujo, donde la condición $Re > 2$ caracteriza al estado como turbulento. Luego, basado en las condiciones del régimen, se selecciona la correlación más adecuada para el factor de fricción $f(Re)$. Una vez calculada, se utiliza la última ecuación para estimar la caída de presión $\Delta P/L$ a lo largo de la columna de adsorción (Holdich, 2002).

$$H = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (28)$$

La pérdida de carga H (m) se estima con la expresión líneas arriba, en esta, ΔP (Pa) es la caída de presión establecida por la columna de adsorción y γ ($\text{kg/s}^2\text{m}^2$) el peso específico del fluido. Para el cálculo de bombas, es indispensable determinar las cargas hidráulicas tanto en la zona de aspiración como en la zona de impulsión y comprende: altura estática, presión existente sobre el líquido en el punto de admisión o expulsión y pérdidas de carga por rozamiento.

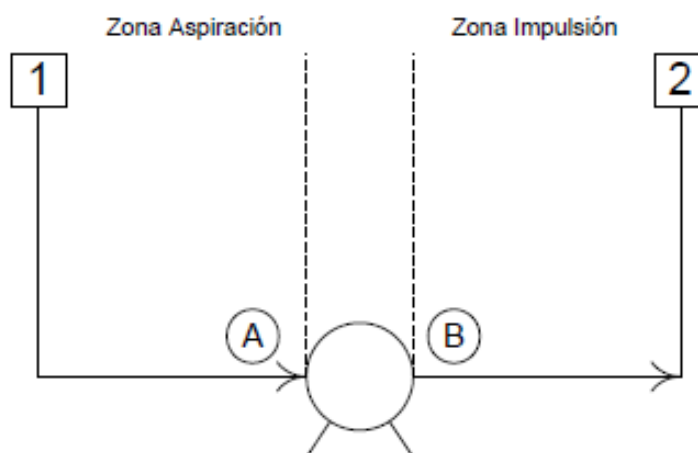


Figura 10. Bomba hidráulica y la altura manométrica para puesta en marcha.

Para un flujo incompresible, la carga hidráulica necesaria para puesta en marcha se determina de la siguiente ecuación:

$$(Z_2 - Z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g} \right) + \left(\frac{v_2^2}{2\alpha_2 g} - \frac{v_1^2}{2\alpha_1 g} \right) + (H_f)_{total} = \Delta H_t \quad (29)$$

Donde Z_i (m) es el punto de elevación, P_i (Pa) la presión y v_i (m/s) la velocidad media, todas en el punto de admisión o expulsión. Luego α_i es un término que depende del tipo de flujo que se produzca, H_f (m) la pérdida de carga por rozamiento en la conducción, ΔH_t (m) la carga de la bomba, ρ (kg/m^3) la densidad del fluido y g (m/s^2) la aceleración de la gravedad. De la misma forma, por el principio de conservación, se demuestra que la energía que ha de suministrarse al fluido corresponde a la diferencia entre las alturas totales de impulsión y aspiración. Para nuestro caso en cuestión podemos considerar la suma de las pérdidas de carga en la columna y en la pieza de aspiración como la carga de la bomba, es decir, la altura manométrica total. La última expresión presenta la potencia absorbida (W) por la bomba necesaria para generar caudal a lo largo de la línea de conducción donde η es el rendimiento de operación del dispositivo.

$$H_{\text{aspiración}} + H_{\text{columna}} = \Delta H_t(Q) \quad (30)$$

$$W = \frac{\gamma Q}{\eta(Q)} \Delta H_t(Q) \quad (31)$$

2.3.2. Curva Característica de una bomba hidráulica

El funcionamiento de una bomba centrífuga es representada por una serie de curvas todas en función del caudal de operación $H=H(Q)$, $P=(Q)$ y $\eta=\eta(Q)$. Estas variables dependientes corresponden a la altura, potencia y rendimiento de la bomba. Es posible verificar que una bomba puede abastecer cierto caudal cuyos valores van desde cero hasta un valor máximo y dependerán del tipo, del tamaño de la bomba y de las condiciones de succión. Como se observa de la figura, el rendimiento aumenta con el caudal hasta un punto máximo para luego decrecer. Cada curva corresponde a una determinada velocidad de rotación de la bomba y a un diámetro del impulsor. Es importante conocer las condiciones de operación que serán la altura manométrica total y el caudal de fluido. Con estas variables se puede determinar las dimensiones de la bomba y tipo de operación, necesarias para estimar la potencia adsorbida y rendimiento.

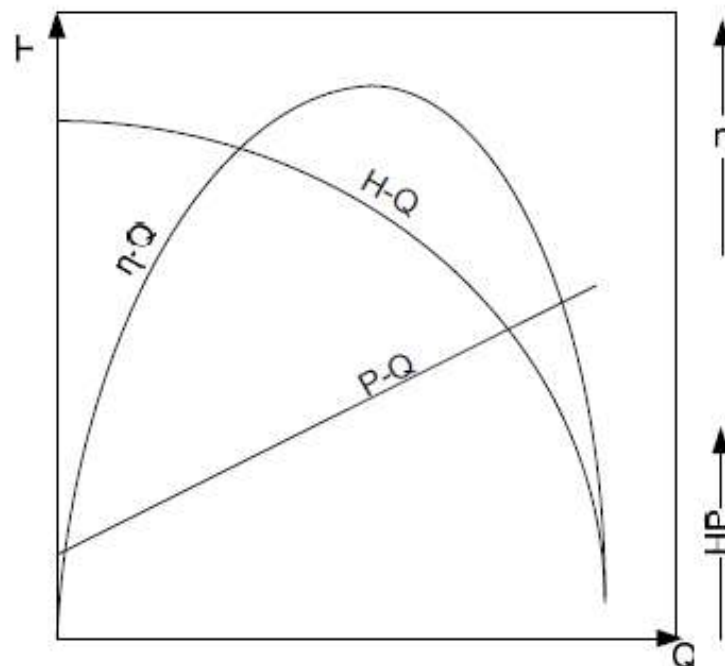


Figura 11. Características de una bomba centrífuga

2.4. Sistema Autónomo Fotovoltaico

El suministro de energía que alimentará al sistema se compone de tres subcomponentes principalmente: el subsistema generador de energía que en nuestro caso corresponde a un módulo de energía solar fotovoltaico, un subsistema gestor de la energía eléctrica el cual es desempeñada por un controlador de carga solar MPPT y el subsistema de acumulación el cual comprende un dispositivo de almacenamiento energético.

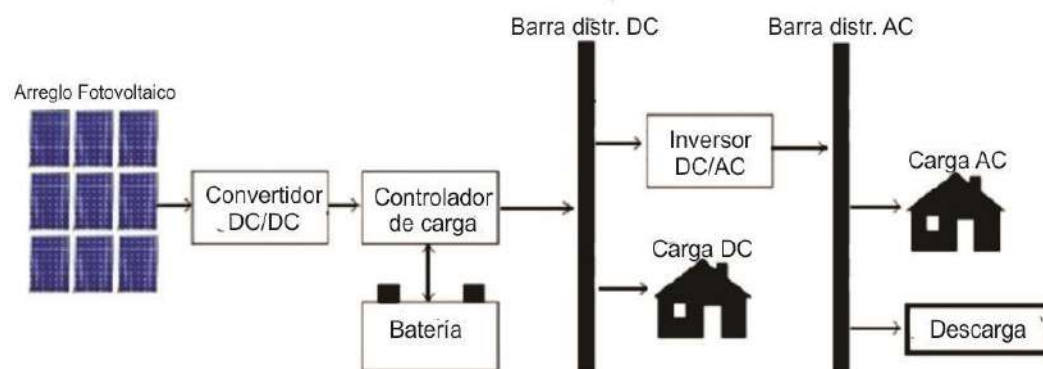


Figura 12. Componentes del sistema fotovoltaico autónomo (Khatib et al.,2016).

2.4.1. Generador Fotovoltaico

Un generador fotovoltaico se compone de celdas solares, dispositivos capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica a través del fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Se presentan en dos tipos de estructura, las de homojuntura y heterojuntura. Aquellos módulos basados en la tecnología de silicio presentan una estructura de homojuntura, esto es, los semiconductores p y n que la componen son del mismo material.

Estos módulos están representados por la curva característica corriente-voltaje, figura 14. Bajo condiciones ambientales establecidas, la curva muestra combinaciones de corriente y voltaje para un módulo solar. El punto real de operación estará determinado por la carga a la que esté conectado. Fuente de la figura 14: (Garcia, 2006)

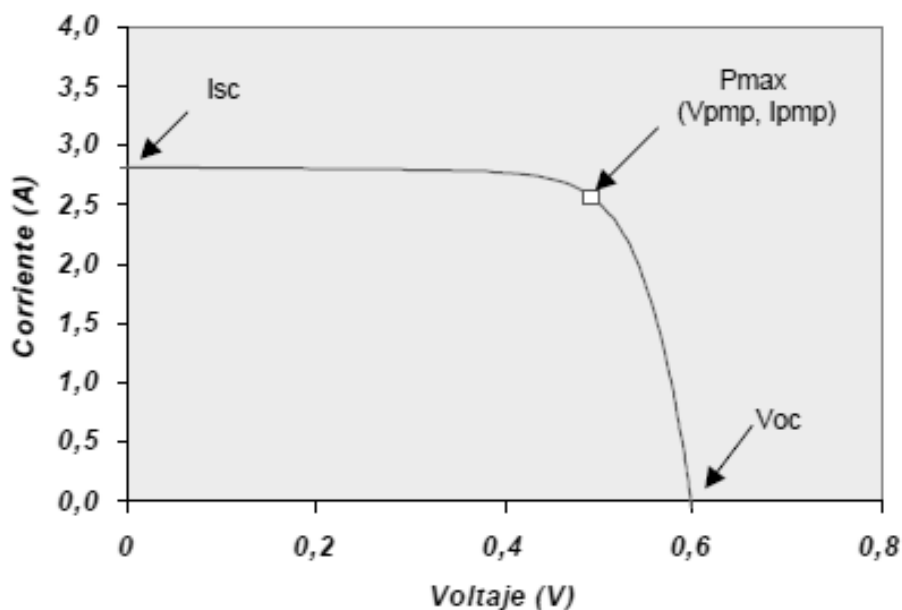


Figura 13. Curva característica I-V de una celda fotovoltaica (Garcia, 2006)

Entre los principales parámetros de la curva característica I-V se tiene la corriente cortocircuito I_{sc} que es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura a un voltaje nulo, además, es directamente proporcional a la intensidad de radiación solar incidente. El voltaje de circuito abierto V_{oc} el máximo voltaje del dispositivo bajo las mismas condiciones de operación a una corriente nula. La potencia

máxima P_{\max} producida por la celda solar correspondiente al par máximo I_{PMP} - V_{PMP} y el factor de llenado FF que es el cociente entre P_{\max} y el producto $I_{sc}V_{oc}$. Un valor de llenado de 100% correspondería a un perfil de curva cuadrada. Este factor nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico.

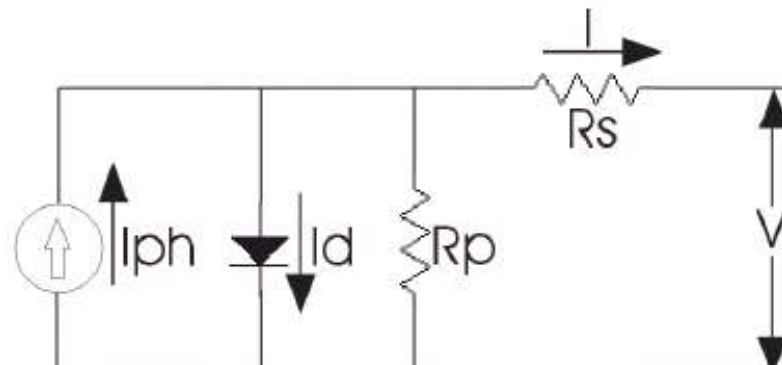


Figura 14. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

La curva característica I-V de una celda fotovoltaica es representada por la ecuación 30. En esta ecuación, I_{ph} (A) es la corriente generada por la celda bajo iluminación, I_o (A) es la corriente de saturación del diodo, m es el factor de idealidad del diodo, k la constante de Boltzmann ($k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T (K) es la temperatura absoluta de la celda, q (C) es la carga del electrón, R_s la resistencia en serie que representa la resistencia óhmica a través de los materiales semiconductores y de los contactos eléctricos y R_p la resistencia en paralelo a través del cual se presentan fugas de corriente. Para una celda fotovoltaica con una alta eficiencia, la resistencia R_p es grande y el factor de idealidad del diodo satisface $m=1$ (celdas de silicio).

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (32)$$

Las características anteriormente presentadas corresponden a una celda fotovoltaica. Para el caso de un módulo fotovoltaico sus propiedades dependerán del número de celdas en serie y paralelo que presente. Bajo el supuesto que todas las celdas del módulo fuesen idénticas, se cumple las siguientes ecuaciones:

$$I_{mod} = I_c \times N_p \quad (33)$$

$$V_{mod} = V_c \times N_s \quad (34)$$

Donde N_p y N_s son respectivamente el número de células en paralelo y en serie que contiene el módulo mostrado en la figura siguiente. El mismo principio se aplica si se quiere componer un arreglo de módulos fotovoltaicos para satisfacer valores de voltaje y corriente más apropiados.

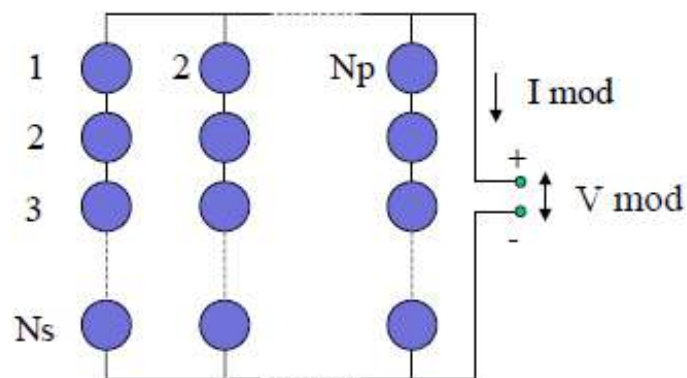


Figura 15. Esquema de conexión eléctrica en un módulo fotovoltaico (García, 2006)

2.4.2. Batería de Plomo Ácido

Para los sistemas en que la energía fotovoltaica es la única fuente de generación eléctrica, es necesario el uso de dispositivos de almacenamiento puesto que la correcta operación está limitada por la disponibilidad solar. El almacenamiento más común es el químico, en forma de batería, el cual es el componente central del sistema ya que afecta el costo y los requisitos de mantenimiento, la confiabilidad y el diseño del sistema fotovoltaico (Spiers, 2012).

La profundidad de descarga (DOD) es un parámetro fundamental en el diseño de un banco de baterías de un sistema fotovoltaico autónomo puesto que determina la capacidad

disponible para alimentar la carga. Así, los dispositivos de almacenamiento se clasifican como baterías de ciclo profundo o poco profundo. El primero comprende baterías con una profundidad de descarga mayor al 50% pudiendo llegar hasta el 80% de la capacidad nominal total. La capacidad disponible a su vez está afectada por la tasa de descarga de la batería y la temperatura de operación. La capacidad disponible, por lo general decrece en un 1% por cada grado debajo de los 20°. Las altas temperaturas no son tampoco favorables ya que aceleran el tiempo de vida útil, la autodescarga y el uso de electrolito (Enos, 2015). Fuente de la figura 17: (Honsberg & Bowden, 2013)

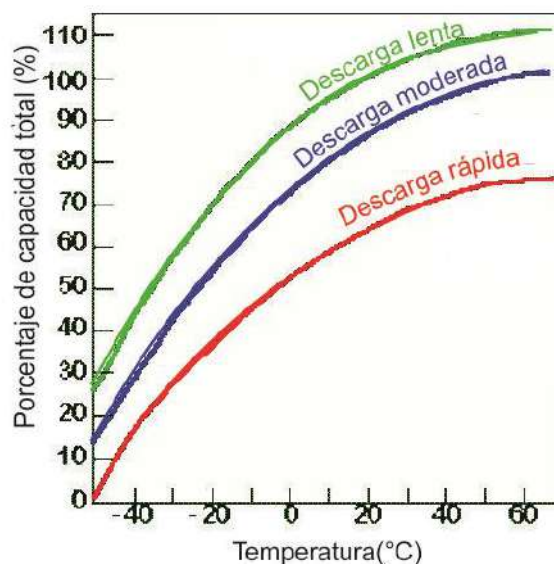


Figura 16. Relación entre la capacidad de la batería, la temperatura y la tasa de descarga (Honsberg & Bowden, 2013)

Esta capacidad disponible se va degradando en el tiempo con el uso y las condiciones de operación que haya experimentado: el tipo de régimen de carga y descarga, la profundidad de descarga, exposición a periodos prolongados de descarga y temperatura. La gráfica siguiente muestra la evolución de la capacidad en función al número de ciclos y la profundidad de descarga para una batería de plomo ácida de ciclo poco profundo. Baterías de plomo de

ciclo profundo son capaces de mantener un aproximado de 1000 ciclos de vida inclusive a profundidades de descarga por encima del 50%.

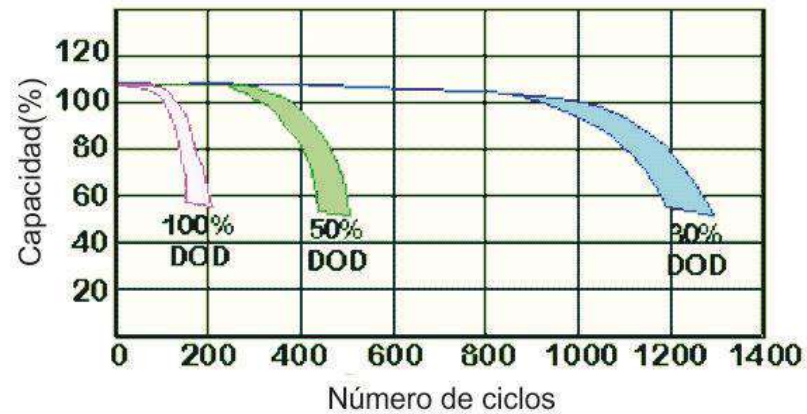


Figura 17. Relación entre la capacidad de la batería, profundidad de descarga y ciclo de vida para una batería de ciclo poco profundo (Honsberg & Bowden, 2013)

El régimen de carga también desempeña un papel muy importante en el tiempo de vida útil de la batería; sobrecarga o carga insuficiente resulta en el desprendimiento del material activo o sulfatación de la batería comprometiendo su durabilidad. Finalmente, se prefiere bajas temperaturas de operación debido a que las altas temperaturas incrementan la tasa de envejecimiento.

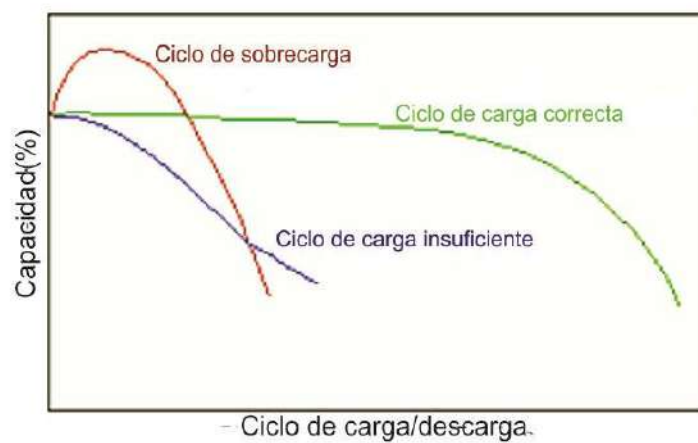


Figura 18. Efecto del régimen de carga sobre la capacidad disponible de la batería (Honsberg & Bowden, 2013)

En lo que respecta al mantenimiento de baterías de plomo ácido, la producción y escape de gases de hidrógeno y oxígeno causan la pérdida de agua por lo que deben de ser regularmente reemplazadas. Si bien es cierto que existen modelos diseñados de tal forma que limitan la cantidad de gas expedido, la naturaleza corrosiva del electrolito implica que se le debe dar mantenimiento periódico. Para baterías de plomo ácido, la eficiencia coulombica tiene un valor de 85% aproximadamente y la eficiencia energética en el orden del 70% (Spiers, 2012).

2.4.3. Controlador de Carga

Es un dispositivo que se compone de un convertidor DC/DC para optimizar la conexión entre el generador fotovoltaico y el banco de baterías, esto es, regula el voltaje DC del módulo fotovoltaico a un voltaje adecuado para la carga de las baterías (Gaga et al., 2017). Este controlador de carga analiza la salida del generador y lo compara al voltaje de la batería. Luego por medio de un procedimiento (método de perturbación y observación) determina la mejor potencia que el módulo puede generar para la carga del dispositivo de almacenamiento. Toma el voltaje generado y lo convierte al mejor voltaje para obtener el máximo número de amperios en la batería. Adicionalmente evita las sobrecargas y descargas profundas de la misma (Enos, 2015). En la figura siguiente se muestra el controlador de carga solar MPPT el cual tiene acoplado adicionalmente un elemento de consumo eléctrico. Este controlador de carga optimiza la operación de los subcomponentes del módulo fotovoltaico.

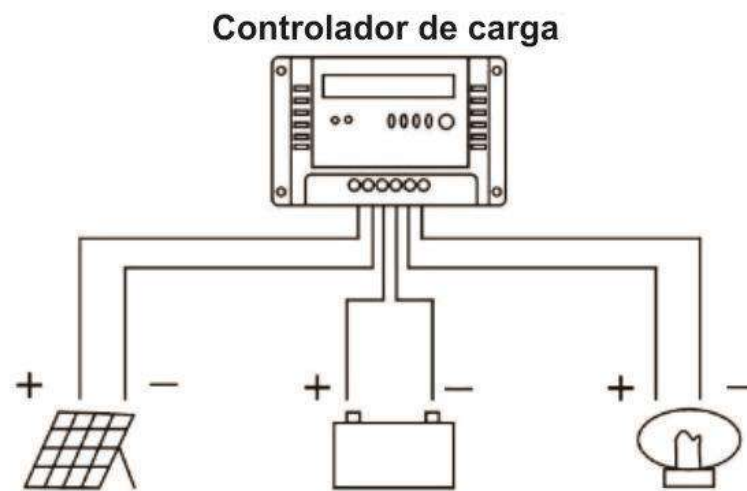


Figura 19. Componentes del suministro de energía solar fotovoltaico

2.4.4. Método de Dimensionamiento

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo, se trabaja con el método intuitivo el cual permite calcular de forma simple la capacidad del acumulador (batería) y el tamaño del generador fotovoltaico (paneles solares) dada las condiciones de requerimiento. Este método exige que la energía producida por el generador exceda la energía demandada por la carga (en valores promedio) en un cierto margen conocido como el factor de seguridad (Khatib et al., 2016). El acumulador se dimensiona de forma que pueda abastecer el consumo energético en los días que no presente disponibilidad solar. Si bien es cierto, el método se caracteriza por su simplicidad, su aplicación podría resultar en un sobredimensionamiento de los componentes del sistema el cual podría generar incrementos de capital inicial, de costos por operación y mantenimiento (Hontoria & Aguilera, 2004).

Con la demanda energética es posible dimensionar el generador fotovoltaico. El número total de módulos fotovoltaicos a instalarse está dado por la expresión líneas abajo.

$$N_T = \frac{E_D}{W_m G_m \beta \eta_C} \quad (35)$$

$$N_S = \frac{V_G}{V_m} \quad (36)$$

$$N_P = \frac{N_T}{N_S} \quad (37)$$

En esta expresión, E_D (Wh) es la demanda energética, W_m (W/kW/m²) es la potencia pico de un único módulo solar, $G_{m\beta}$ (kWh/m²) la radiación global sobre una superficie inclinada un ángulo β y η_G es el factor global de pérdidas para el generador fotovoltaico. En la siguiente expresión se determina el número total de módulos en serie N_S a partir del cociente entre el voltaje total del generador V_G (V) y el voltaje pico de un solo módulo V_m (V). El número de módulos en paralelo N_P se determina a partir del cociente entre el total de unidades en la red N_T y el número de unidades en serie N_S . Para dimensionar la batería se debe de tener en cuenta la máxima profundidad de descarga y los días de autonomía que el sistema es capaz de atender sin la disponibilidad solar cumpliendo la demanda energética (Hontoria & Aguilera, 2004). De la expresión se calcula la capacidad extraíble de energía de la batería:

$$C_N = \frac{E_D N}{P_d \eta_B} \quad (38)$$

Donde C_N (Wh) es la capacidad nominal de la batería, E_D (Wh) es la energía demandada, P_d la máxima profundidad de descarga de la batería y η_B el factor global de pérdidas para el banco de baterías. Para las expresiones de dimensionamiento se puede trabajar con la variable HSP (h) hora solar pico incidente sobre el plano de los paneles, el cual es el tiempo de operación equivalente en que el panel opera a condiciones estándar, esto es, una irradiación de 1000 W/m², temperatura de 25°C y una masa de aire de 1.5 (Abella, 2006).

2.5. Sistema de Flotación

La Ley física que rige el comportamiento de cuerpos flotantes o completamente sumergidos en un fluido es el principio de Arquímedes el cual establece que la fuerza de flotación que experimenta un cuerpo sumergido es igual al peso de fluido desplazado. De la ecuación líneas abajo ∇ (m^3) es el volumen de fluido desplazado, g (m/s^2) es la aceleración gravitacional en el punto de flotación y ρ_l (kg/m^3) la densidad del fluido. Esta expresión, a partir de una relación de igualdad entre el par de fuerzas de flotación y peso, permite determinar el volumen de la embarcación necesaria para sostener toda la carga a bordo.

$$W = \rho_l g \nabla \quad (39)$$

El diseño debe garantizar no solo la flotabilidad de la embarcación y sus componentes (condición estática en aguas calmadas), sino también aspectos relacionados a la estabilidad gravitacional y trimado. Para un correcto análisis se consideraran los siguientes términos referidos al estado de flotación. Un cuerpo flotante se encontrará en equilibrio cuando las fuerzas gravitacionales y de flotación son de la misma magnitud y están aplicadas sobre la misma línea. Por otro lado, si el cuerpo es perturbado por un momento externo en un

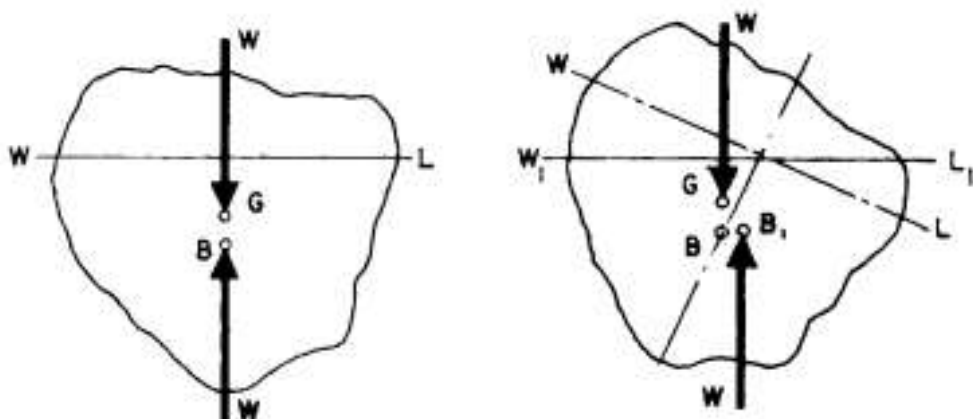


Figura 20. Equilibrio Estable de un cuerpo flotante (Lewis, 1988)

determinado instante y eventualmente regresa a la posición original, se dice que el cuerpo se

encuentra en un equilibrio estable. Finalmente, si el cuerpo continúa moviéndose en el sentido de la acción externa ya retirada se dice que se encuentra en un estado de equilibrio inestable.

El comportamiento de la embarcación es determinada por la relación de las fuerzas de gravedad y flotación. Bajo la acción única de ese par de fuerzas, el cuerpo se asentará en el agua hasta que el par de fuerzas tenga la misma magnitud y dejará de rotar bajo dos condiciones: el centro de gravedad G y de flotación B se encuentran en la misma línea vertical y que cualquier desviación producida como WL a W_1L_1 genere un momento que tienda mover al cuerpo de regreso a su posición de flotación en WL .

Una consideración a tener en cuenta es que los cuerpos flotantes si bien es cierto presentan un centro de gravedad fijo, su centro de flotación es cambiante con su rotación. Es posible mejorar la estabilidad de las embarcaciones cambiando la posición del centro de gravedad, esto es, la distribución de fuerzas gravitacionales aplicadas al cuerpo. Tanto para cuerpos flotantes como sumergibles se cumple que si el centro de gravedad desciende sobre la línea vertical de acción de fuerzas, se puede mejorar la estabilidad inicial y podría alcanzar el estado de equilibrio estable. Fuente de la figura 22: (Moore, 2010)

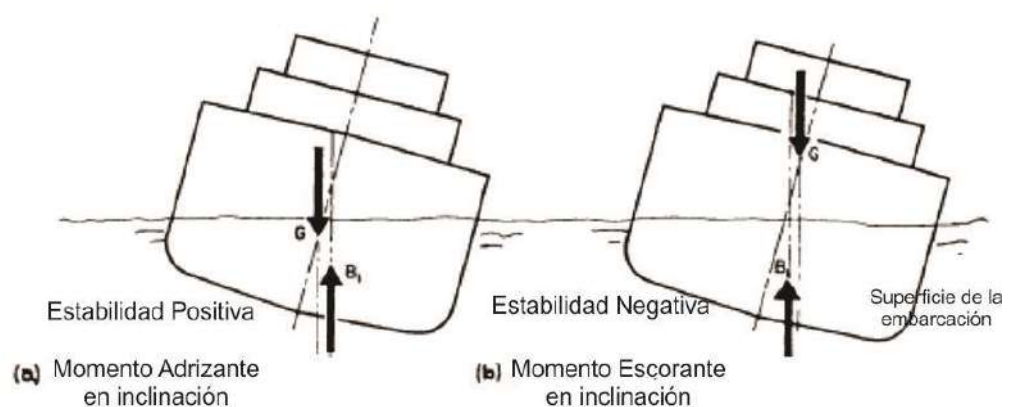


Figura 21. Efecto de la altura del centro de gravedad sobre la estabilidad (Moore, 2010)

En la figura 22, conforme el centro de gravedad de la embarcación desciende sobre la línea central, la distancia entre las líneas de acción de ambas fuerzas aumenta de forma que, el momento restaurador aumenta y con ello la estabilidad inicial del cuerpo pasa de negativa

(desfavorable) a positiva (favorable). Para el caso de estabilidad en la dirección longitudinal, el desplazamiento del centro de flotación es tal que el momento resultante creado por el par de fuerzas es muy grande comparado al momento generado en la dirección transversal bajo la misma inclinación. Es importante determinar el peso y la altura del centro de gravedad de la embarcación para el análisis de la estabilidad. A partir de esta consideración, es posible modificar las dimensiones de la embarcación y la distribución de pesos.

El metacentro M es la intersección definida por la línea vertical inicial y final que pasan por los centros de flotación en la posición recta e inclinada. En el caso de la figura, la geometría del sistema y la distribución de cargas es tal que el centro de flotación (en posición recta) y el centro de gravedad se encuentran sobre la línea central de la embarcación. La altura metacéntrica \overline{GM} de la embarcación es el segmento definido por el centro de gravedad G y el metacentro M. Para ángulos de inclinación pequeños ($\varphi < 7^\circ$) y conocidos los puntos M y G, el brazo adrizante \overline{GZ} se puede calcular a partir de la relación líneas abajo (Lewis, 1988).
Nota: El brazo adrizante \overline{GZ} es la distancia del centro de gravedad a la línea vertical que pasa a través del punto de flotación de la embarcación inclinada.

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \varphi \quad (40)$$

Para el caso de pequeños ángulos de inclinación, la altura metacéntrica \overline{GM} es un índice de la estabilidad transversal del sistema. También puede utilizarse como indicador de la estabilidad inicial para mayores ángulos de inclinación junto a la borda libre. Es un parámetro que permite expresar algunas propiedades tales como el momento transversal, el momento de trimado por grado de inclinación y el periodo de rotación. Al ser un indicador de la estabilidad del sistema, conviene valores relativamente altos, lo cual resulta ser ventajoso.

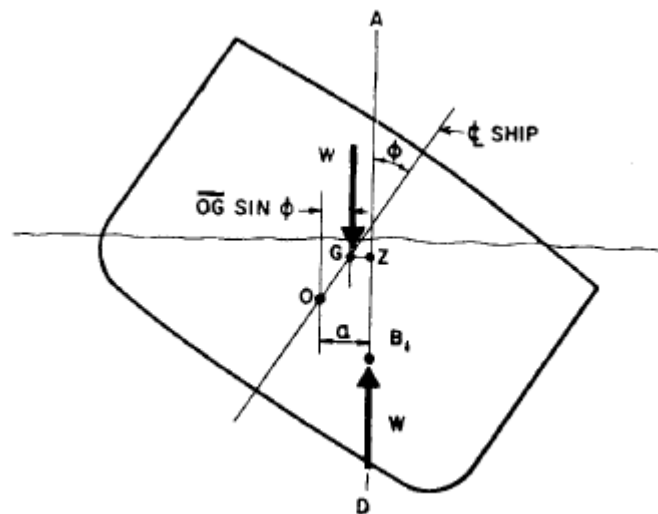


Figura 22. Brazo adrizante transversal (GZ) de la embarcación inclinada (Moore, 2010)

La curva de estabilidad estática describe la tendencia del brazo adrizante \overline{GZ} en función del ángulo de inclinación ϕ para condiciones establecidas de dimensión y carga. Es una curva que puede describir la tendencia del momento adrizante al considerar el desplazamiento de la embarcación. Entre los parámetros que influyen sobre la curva de estabilidad, se tiene la longitud de la viga y la profundidad de la embarcación. El objetivo es modificar estos parámetros en el sentido que se obtenga la mayor altura metacéntrica, que resulta en un brazo y momento adrizante superior a pequeñas valores de inclinación de la embarcación.

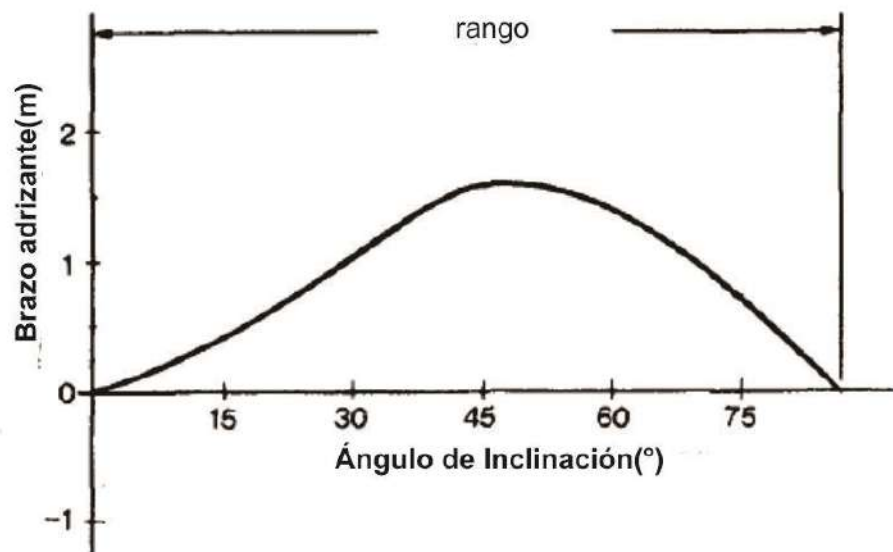


Figura 23. Curva de estabilidad intacta con centro de gravedad sobre el centro de línea de la embarcación (Lewis, 1988)

2.6. Principio de Funcionamiento del Prototipo

Para tratar las aguas de lagos y lagunas (ecosistemas lacustres), se propone un prototipo cuyo diseño le otorgue efectividad, accesibilidad y fácil implementabilidad durante la operación. Para hacerlo posible, durante el proceso de su diseño se tuvo que considerar tres aspectos muy importantes. El primer aspecto, el tratamiento de aguas, fue abordada a partir de un circuito hidráulico compuesta del subsistema de captación, de bombeo y de purificación. Esta última consiste de filtros de columna, las cuales se encargarán de remover las especies de plomo con ayuda de nanoadsorbentes creados en laboratorio (magnetita, grafeno). El segundo aspecto, la autonomía energética, fue abordado a partir de un sistema fotovoltaico compuesto de dos subsistemas; el generador fotovoltaico y el acumulador energético. Finalmente, la estabilidad de la embarcación, fue analizada con las dimensiones y ubicaciones de las cargas a bordo bajo condición de flotación intacta. Líneas abajo, se presenta un bosquejo del sistema con los componentes más importantes del prototipo en operación. El nombre asignado a la propuesta fue “prototipo de boya descontaminadora”.

En la figura, la boya extrae agua del lago a una cierta profundidad a través del subsistema de admisión de flujo. Esto es posible debido al accionar de una bomba hidráulica colocada sobre la superficie de la embarcación. Luego, este caudal de agua contaminada ingresa a una red de filtros de columna contenida en el mismo sistema de tratamiento. Esos filtros de columna están rellenos de material nanoadsorbente las cuales se encargarán de remover las especies de plomo Pb^{2+} del caudal contaminado por adsorción, siendo la quimisorción el mecanismo determinado por la interacción adsorbente-contaminante para nuestra propuesta, esto es, interacción iones plomo-grafeno. Una vez que el agua haya circulado a través de los filtros de adsorción, la concentración de especies Pb^{2+} es mínima y bajo esta condición es expulsada al lago. El funcionamiento continuo de la bomba hidráulica es posible gracias a la instalación de un sistema fotovoltaico autónomo a bordo sobre la superficie de la embarcación. Este sistema tiene como componentes: a un generador fotovoltaico y un acumulador energético. El primero básicamente es un panel solar. Este dispositivo generará la potencia necesaria para cumplir con el requerimiento energético diario. Bajo condiciones de baja disponibilidad solar, la principal fuente de suministro será el acumulador energético. De esta forma, a partir de la energía generada y requerida se establecen los periodos de carga/descarga en el dispositivo. Todos estos componentes más el controlador de carga e inversor fueron colocados en un cubículo como se indicó en el párrafo anterior para la protección de condiciones ambientales. De esta forma se garantiza un suministro energético seguro para el proceso de operación de la bomba. Ya en operación, la embarcación no solo debe proveer flotabilidad al prototipo. Su diseño tomará en cuenta la estabilidad de la embarcación bajo flotación intacta. En nuestro caso, al tratarse de un prototipo bajo condiciones de flotación superficial e intacta, se considera como parámetro fundamental un ancho de embarcación apreciable. El prototipo está diseñado de forma que pueda tratar las aguas contaminadas de un lago in-situ en zonas remotas pero con alta disponibilidad solar. Su diseño, además, le otorga movilidad de forma que puede desplazarse por toda la extensión superficial del lago buscando las zonas con niveles críticos de contaminante, el cual, como se demuestra, no es homogénea en todo su volumen. Su construcción fue elaborada con materiales a disponibilidad y siguiendo un proceso sencillo que la hace de fácil implementación.

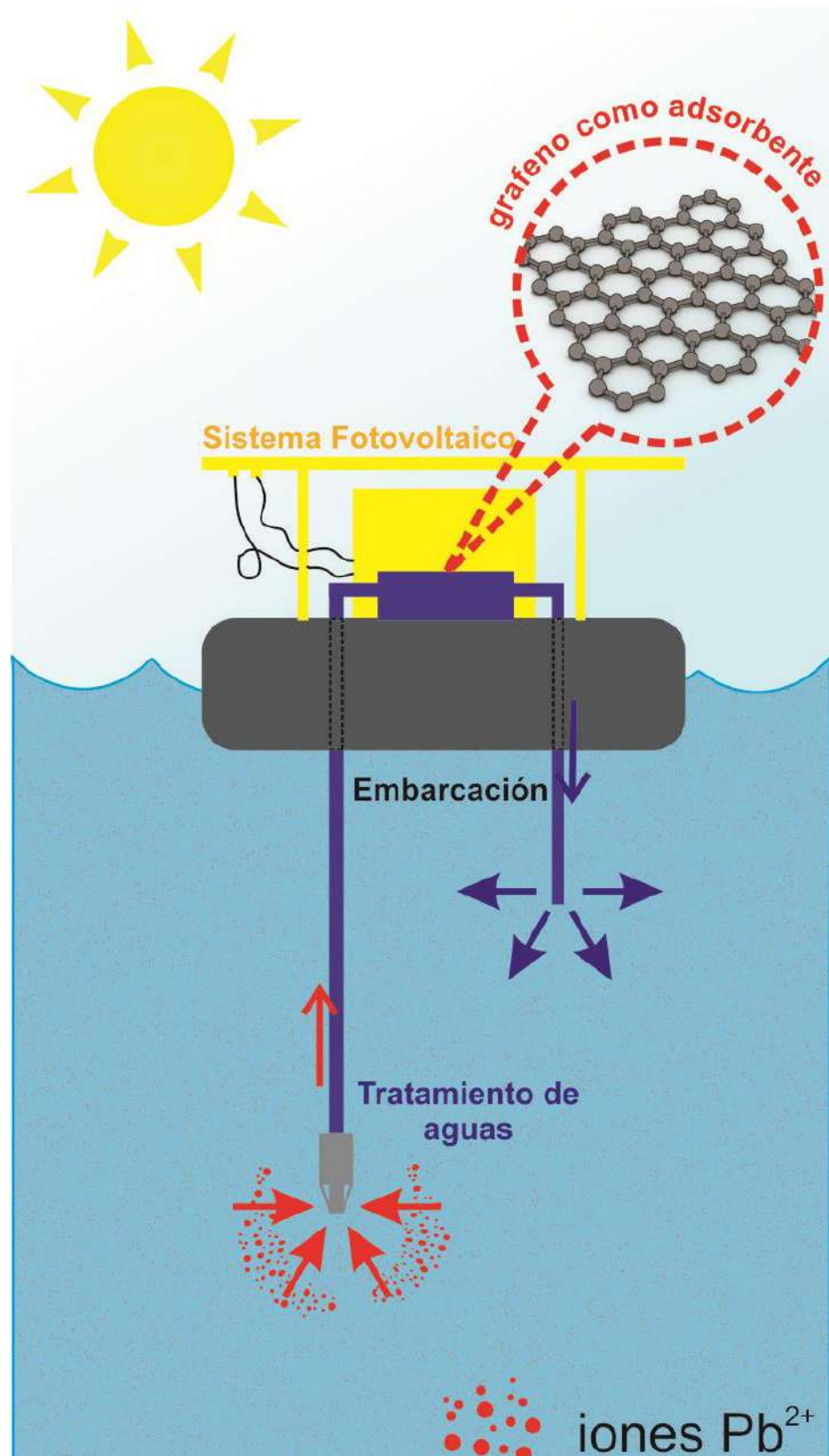


Figura 24. Boya descontaminadora y componentes para remoción de plomo de lagos y lagunas del Perú

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta sección se lista la serie de pasos para el diseño de la boya para el tratamiento de aguas de un lago bajo condiciones de campo específicas. La única variable de requerimiento se refiere al volumen de agua descontaminada por día.

3.1. Caso de Estudio: Lago Chinchaycocha

). Se ubica en el altiplano de la región Puna a 4100 m.s.n.m. El Lago cuenta con un área de 410.52 km² de manera que constituye casi el 77% de la Reserva Nacional de Junín (Shoobridge, 2006). Es el segundo lago más extenso del Perú y un principal tributario de la cuenca amazónica previendo varios servicios ambientales incluyendo hidroenergía, equilibrio ecológico y regulación hídrica. La profundidad máxima se estima ~12m (Delman, 2012; Shoobridge, 2006). El lago está rodeado por un humedal de importancia internacional en el convenio Ramsar. Asimismo, este lago es compartido por los departamentos de Junín y Pasco, específicamente los distritos de Carhuamayo, Ondores, Junín, Vicco y Ninacaca. El clima en el altiplano (región Puna) consiste de temperaturas de entre 3-7°C y que disminuyen a valores por debajo de 0°C en las noches. Los meses más fríos son entre Mayo y Setiembre. El lago no está bien mezclado de forma que la distribución de contaminantes es heterogénea en toda su extensión. Tiene un termoclima con temperaturas que bajan con la profundidad (Shoobridge, 2006).



Figura 25. Laguna Chinchaycocha- (Junín, Junín). Captura: Mayo 2019

El Lago Chinchaycocha es abastecido por el río San Juan y vierte sus aguas hacia el noroeste dando origen al río Mantaro, el cual contribuye a la cuenca amazónica. El Río Mantaro tiene su origen en la represa hidroeléctrica Upamayo. La subcuenca del Lago Junín puede observarse sobre la figura. La Reserva Nacional de Junín cuenta con una diversa flora, fauna y belleza escénica impulsando de esta forma la recreación, economía y ecoturismo en la región. Sin embargo, existe preocupación de contaminación debido a los efectos visibles sobre la flora y fauna, incluida las muertes y la bioacumulación de sustancias tóxicas en los seres vivos.

El lago Junín cuenta con trabajos de monitoreo de calidad de agua en los años 2014(ANA, 2014), 2015 (García Aragón et al., 2015) y 2016 (AAA-X Mantaro & ANA, 2016) por la Dirección de Gestión de Calidad de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua. Los resultados se obtuvieron a partir del muestreo de las aguas del lago sobre diferentes puntos

en toda su extensión, las cuales fueron analizadas para determinación de la cantidad de plomo Pb (II) en solución. Los resultados indican niveles de plomo las cuales exceden por amplio margen los estándares de calidad para consumo humano (0.01 ppm), irrigación (0.05 ppm) y conservación del ecosistema lacustre (0.0025 ppm), valores aprobados y establecidos mediante decreto supremo (MINAM, 2017).

Es importante considerar la proximidad del Lago Chinchaycocha a Cerro de Pasco, una región minera, ya que la presencia no solo de plomo sino también de otros metales pesados en el lago ha sido alarmante, como los informes de calidad ambiental lo demuestran. El plomo, ya sea por medios naturales o antropogénicos, puede ingresar a los ambientes acuáticos. La forma iónica Pb^{2+} es la más tóxica, su porcentaje en masa y biodisponibilidad dependerá de las propiedades fisicoquímicas del medio, principalmente, del pH de la solución y la cantidad de carbono orgánico disuelto (ILA - International Lead Association, 2017). En general, la concentración total tiende a ser bajo en ecosistemas lacustres ya que los procesos naturales tienden a eliminarlo del medio acuoso depositándolo en sedimentos donde es menos perjudicial para la vida acuática. Sin embargo, aun surgen preocupaciones con respecto al plomo en las aguas superficiales, porque estas concentraciones, a veces, superan los niveles tolerables del Estándar de Calidad Ambiental (MINAM, 2017).

No obstante, se observa en estudios de monitoreo (posteriores al año 2013) mejoras con respecto al número de puntos de muestreo con niveles altos de concentración de plomo. Existen teorías con respecto a la fuente de plomo en el Lago Chinchaycocha. Estudios demostraron que el Río San Juan presenta niveles altos de plomo y la sugieren como fuente puntual de contaminación (Bianchini et al., 2015), esta a su vez magnificado por los problemas de embalse generados por la represa Upamayo. Se sugiere un mecanismo de contaminación de Lago Junín (Rodbell et al., 2014) el cual establece que los sedimentos en la represa Upamayo y en el cauce del Río San Juan, expuestos y no saturados en la estación seca se remobilizan en la estación húmeda. Al llenarse la represa, se inunda una gran área y obliga al contaminado Río San Juan descargar sus aguas en el Lago Chinchaycocha. Fuente de la figura 27: (Delman, 2012)

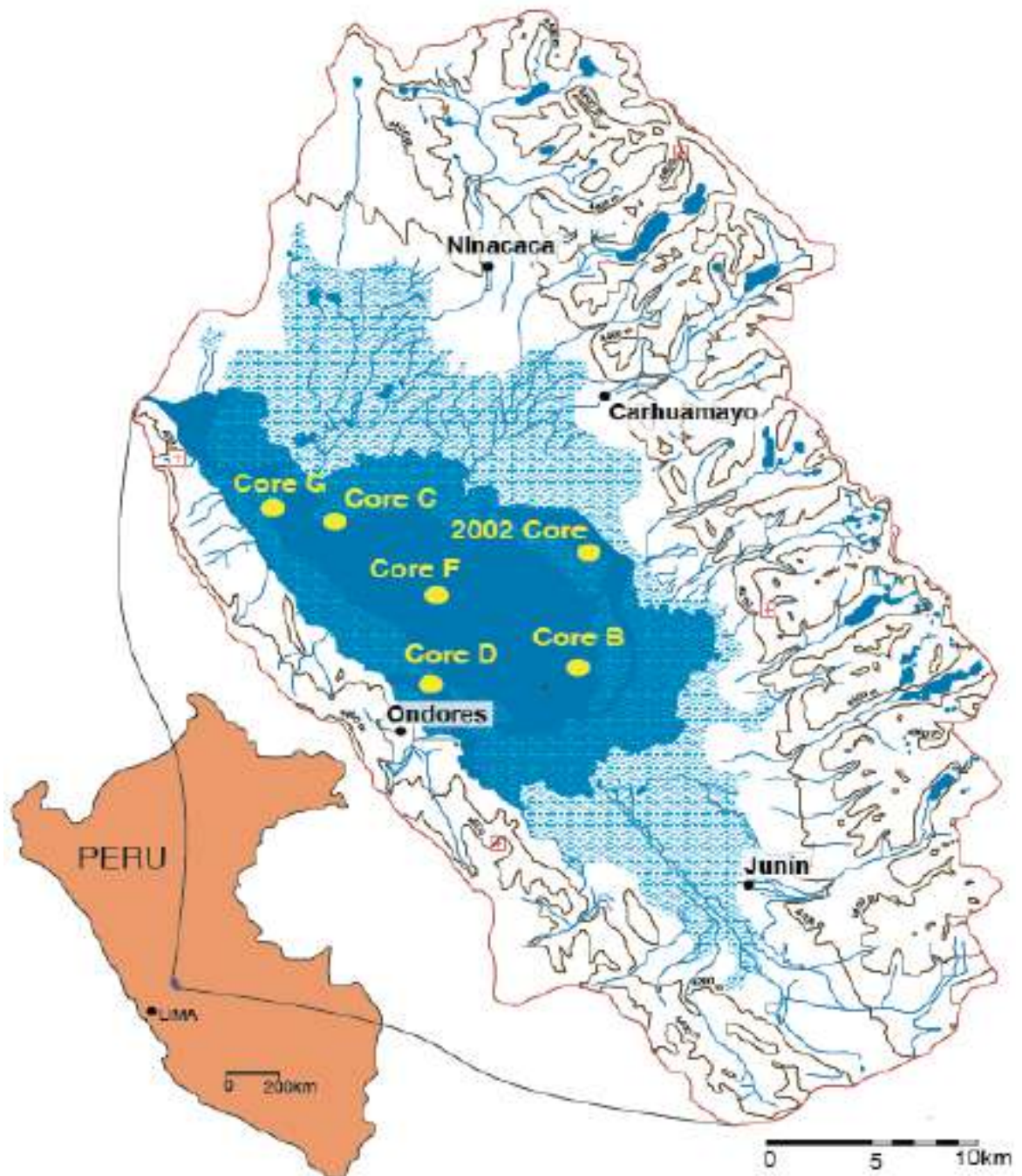


Figura 26. Mapa de Lago Junín en los Andes Centrales. El Río San Juan se convierte en el Río Mantaro en la represa Upamayo y continúa su travesía hacia el Sur. EL lago Junín solía drenar sus aguas al Río San Juan hacia el noroeste conformando una cuenca de drenaje, pero la construcción de la represa Upamayo generó el caso opuesto. La diferencia en los niveles de agua se nota en los sombreados de azul con distintas tonalidades (Delman, 2012)

3.2. Material Adsorbente: "Aremago"

Con respecto al adsorbente, como fue descrito anteriormente, tiene tres materiales componentes: la arena (SiO_2) el cual hace el papel de sustrato. Este material tiene adherido a su superficie los nanoadsorbentes de magnetita (Fe_3O_4) y óxido de grafeno (GO). El diámetro de grano fue obtenido con tamizadores No. 20 (0.841 mm) y No. 18 (1.00 mm). Entre otras propiedades se tiene la densidad de cama $\rho_B = 1.216 \text{ g/cm}^3$. Estudios previos presentan caracterizaciones realizadas sobre el material adsorbente entre los que se tiene un análisis por DRX (Espectroscopía por Difracción de Rayos X) que determina la presencia de óxido de hierro Fe_3O_4 , un análisis por Raman (Espectroscopía Raman) que determina la presencia de óxido de grafeno y un análisis por SEM (Microscopía Electrónica de Barrido) que determina el tamaño de estas nano partículas adheridas a la superficie del sustrato. El Anexo presenta algunos resultados que caracterizan las propiedades de adsorción de plomo Pb (II) de un medio acuoso. Estos ensayos fueron realizados a nivel de laboratorio en el que las soluciones fueron sintéticas, esto es, disoluciones de sal de plomo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ en agua destilada. Los resultados justificaron el por qué se utilizó este material adsorbente para el tratamiento de lagos y lagunas contaminados con plomo. Por ejemplo, el resultado de adsorción a diferentes niveles de pH determina que nuestro material mantiene un alto poder de remoción (~98%) de especies Pb^{2+} en medio básico. Los resultados por cinética indican un bajo tiempo de contacto requerido para la remoción de especies Pb^{2+} de la solución sintética mientras que el resultado a diferentes valores de concentración inicial de soluto determina que a bajos niveles de la misma, la adsorción se mantiene altamente efectiva. Estos resultados corresponden al desempeño del material AreMaGo de producción escalada en condiciones controladas de laboratorio.



Figura 27. Arena recubierta con Magnetita (Fe_3O_4) en una dispersión de Óxido de Grafeno (GO) para la producción a nivel de laboratorio "AreMaGo"

3.3. Ensayo de Columna con el Adsorbente

Se desarrolla estudios de columna para determinar la curva de ruptura de nuestro material adsorbente a condiciones de campo y laboratorio.

- Para la implementación de los ensayos, se construye el circuito hidráulico de acuerdo al diseño mostrado en la figura 28.
- La columna de adsorción consiste de un tubo PVC al cual se le conectaron reductores en sus extremos. Estas piezas permiten colocar mallas metálicas las cuales sostendrán el material adsorbente.
- Se elige mallas metálicas con tamaño de poro lo suficientemente pequeño para evitar el material escape. De acuerdo al tamizador utilizado, el agujero tuvo que ser menor en tamaño a 0.841 mm.

- Se coloca la malla metálica y la pieza reductora en uno de los extremos del tubo y por el otro se deposita el material adsorbente. La cantidad utilizada para enrazar el material fue de 79.44 gr.
- El filtro preparado se sostuvo a un soporte universal en posición vertical. Se utilizaron conectores racor y mangueras las cuales facilitaron el montaje del equipo. El caudal fue controlado a nivel constante de 5mL/min con la ayuda de una llave aguja.

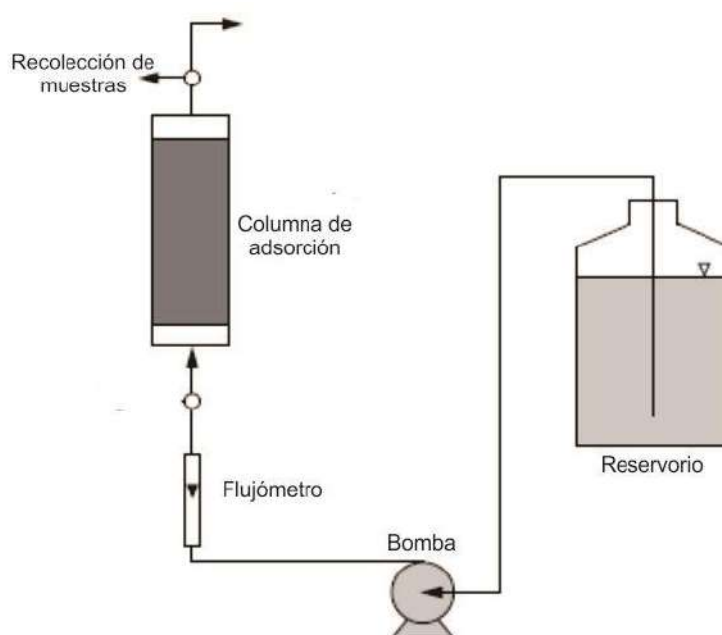


Figura 28. Esquema hidráulico en los ensayos de columna para remoción de Pb^{2+} con el adsorbente AreMaGo.

- **Para el caso del ensayo de laboratorio (Facultad de Ciencias)**, el reservorio contenía una mezcla de agua destilada con una solución de nitrato de plomo $Pb(NO_3)_2$. Para ello, se diluyeron 300 mL de solución stock a 1000 ppm de Pb^{2+} en agua destilada para obtener 12 L de agua contaminada a 20 ppm de Pb^{2+} .
- **Para el caso del ensayo de campo (Lago Chinchaycocha)**, el reservorio contenía una mezcla de la matriz del lago con una solución de nitrato de plomo $Pb(NO_3)_2$ para elevar la concentración de iones Pb^{2+} . Se diluyeron 20 mL de solución sintética de 1000 ppm en 2 L de solución matriz del lago.
- Para ambos casos, el agua preparada en el reservorio es transportada por medio de una bomba hidráulica hacia la columna de adsorción. Luego de su paso a través del

filtro, el fluido se recoge en el extremo final del circuito el cual está indicado en la figura 29.

- Se recogieron las muestras cada cierta cantidad de volumen de agua tratada, la cantidad recogida fue de unos 15 mL por muestra.
- Las muestras fueron filtradas con uso de membranas filtrantes para la remoción casi completa de los materiales particulados de manera que se obtuvo solo la fracción disuelta.
- Finalmente, estas muestras fueron acidificadas con el uso de ácido nítrico hasta alcanzar un nivel de pH menor a 2. La técnica de análisis para la determinación de la concentración de plomo en medio acuoso fue la Espectroscopía de Absorción Atómica.

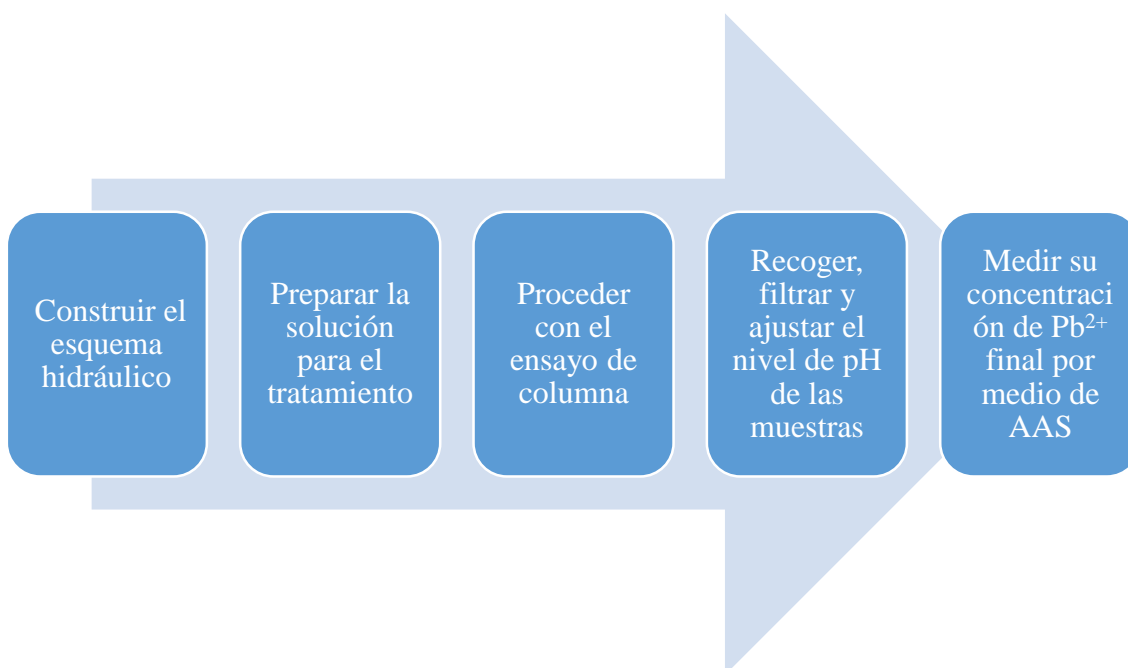


Figura 29. Procedimiento experimental para determinar la curva de ruptura del material adsorbente bajo condiciones de operación definidas.

3.4. Diseño del Prototipo Boya Descontaminadora

Basada en las condiciones de campo del lago Junín, se procede al diseño de los componentes de la boya. Para ello se utilizará el desempeño del filtro de adsorción bajo condiciones de campo el cual se determina en la sección anterior.

- Para el dimensionamiento del filtro se tomará en cuenta la concentración inicial C_0 (ppm) de operación, la concentración final requerida C_f (ppm) , el caudal de operación Q (mL/min) y el periodo de tiempo para el cambio del material adsorbente (días).
- Se escoge una velocidad de filtración apropiada para las dimensiones del circuito hidráulico. Si se utiliza el método cinético para el escalamiento del filtro, conviene mantener una carga hidráulica muy próxima al caso piloto.
- Con la velocidad superficial definida, se elige el diámetro de la columna de adsorción mínima requerida. El método de dimensionamiento apropiado será el cinético el cual determinará la cantidad de masa utilizada y las nuevas dimensiones de la columna escalada.
- Luego se inicia el proceso para el dimensionamiento de la bomba hidráulica para el cual se debe de conocer las propiedades físicas del fluido (densidad y viscosidad) a la temperatura de operación.
- Se identifica las piezas del sistema hidráulico sobre el que se tendrá pérdidas de carga hidráulica apreciables y son: el medio poroso filtrante, las piezas del sistema en admisión y expulsión del agua.
- Para el caso del medio granular, se utiliza una expresión, conocida como la ecuación de Ergun para estimar la pérdida de presión producida por conducir cierto caudal de fluido a través de la misma.
- Existen expresiones conocidas para determinar pérdidas de carga en las piezas del circuito hidráulico. Se determinan la altura total de impulsión y aspiración, su diferencia es la carga total de la bomba, es decir, la energía que debe de ser entregada al fluido.

- Con la altura manométrica y el caudal de operación de la bomba se acude a la curva característica de $H(Q)$ para determinar las dimensiones de la bomba.
- Se identifica todas las cargas de consumo energético y se cuantifican en un total. En nuestro sistema, además de la bomba hidráulica, no se tiene un dispositivo que genere un consumo eléctrico significativo.
- Con la potencia eléctrica absorbida por la bomba se inicia el diseño del panel fotovoltaico. Para este diseño se empleará un método intuitivo basado en cumplir el requerimiento energético utilizando cierto factor de seguridad, además de tomar en cuenta la disponibilidad solar de la zona, la potencia pico del generador solar bajo condiciones estándar y la demanda energética real en cuestión.
- El diseño del acumulador de energía utiliza un método de dimensionamiento similar en el que su capacidad cubre la demanda energética real teniendo en cuenta además el número de días de autonomía, la máxima profundidad de descarga y un factor de pérdidas.
- El inversor, el controlador de carga y cables de conducción eléctrica son dimensionados de la misma forma considerando un factor de seguridad.
- Una vez obtenido las dimensiones del sistema de tratamiento de agua y del sistema fotovoltaico autónomo, son colocadas sobre una embarcación cuyo diseño debe caracterizarse por su seguridad, estabilidad y de fácil implementabilidad. La distribución de cargas debe ser llevado a cabo de tal forma que se garantice la máxima estabilidad del sistema.
- Los estudios de estabilidad se realizan con software de simulación para embarcaciones, en ella se analiza las curvas de estabilidad.

3.5. Materiales y Equipos Utilizados

3.5.1. Materiales

Para la construir la columna de adsorción:

- 1 tubos PVC de 1" de longitud=10cm con rosca externa en sus extremos.
- 2 reductores de 1" a 1/2" con rosca interna por ambos lados.
- 2 mallas de acero inoxidable circular con agujeros de diámetro $\phi_p \sim 0.5$ cm.
- 2 mallas de acero inoxidable circular con agujeros de diámetro $\phi_p \sim 0.5$ mm.
- 2 conectores racor macho de 1/2" para manguera de 10 mm.
- 1 válvula universal de PVC de 1/2"
- 1 soporte universal con base plana.
- 3 pinzas de laboratorio con doble nuez cada una.

Para construir el reservorio de solución:

- 1 soporte universal con base plana
- Hilo de acero inoxidable con doble nuez.
- 1 contenedor de 4.0 litros plástico
- 1 niple especial de PVC, 2 empaquetaduras y 2 contratueras todas de 3/4"
- 1 válvula universal de 3/4" con rosca interna ambos extremos

Piezas adicionales del sistema hidráulico:

- 1 bomba hidráulica centrífuga de 34 W.
- 1 niple especial y 1 codo de PVC, ambas de PVC de 3/4"
- 1 adaptador y 1 unión con rosca interna, ambas de PVC de 1/2"
- 1 conector racor macho de 1/2" para manguera de 10 mm
- 2 metros de manguera de 10 mm.
- Cinta teflón para tuberías de agua.

- Pegamento fuerte para tuberías de PVC y lija.
- 1 llave aguja de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " con rosca interna en sus extremos.
- 2 conectores racor macho de $\frac{1}{4}$ " para manguera de 10 mm.

Materiales utilizados para ejecutar el ensayo de adsorción, recojo y preparación de muestras para la lectura por adsorción atómica

- 79.44 gr de material adsorbente aremago.
- 2.0 Litros de matriz del Lago Chinchaycocha.
- 20 mL de solución de plomo a 1000 ppm de concentración.
- Probeta de pírex de 50 y 100 mL.
- Vaso de pírex de 0.5 y 1.0 L.
- Pipetas de pírex de 1, 10 y 25 mL con sus respectivas pipeteadores.
- Botellas de Polietileno para el reservorio y el recojo de muestras.
- Filtros de membrana de 0.45 μm
- Micropipeta de 20-200 μL y puntas de micropipeta.
- Ácido Nítrico HNO_3 para acidificar las muestras.

3.5.2. Equipos Utilizados

Un Equipo de Adsorción Atómica (marca SHIMADZU AA 7000) es utilizada para medir la concentración de plomo en solución. En este método los átomos gaseosos libres absorben la radiación electromagnética de una longitud de onda específica para generar una señal medible. La señal de absorción es proporcional a la concentración de átomos presentes en el camino óptico. Por lo tanto, para las respectivas mediciones, el analito tiene que ser convertido en átomos en fase gaseosa, usualmente por aplicación de calor a una celda conocida como atomizador. Un espectro de absorción atómica consiste de cuatro partes principales. Una lámpara (emisora de líneas espectrales), un atomizador (de llama o electrotérmico) donde se produce átomos en fase gaseosa de la muestra, un selector de longitud de onda para el enfoque sobre la longitud de onda absorbida y un detector con el sistema electrónico y de lectura, este componente detectará la intensidad de luz que pasa a través del selector (Fernández et al., 2019). Fuente de la figura 31: (Cheremisinoff, 1996)

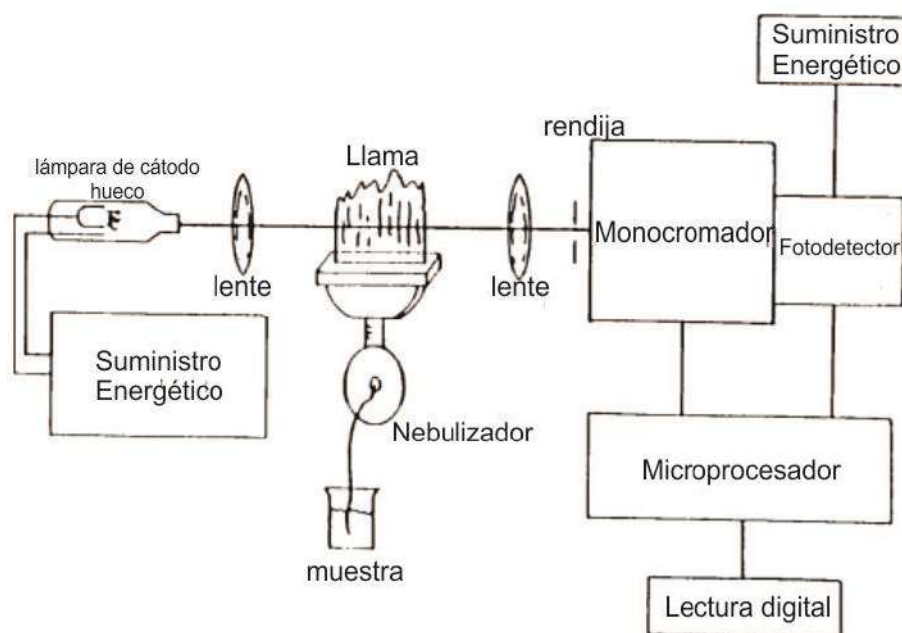


Figura 30. Espectrómetro de Absorción Atómica y sus componentes (Cheremisinoff, 1996)

- La fuente de luz usual es una lámpara catódica hueca, el cual consiste de un ánodo de Tungsteno y un cátodo hueco cilíndrico hecho del elemento a ser analizado, colocados en un tubo de vidrio cerrado lleno de un gas inerte (Ne o Ar) a baja presión (1-5 torr). Al aplicar una diferencia de potencial cerca de 300-400 V entre el ánodo y el cátodo, se ioniza el gas generando la formación de plasma entre los electrodos. Los iones de gas inerte impactan sobre el cátodo y los átomos metálicos son eyectados "sputtering". Por las colisiones en el medio plasmático, algunos de los átomos metálicos son excitados y radiación de longitud de onda característica es emitida conforme estas especies regresan a su estado basal $Pb^* \rightarrow Pb + h\nu$.
- El sistema utiliza un atomizador de llama como fuente de calor en la espectroscopia por adsorción atómica para la producción de átomos en fase gaseosa. El análisis de muestras líquidas mediante este sistema requiere de etapas de aspiración y nebulización de la solución. Los nebulizadores neumáticos convencionales producen gotas de diámetro en el rango 1-50 μm . Las gotas más grandes de la muestra nebulizada son condensadas y desechadas, esto es entre el 90-99% de la masa total (Fernández et al., 2019; Levenson, 2001), mientras que las más finas se mezclan con los gases combustibles y oxidantes antes que ingresen a la cámara del quemador. Una vez en la llama se inicia los procesos de desolvatación, vaporización y disociación las cuales resultan en la formación de átomos en fase gaseosa principalmente. Para producir una llama se emplean diferentes combinaciones de gas oxidante/combustible entre los que se destaca el par aire-acetileno (2100-2400°C) y el par óxido nitroso-acetileno(2600-2900°C) siendo esta último el más caliente y reductor (Fernández et al., 2019; Levenson, 2001).

- Los selectores de onda más comunes utilizados en un espectroscopio por adsorción atómica son los monocromadores basados en el diseño de Czerny-Turner (Fernández et al., 2019) mientras que el transductor en el detector, que cuantificará la intensidad de luz, funciona a base de tubos fotomultiplicadores (PMT).

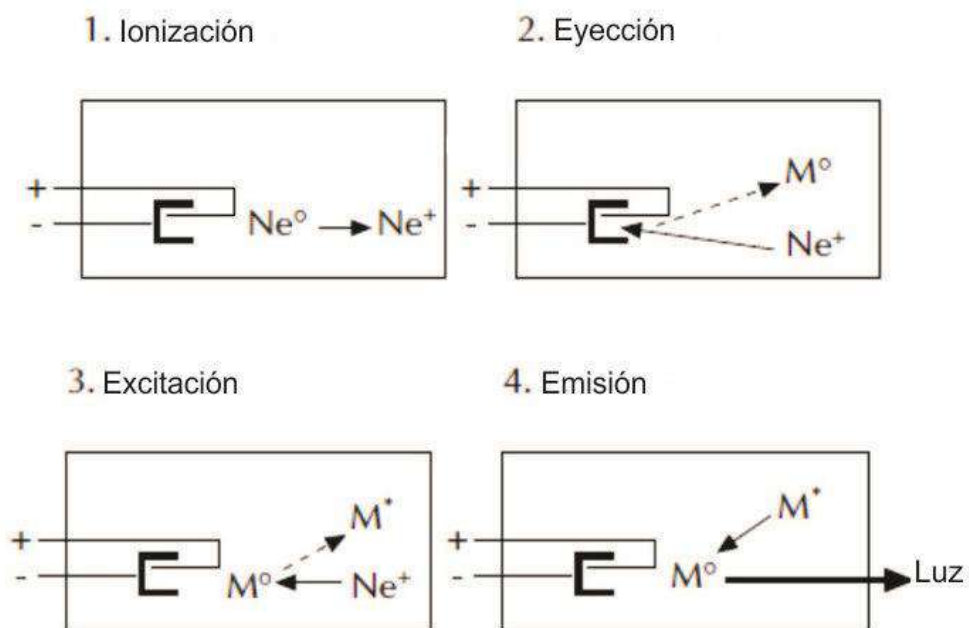


Figura 31. Formación de haz de luz por excitación del metal en estudio (Levenson, 2001)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Ensayo de Columna con el Adsorbente

De acuerdo al procedimiento experimental, se tuvo que construir en campo el sistema bosquejado en el procedimiento experimental para realizar los respectivos ensayos de columna. La imagen a la izquierda muestra el sistema montado. El cubículo negro contiene una batería de 12V-100AH y un inversor 12V-500W para la obtención de señal alterna mientras que el enchufe múltiple suministró energía constante a la bomba hidráulica de 34W y un ventilador de refrigeración de 4W. También se observan dos soportes universales, el



Figura 32. (A la izquierda) Sistema montado para los ensayos de columna. (A la derecha) llenado del filtro con el material adsorbente Aremago

primero de ellos fue utilizado para sostener el reservorio con la muestra contaminada y el segundo para sostener la columna de adsorción. Se utilizaron conectores racor y una manguera azul para un montaje sencillo y rápido. La imagen a la derecha muestra la columna de adsorción la cual es llenada con el material adsorbente a tope. Las mallas metálicas mencionadas en el procedimiento fueron necesarias para sostener el material y permitir una operación segura. Una vez completado este paso y con el sistema de tratamiento ya montado se pone en marcha el ensayo para el recojo de muestras y su posterior caracterización.

El objetivo fue caracterizar bajo las condiciones de campo de presión y temperatura, el rendimiento de la columna del material adsorbente Aremago. Estos resultados fueron utilizados para el diseño de la red de filtros de la boya descontaminadora.

Tabla 3. Parámetros de operación de la columna de adsorción en campo

Masa del adsorbente m_a	Densidad de columna ρ_b	Longitud de columna h	Área transversal
79.44 g	1.216 g/cm ³	10.0 cm	6.533cm ²
Concentración inicial c_o	Flujo volumétrico Q	Velocidad de filtración Q_h	Tiempo de contacto ebct
9.032 ppm	5.0mL/min	0.765cm/min	13.066 min

En el laboratorio, las muestras ya preparadas son llevadas al equipo de absorción atómica para determinar la concentración de plomo. Antes de la lectura, se calibra el equipo con soluciones patrón y se obtuvo una ecuación lineal con un chi-cuadrado de $r^2=0.994$ para el ajuste. Estos resultados garantizan confiabilidad de la medición. Además, es importante resaltar que estas mediciones se caracterizan por una precisión aceptable puesto que tiene valores de desviación estándar relativa por debajo del 5%.

Tabla 4. Resultados de la calibración del equipo con soluciones patrón de 1, 3 y 5 ppm.

Muestra	Conc. (ppm)	Abs.	RSD (%)	SD
1	0.9593	0.0282	1.75	0.0005
3	3.0813	0.0856	0.36	0.0003
5	4.9593	0.1364	0.22	0.0003

Se emplean los modelos experimentales para el ajuste de curvas y la descripción de la tendencia de la adsorción: El Modelo de Thomas, El modelo Adams-Bohart, El Modelo Yoon Nelson y El Modelo de Dosis-Respuesta. A continuación se utiliza el Modelo de Thomas para caracterizar la curva.

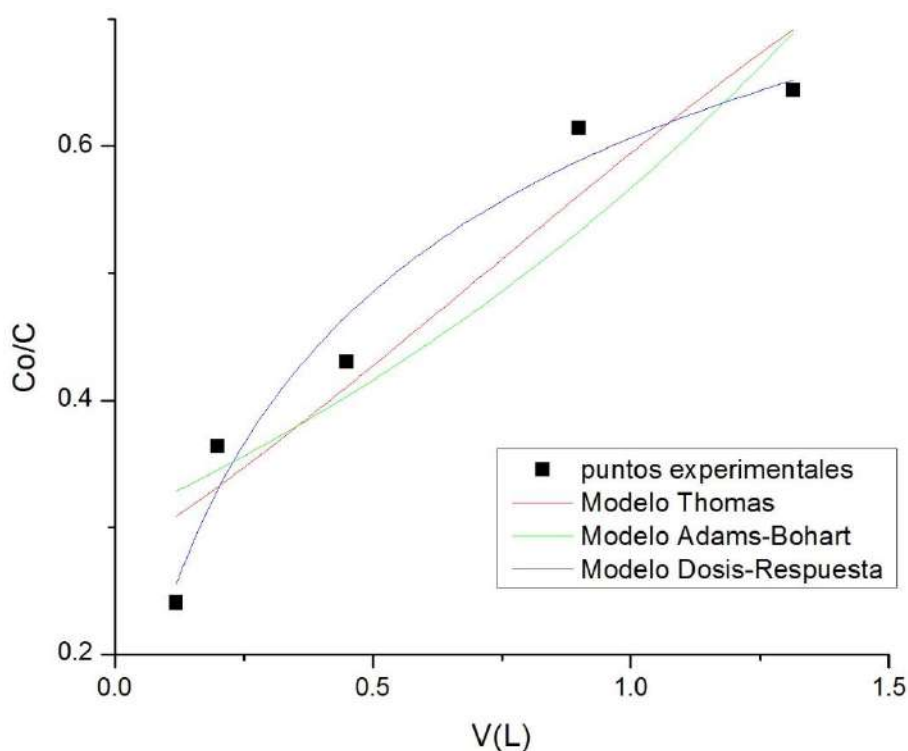


Figura 33. Curva de ruptura de la adsorción de especies Pb^{2+} del Lago Chinchaycocha a base de filtros de Aremago. $Q=5$ mL/min, $C_0=9.032$ ppm, $m_a=79.44$ g. Condiciones ambientales $T=14.2^\circ C$, $P=0.6884$ atm, $pH=8.4$

Tabla 5. Modelo Empíricos para el ajuste de la curva de ruptura. Condiciones de operación Q=5 mL/min, Co=9.032 ppm, m_a= 79.44 g. Condiciones ambientales T=14.2°C, P=0.6884 atm, pH=8.4

Modelo	Constante	Valor	Chi-Cuadrado (R ²)
Adams-Bohart	k _{ab} (mL/mg. min)	0.3339	0.7984
	N _o (mg/L)	272.3	
Thomas	k _{th} (mL/mg. min)	0.7278	0.8729
	q _o (mg/g)	0.0840	
Yoon-Nelson	K _{yn} (min ⁻¹)	0.0068	0.8729
	τ _{yn} (min)	143.4269	
Dosis Respuesta	q _o (mg/g)	0.0636	0.9611
	a (adimensional)	0.7100	

Del ajuste de curvas, si bien es cierto que los modelos que describen de forma aceptable la tendencia de la curva son el de Adams-Bohart y el de Dosis-Respuesta, se utiliza el primero para la descripción de la tendencia de la adsorción en el filtro. Bajo este modelo se calculan algunos valores que caracterizan el desempeño de la operación. Los valores son mostrados en la tabla.

Tabla 6. Parámetros que caracterizan el desempeño de la adsorción de la columna

Carga total q_t	Carga de Equilibrio q_o	Carga de ruptura $q_b - \left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	Carga de ruptura $q_b - \left(\frac{c}{c_o}\right)_{30\%}$
0.339 mg/g	0.107 mg/g	0 mg/g	0.013 mg/g
Zona transferencia másica MTZ $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	Volúmenes de cama en ruptura NBV- $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	Volúmenes de cama en ruptura NBV- $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{30\%}$	Tasa de agotamiento de adsorbente
>10.0 cm	0 L/kg	1.385 L/kg	0.027 kg/L

4.2. Diseño de la Red de Conducción Hidráulica

Para el diseño de la boya, se toma en cuenta los parámetros de requerimiento, que son: la concentración inicial C_o (ppm), que corresponde finalmente a la concentración del lago Junín en una cierta zona de toda su extensión; la concentración final C_f (ppm), que corresponde a la concentración requerida de salida el cual se aproxima al ECA (Estándar de Calidad Ambiental) para consumo humano y el flujo de operación (Q). Se elige también el periodo de cambio del material adsorbente. Para nuestro caso inicial, el valor de flujo operación se calculó a partir del consumo diario de agua promedio de una familia conformada por cinco personas. Entonces, si consideramos que el consumo promedio es de 140.0 L diarios y que el tiempo de operación del prototipo será de 12 horas por día, se determina un valor de flujo de 194.44 mL/min.

Tabla 7. Parámetros de operación de la columna de adsorción-dimensionamiento del prototipo

Concentración inicial c_0	Concentración final c	Fracción de remoción c/c_0	Periodo de cambio
0.2 ppm	0.1 ppm	50.0 %	7 días
Volumen tratado v	Tiempo de operación t	Flujo de operación Q	
140.0 L/día	12 horas/día	195 mL/min	

Podemos considerar dos métodos de dimensionamiento, el primero corresponde al método de escalamiento proporcional y estima los parámetros de operación en el escalamiento pero bajo un mismo porcentaje de remoción. Para ello, se requiere de la condición inicial y conocer el volumen de ruptura bajo el porcentaje de remoción de la condición de diseño. Este hecho limita su aplicación puesto que, si en el ensayo inicial no se alcanza la fracción de remoción requerida para la operación dimensionada no se podrá realizar los respectivos cálculos.

La otra opción tiene que ver con el método cinético de dimensionamiento. Esta propuesta si permite estimar los parámetros de operación sin una restricción del valor de fracción de remoción. La expresión del modelo corresponde a la ecuación 22, para aplicarla es necesario calcular las constantes del modelo bajo las condiciones del ensayo inicial y, con estas mismas constantes determinar el valor del nuevo parámetro bajo las nuevas condiciones de operación. Ambos métodos de dimensionamiento generan, en el rango aplicable, resultados muy similares al calcular la masa requerida de adsorbente en operación escalada. La expresión líneas abajo fue usada para el cálculo de la cantidad de material requerida para diferentes valores de fracción de remoción. Se verifica la validez de ambas propuestas si consideramos el proceso de escalamiento por partes. El primero que correspondería a aplicar el modelo de Thomas para estimar el volumen tratado de ruptura bajo la nueva condición de

concentración inicial (0.2 ppm) y consecuentemente, estimar por el método de escalamiento proporcional la masa requerida de adsorbente para el volumen tratado en ruptura (980.0 L).

$$\ln\left(\frac{0.2 \frac{mg}{g}}{c} - 1\right) = \frac{\left(0.728 \frac{mL}{mg \cdot min}\right)\left(0.084 \frac{mg}{g}\right) m_a}{195 \text{ mL/min}} - \frac{\left(0.728 \frac{mL}{mg \cdot min}\right)\left(0.2 \frac{mg}{L}\right) (980 \text{ L})}{195 \text{ mL/min}}$$

Tabla 8. Masa requerida tras el dimensionamiento del sistema descontaminador en función de la fracción de remoción-método cinético

Concentración final (ppm)	Fracción de remoción (%)	Masa de adsorbente requerida (g)
0.12	60.0	1040.04
0.10	50.0	2333.33
0.08	40.0	3626.63
0.06	30.0	5035.92
0.04	20.0	6755.13
0.02	10.0	9341.71
0.01	5.0	11725.07

Es posible realizar cambios, bajo ciertos criterios, en los métodos anteriormente mencionados debido a que, en efecto corresponden a métodos intuitivos para dimensionamiento. El último procedimiento representa un método alternativo para verificar la validez del proceso elegido.

El siguiente paso es elegir un valor de velocidad superficial Q_h (cm/min) y conviene que dicho valor sea lo suficientemente pequeño para: mantener una baja caída de presión en la zona de impulsión de la bomba. Además, la columna debe presentar dimensiones convenientes para su implementación. Una sección superficial grande requiere de la instalación de filtros de columna en paralelo o del diseño de una pieza con el diámetro adecuado mientras que una sección superficial pequeña requiere de valores de profundidad de cama apreciables las cuales pueden dificultar su instalación sin mencionar el aumento progresivo de la pérdida de

carga hidráulica. Se tomó en cuenta la pérdida de carga en estudios previos para su elección en el prototipo boya.

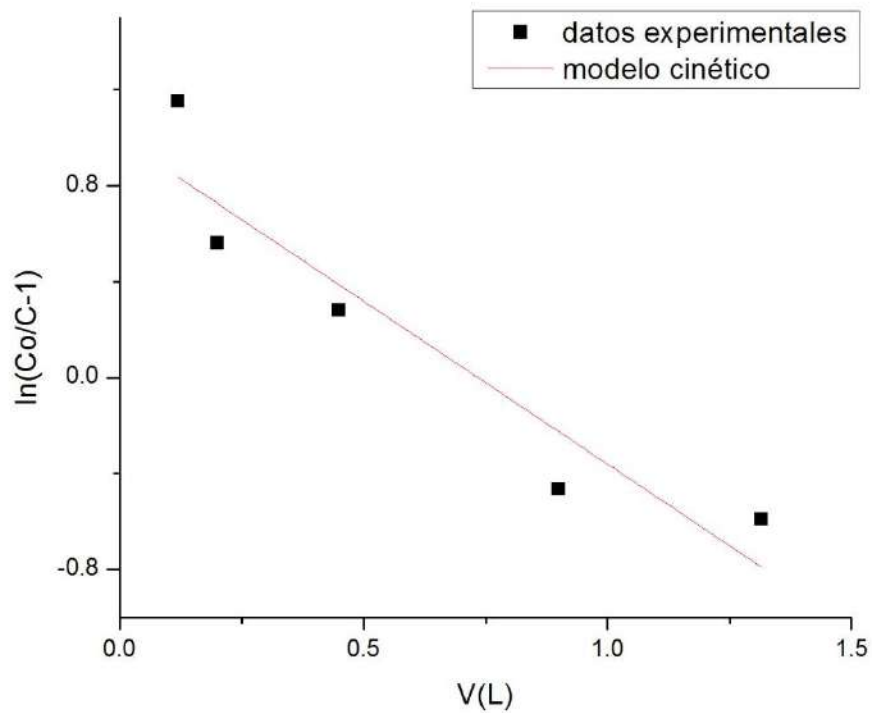


Figura 34. Modelo Cinético para dimensionamiento de la columna de adsorción-modelo Thomas. Los parámetros de operación $m_a = 79.44$ g, $Q = 5.0$ mL/min, $c_o = 0.2$ mg/L. Las constantes del modelo luego del ajuste $k = 0.7278$ mL/mg. min, $q_o = 0.0840$ mg/g

Tabla 9. Propiedades del Fluido en la línea de conducción hidráulica

Temperatura T (°C)	Viscosidad dinámica μ (kg/m.s)	Densidad del Fluido ρ (kg/m ³)	Peso específico del fluido γ (kg/m ² s ²) - 4100msnm
14.2	0.00116	999.17	9801.16
25.0	0.00089	997.05	9792.92

Tabla 10. Propiedades del material aremago en la columna de adsorción

Densidad de columna ρ_b (kg/m ³)	Porosidad ϵ	Tamaño de Tamizador N°20-18 (mm)
1216	0.244	0.841-1.000
Diámetro medio de la partícula d_v (mm)	Esfericidad ϕ	Diámetro esférico equivalente d_{sv} (mm)
0.9574	0.7362	0.7049

Entonces, la velocidad de filtración Q_h (cm/min) se elige a partir de un ensayo previo obtenido bajo condiciones de caudal Q (cm³/min) y altura manométrica requerida H (m) dadas, para una bomba hidráulica de lavadora (34 W, ~220V, 60Hz). Para el cálculo de la pérdida total de carga, se identifican aquellos componentes en el que se obtienen valores significativos de la variable a considerar: pérdida de carga por fricción a través del medio poroso y pérdida de carga por fricción a través de la red de admisión-expulsión de agua. Se elabora un esquema en el que se identifica los estados energéticos del fluido a la entrada y salida del sistema de tratamiento en términos de cabezal hidráulico (altura de columna de agua). El valor de la altura manométrica total es calculado a partir de la ecuación 28 y puede simplificarse como la suma de las pérdidas de carga hidráulica por fricción. Los resultados son mostrados en las siguientes tablas para el ensayo previo y para la condición elegida de operación.

$$H_{f-asp} + H_{f-col} = \Delta H_t$$

Tabla 11. Pérdida de carga hidráulica por fricción en el sistema admisión-expulsión con la ecuación Darcy-Weisbach (la primera fila corresponde al caso experimental)

Diámetro interno \varnothing (cm)	Caudal Volumétrico Q (cm³/min)	Velocidad de filtración Q_h (cm/min)	Número de Reynolds Re	Pérdida de carga hidráulica (mm)
1.27	200	157.88	291.0	5.370
1.27	195	153.93	283.9	5.499

Tabla 12. Pérdida de carga hidráulica por fricción a través medio poroso con la ecuación de Ergun (la primera fila corresponde al caso experimental)

Diámetro interno \varnothing (cm)	Velocidad de filtración Q_h (cm/min)	Altura de columna h (cm)	Caída de Presión Δp (Pa)	Número de Reynolds Re	Pérdida de carga hidráulica (m)
2pz-1"	15.307	40.00	14326.79	2.046	1.463
1pz-2"	9.621	94.67	21128.07	1.286	2.157
1pz-2 1/2"	6.157	60.59	8607.99	0.823	0.879
2pz-2"	4.810	47.34	5242.97	0.643	0.535
1pz-3"	4.276	42.08	4139.17	0.572	0.423

1pz-4"	2.405	23.67	1305.86	0.322	0.133
--------	-------	-------	---------	-------	-------

En las tablas se muestran los parámetros de operación para diferentes valores de sección transversal, tanto para el sistema de admisión-expulsión como para el sistema de red de filtros. La primera fila en ambas tablas corresponde al ensayo realizado en campo y se tomó como valor de referencia para el establecimiento de la velocidad superficial. La suma de términos de pérdida de cabezal hidráulico da como resultado la altura manométrica total. Los valores de altura manométrica total son calculados para valores diferentes de sección transversal de la red de filtros debido a su relevancia.

Tabla 13. Altura manométrica y selección de las dimensiones del filtro (La pieza elegida es resaltado en amarillo).

Diámetro interno \varnothing (cm)	Caudal Volumétrico Q (m³/s)	Altura de columna H (cm)	Altura manométrica total H (m)
2pz-1"	200.0	40.00	1.464
1pz-2"	195.0	94.67	2.158
1pz-2 1/2"	195.0	60.59	0.880
2pz-2"	195.0	47.34	0.536
1pz-3"	195.0	42.08	0.424
1pz-4"	195.0	23.67	0.134

De esta, se observa que un valor de carga de 1.463 m establece sobre el equipo un caudal de 200 mL/min, de manera que valores de velocidad superficial superiores podrían alterar el rendimiento del equipo a tal punto que no se pueda lograr el caudal requerido. Por otro lado, se podría elegir una red de filtros con una sección transversal considerablemente mayor pero complicaría la elección y disponibilidad de piezas en el mercado. La elección de un sistema formada por dos piezas $\varnothing=2"$ colocadas en paralelo establece una velocidad superficial $Q_h=4.810$ cm/min. Es un modelo conveniente puesto que la pequeña profundidad de la pieza

($H=47.34$ cm) permitirá anexar un sistema idéntico en serie con la primera. Esto representa una ventaja ya que garantiza un aumento de la carga absorbida por unidad de filtro, es decir se logra mayores valores de carga en la ruptura.

Se consideró necesario instalar en el sistema de conducción hidráulica un sistema de medición remoto a la salida de la red de filtros para monitorear la concentración de plomo del efluente luego del tratamiento. Este dispositivo es conveniente ya que determina in-situ los resultados de operación de forma inmediata para la toma de decisiones y sencilla detección de potenciales fallas. En la figura 36 se muestra el diseño de la celda y sistema de fluídica del equipo de medición. En el anexo del manuscrito se presenta el resto de componentes que conforman el sistema de medición: un amplificador para el sensor de medición, un módulo de relés, microcontrolador Arduino UE y un Modem GSM para la transmisión de datos.

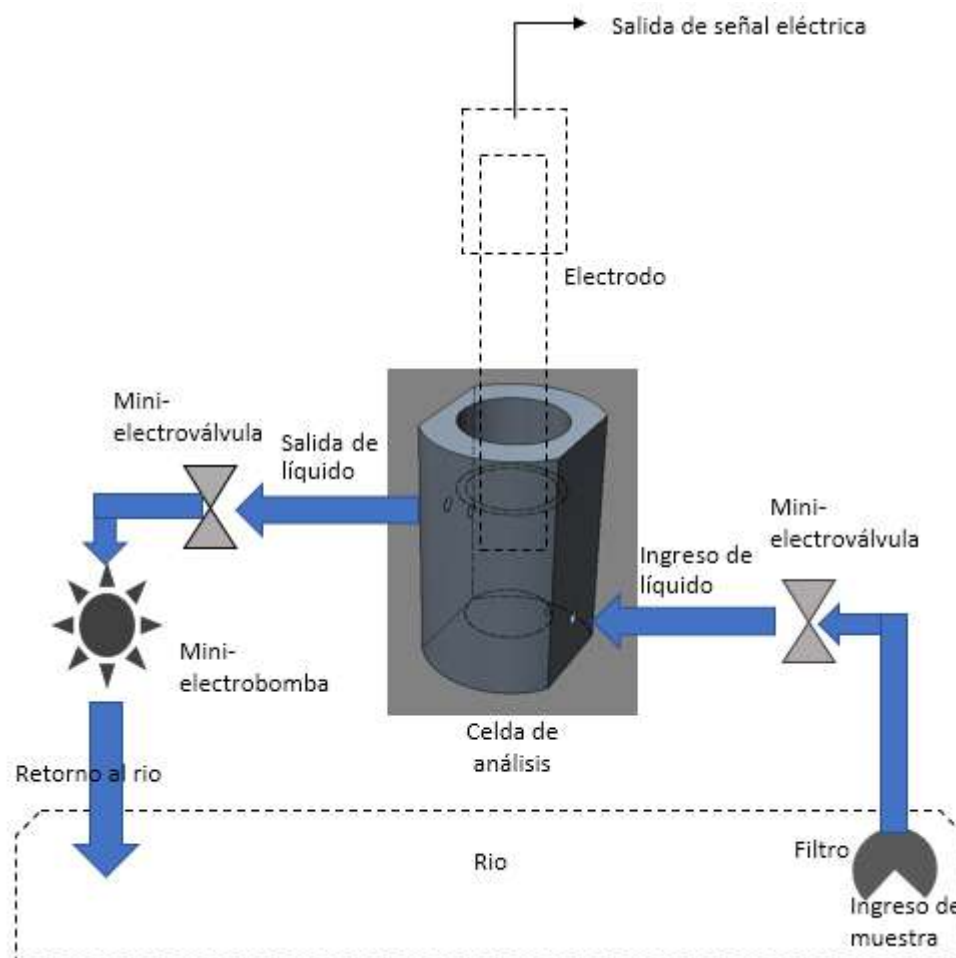


Figura 35. Esquema de fluídica asociado al electrodo para la medición de Pb^{2+}

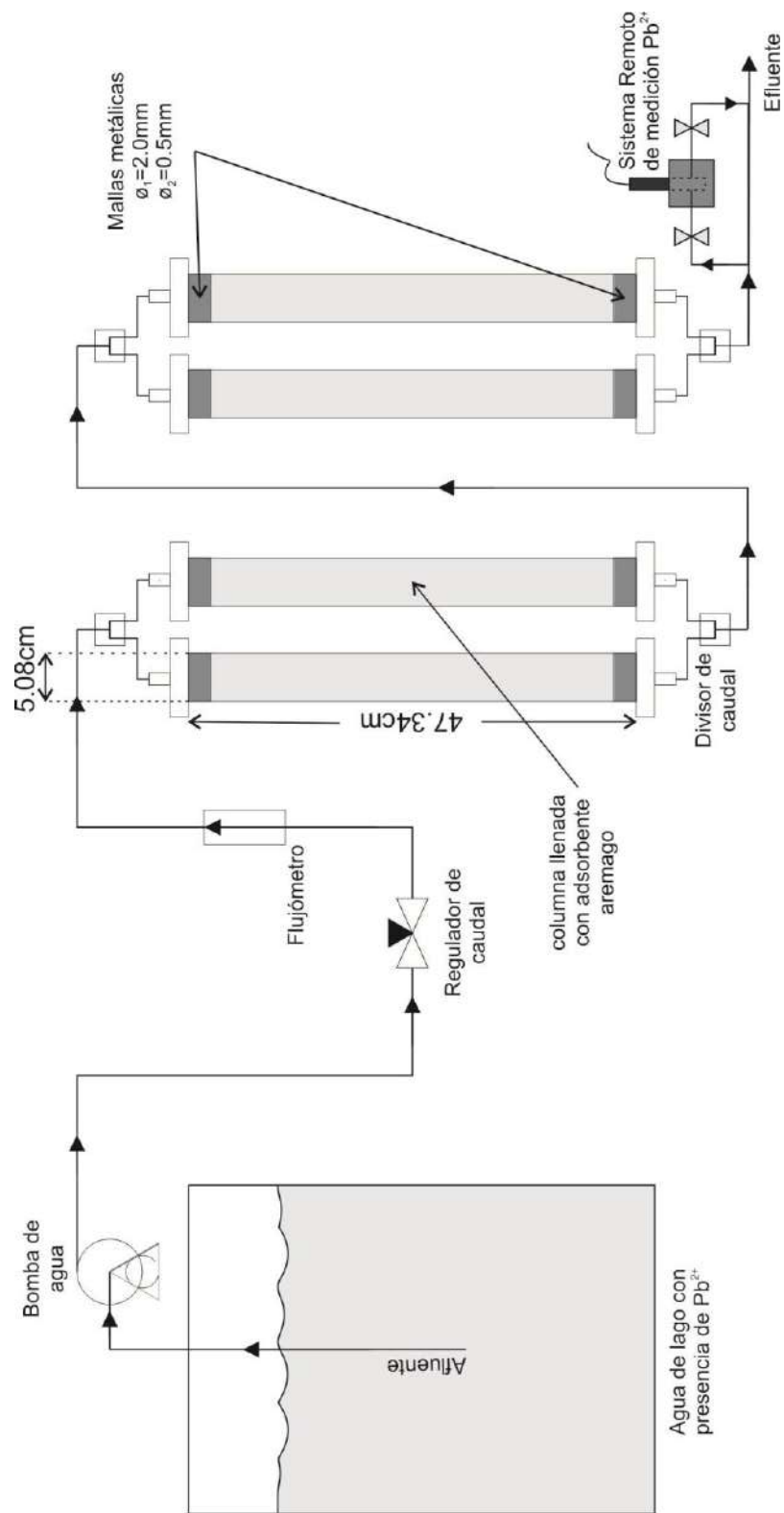


Figura 36. Esquema del sistema de tratamiento para remoción de iones Pb^{2+} que será montada sobre el prototipo boya descontaminadora

4.3. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico Autónomo

Ahora, con respecto al dimensionamiento del sistema autónomo, se reconoce todas las cargas responsables de un consumo energético la cual es principalmente la bomba requerida para generación del caudal. Para el presente trabajo, se considerará un trabajo con baterías ácidas de plomo y un generador fotovoltaico de homojuntura. Los componentes eléctricos y sus propiedades son listados en la siguiente tabla.

Tabla 14. Característica de los componentes del módulo fotovoltaico y condiciones de operación

Eficiencia carga/descarga de la Batería η_{bat}	Profundidad de descarga de la batería DOD	Número de días de autonomía de la batería	Eficiencia del inversor η_{inv}
85%	60%	1	95%
Potencia pico W_m módulo solar 1 kW/m², 25°C	Disponibilidad solar-en el peor mes Junio	Factor global de pérdidas del módulo solar η_{sf}	Tensión nominal de la instalación Fotovoltaica
40-150 W	5.62 kWh/m ² .dia	80%	12V

Considere la disponibilidad solar como la radiación media mensual sobre una superficie horizontal en la región Junín. Fuente de la tabla 15: (Camayo V. et al., 2017)

Tabla 15. Radiación solar diaria media mensual estimada mediante el modelo Bristow-Campbell en la región de Junín (Camayo V. et al., 2017)

	EN	FE	MA	AB	MA	JU	JUL	AG	SEP	OC	NO	DIC
$G_{m\beta}$ kWh/ m²	6.94	6.58	6.36	6.09	5.76	5.62	5.94	6.59	6.93	7.09	7.42	7.00

Se listan los aparatos y sus respectivos consumos energéticos. Para el cálculo de la energía total requerida es importante agrupar estos dispositivos eléctricos por tipo de señal de operación, esto es de señal continua o alterna, luego el término de demanda energética de cada grupo se verá afectado por las pérdidas de carga en la batería e inversor.

De esta manera se incluye los valores de eficiencia de estos últimos para los respectivos cálculos. También note que, en el cálculo de la energía total requerida se incluye los consumos del controlador de carga e inversor.

Tabla 16. Cálculo del consumo energético diario de los dispositivos eléctricos a bordo de la boya

N	Dispositivo Eléctrico	Potencia (W)	Horas de operación (h)	Consumo Energético (Wh/día)	Energía Requerida (Wh/día)
1	Bomba Hidráulica Askoll 220V	34	12	408	505.3
2	Ventilador refrigerante 220V	4.0	12	48.0	59.4
3	Relé Temporizado r YYC 12V	0.6	24	14.4	16.9
4	Sistema Remoto de Medición Pb²⁺	72	1/12	6.0	7.06
5	Controlador de carga MPPT 12V	0.3	24	7.2	8.47
6	Inversor Phoenix 12V/500VA	1.5	24	36.0	42.4

Energético Total Requerida(Wh/día)	639.0
------------------------------------	-------

Con el consumo requerido se siguen las ecuaciones de dimensionamiento para los componentes del sistema fotovoltaico autónomo. Para el caso del módulo solar se estimó el número de unidades requeridas en función de su potencia pico. Para nuestro caso, cuestiones tales como la fácil implementabilidad y espacio limitado sobre la embarcación justifican la elección de módulos solares de 150W.

$$N_T = \frac{639 \frac{Wh}{día}}{W_m \left(5.62 \frac{kWh}{m^2 día}\right) (0.80)}$$

$$N_T = \frac{\left(639 \frac{Wh}{día}\right) (1 día)}{C_N (0.60) (0.95)}$$

Tabla 17. Características requeridas para los componentes del sistema fotovoltaico autónomo a partir de la demanda energética para el prototipo boya descontaminadora

Módulo Solar	Batería	Inversor	Controlador
150W, 12V-1u	100Ah-2u (2 días)	Mínima Potencia nominal del inversor: 100W	Corriente máxima de controlador de carga solar MPPT: 20A
100W, 12V-2u	200Ah-1u (2 días)		
40W, 12V-4u	100 Ah-1u (1 día)		

A partir de los requerimientos determinados en la sección anterior, se escogen los modelos de los componentes del prototipo boya descontaminadora. Además, se especifican sus dimensiones y pesos debido a que serán importantes al considerar la geometría y dimensiones del sistema flotador. Líneas más abajo se presenta un esquema utilizado para representar el sistema fotovoltaico autónomo, en ella se reconocen todos los componentes eléctricos utilizados que hacen posible el funcionamiento correcto del prototipo.

Tabla 18. Componentes principales en el prototipo boya descontaminadora y estimación de las dimensiones de la embarcación

Sistema	Componente	Marca	Modelo	Peso (kg)	Dimensiones (mm) L/W/H
Hidráulico-Tratamiento	Filtros de adsorción en paralelo	---	---	3.0/pza.	500/150/70
	Bomba Hidráulica 34W	ASKOLL	M230 34W	0.30	150/135/100
	Sistema Remoto de medición Pb²⁺	---	---	4.0	200/200/200
Autónomo Fotovoltaico	Panel solar 150 W	YINGLI SOLAR	CZYL 36 Cell	7.8	1500/700/40
	Batería 12V100Ah	RITAR	RA12-200	30.0	328/172/222
	Inversor 12V500VA	VICTRON ENERGY	12/500	3.9	275/172/86

	Controlador de carga solar 20A	LDSOLAR TRACER DREAM	TD2207	0.7	195/123/46
Embarcación	Tablón-Soporte de piezas	---	---	14.2	900/900/35
	Cámara de neumático-flotación	KLEBER	AGRICOLA TR218A	3.5	380/75-20
	Cooler para cubículo eléctrico	COLEMAN	50 QUART XTREME® WHEELED	0.91	432/227/381

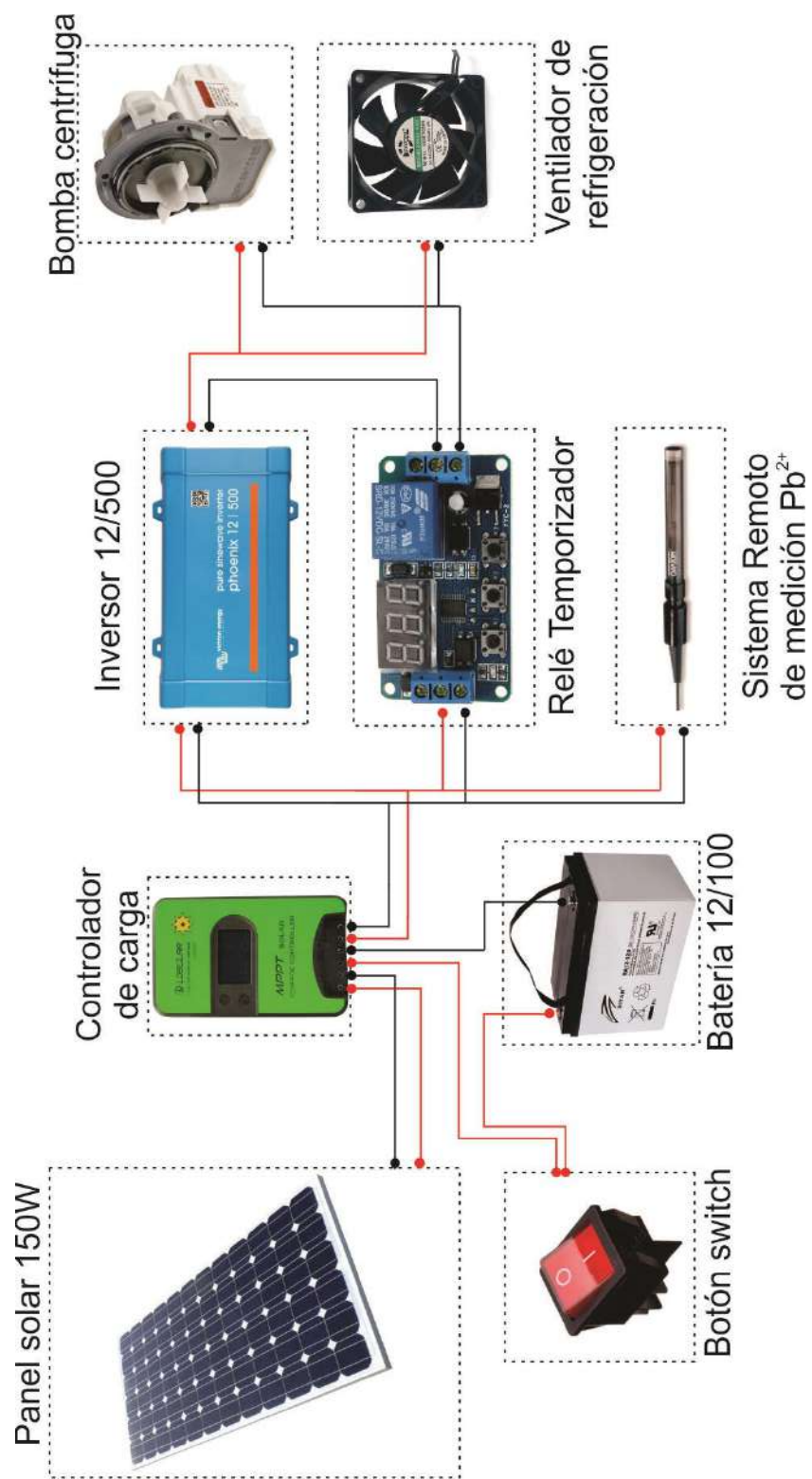


Figura 37. Esquema del sistema autónomo fotovoltaico. Los componentes eléctricos serán guardados en cubículos cerrados para protección de las condiciones ambientales

4.4. Implementación de Cubículos

Para un correcto funcionamiento, los componentes electrónicos tales como el controlador de carga solar, la batería, el inversor y el relé temporizador fueron colocados en cajas individuales las cuales proveen protección contra golpes debido a una mala maniobra durante su traslado. Además, a dichas cajas se les instaló terminales eléctricas varias las cuales, si se eligen convenientemente, permiten una fácil instalación y puesta en marcha del prototipo boya descontaminadora en campo. Se hizo uso de terminales eléctricos banana macho, fastón plano, fastón hembra, redondo, horquilla y adaptadores de enchufe. Los componentes serán agrupados en dos cubículos para su funcionamiento y son: el cubículo eléctrico e hidráulico. El primero será la cámara generadora de la señal alterna y contendrá: el controlador de carga solar, el cual recibirá energía del generador fotovoltaico; la batería como dispositivo de almacenamiento energético y el inversor de señal para cargas que operan con alimentación alterna. El cubículo hidráulico recibe la energía alterna del primero, será la cámara generadora de flujo de fluido y contendrá: la bomba hidráulica que operará de acuerdo a la altura manométrica en la línea de conducción y una ventiladora para refrigeración de la bomba la cual opera en señal alterna. Finalmente, estos cubículos aislarán a los dispositivos mencionados de las condiciones ambientales tales como la temperatura, el viento y la humedad.

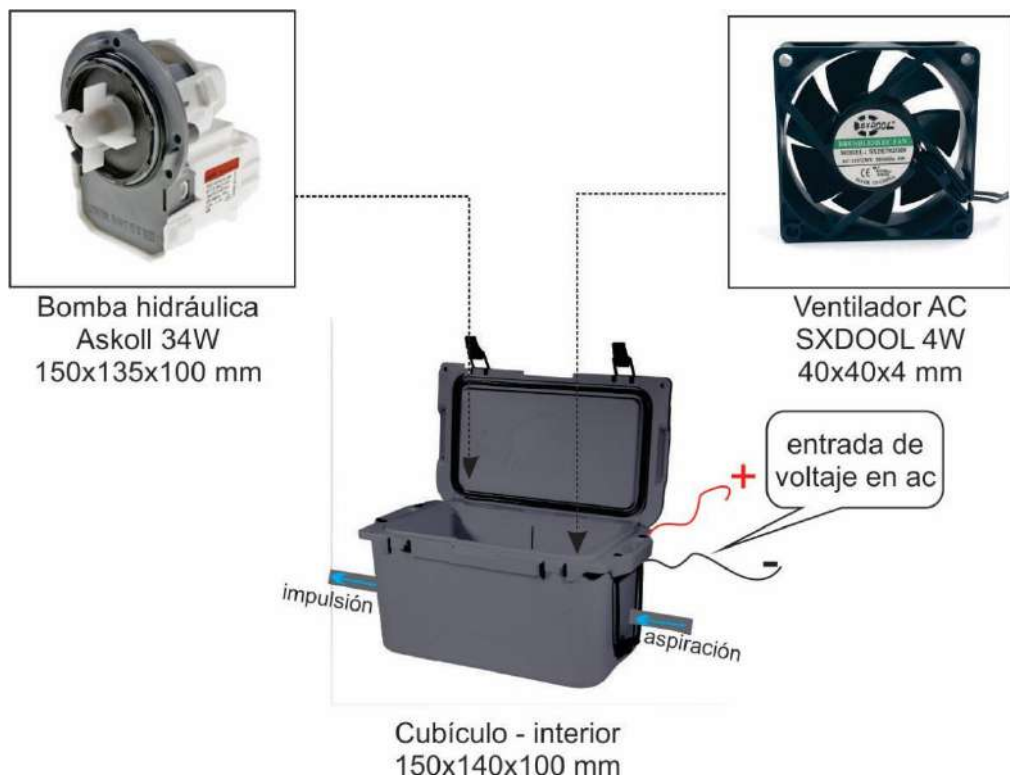


Figura 38. Componentes electrónicos colocados en el cubículo hidráulico. Sus dimensiones son elegidas de acuerdo al tamaño y posición del contenido.

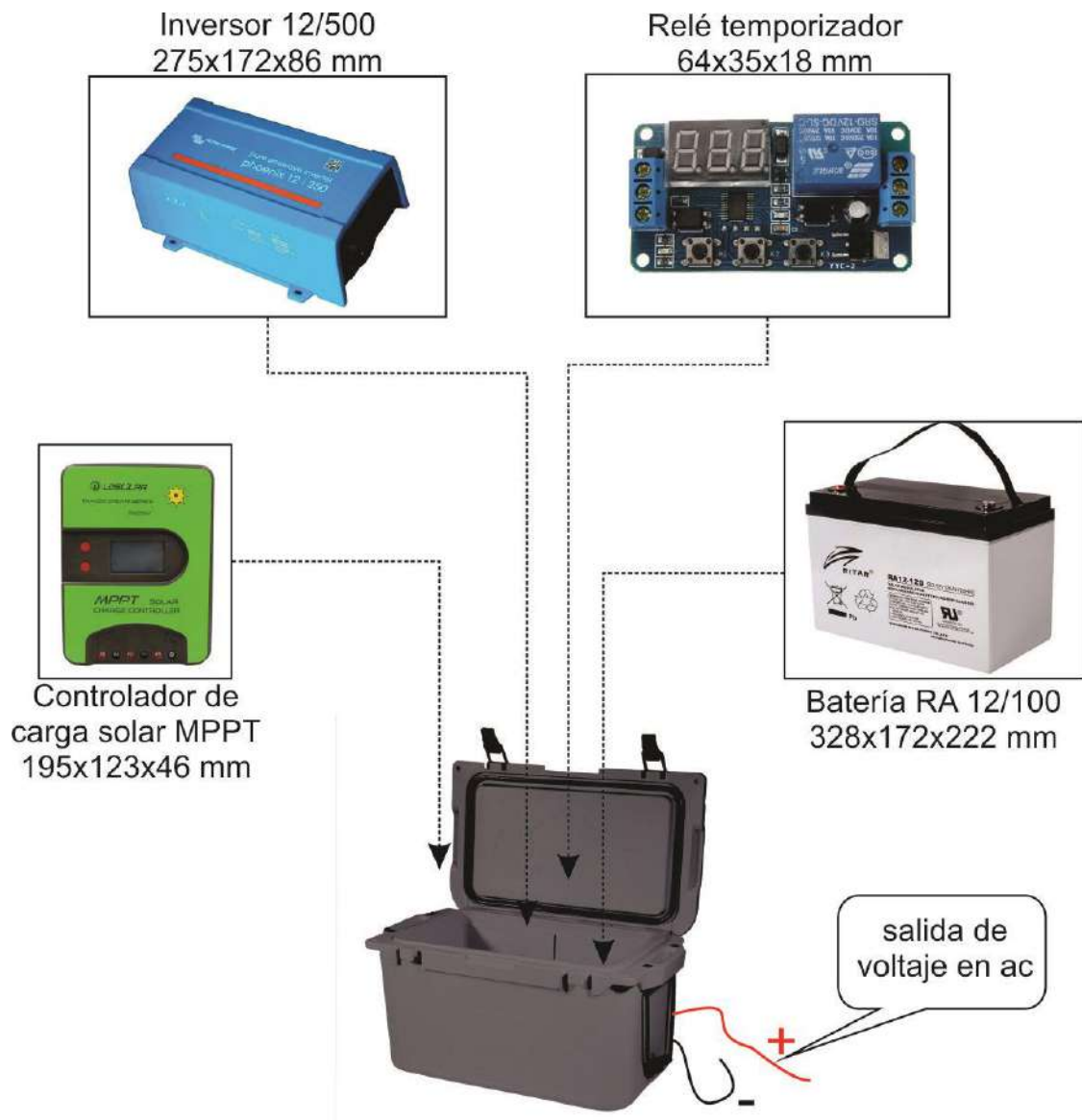


Figura 39. Componentes electrónicos colocados en el cubículo eléctrico. Sus dimensiones son elegidas de acuerdo al tamaño y posición del contenido. Se le denomina también cubículo de alimentación

4.5. Implementación del Sistema de Flotación

Para la elección de la cubierta de la embarcación, se tuvo en cuenta primero la masa total de todos los componentes del prototipo boya. De acuerdo a los elementos listados, esta alcanzará una masa neta de 78.8 kg e implica, por el principio de Arquímedes, que la cámara neumática de flotación deba presentar un volumen por encima de los 78.8 L mínimo requeridos (ecuación 38). En el mercado, las cámaras de llanta son catalogadas a partir de un código isométrico. Se trabajó con una cámara de llanta cuyas dimensiones medidas sugieren que pertenece a un neumático con el código **LT 380/75-20** (ancho de **380mm**, una altura de flanco de **238mm** y un diámetro de llanta de **508mm**). Luego, con las medidas registradas, la cámara fue diseñada en el software SOLIDWORKS como si fuese un toroide, una superficie generada por un círculo de diámetro $\varnothing=275\text{mm}$ distante al eje de revolución en 260mm. El volumen calculado total fue de 148.3L y le permite una capacidad máxima de 148.3kg en flotación. Dado el nivel de carga, se dice que la embarcación está con el 53% de su capacidad nominal ocupada, la cual es aceptable.

El análisis de la estabilidad de la embarcación utilizó dos tipos de procedimiento, el primero fue un ensayo de flotabilidad en una piscina en el que, ya colocada la cámara de flotación y su soporte, se le añadieron cuerpos similares en peso y forma a los componentes electrónicos e hidráulicos. Por otro lado también se hizo uso de un software de simulación para un análisis más riguroso de la estabilidad de la embarcación bajo condición intacta de flotación. En el ensayo experimental la primera prueba (figura 41a) consistió únicamente de la cámara neumática sobre la cual se depositó encima un objeto de 70 kg como indica la imagen. Se observa una estabilidad negativa ya que la adición de carga genera que el centro de gravedad del sistema ascienda sobre la vertical de la embarcación en posición recta y, por lo tanto, una altura metacéntrica menor. En esta prueba se observó una tendencia evidente del sistema a la volcadura, donde el cuerpo continúa moviéndose en el sentido de la acción externa ya retirada (equilibrio inestable).

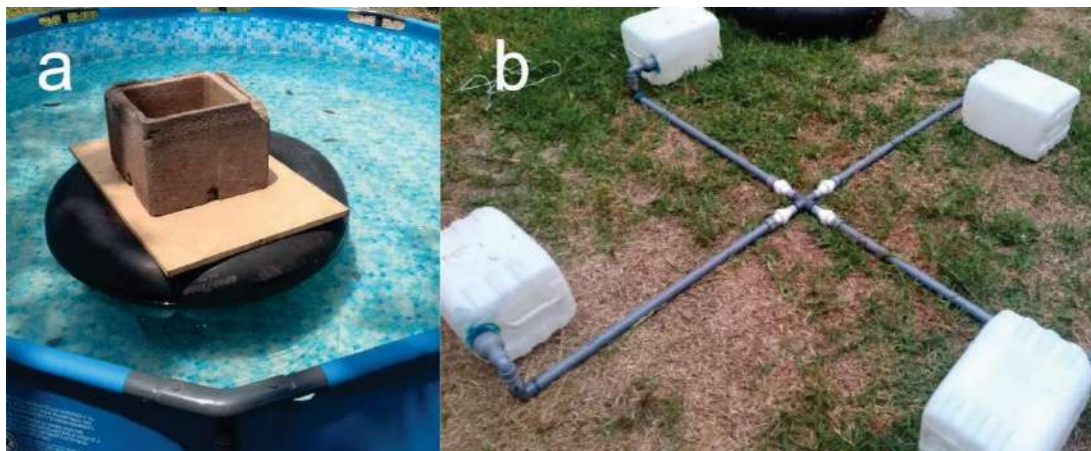


Figura 40. (a) 1^{er} Ensayo de flotabilidad del prototipo boya descontaminadora. (b) Pieza estabilizadora

La condición de equilibrio inestable empeora debido a una mala distribución de cargas a bordo, este hecho queda expuesto a partir de los siguientes resultados. Se utilizó el software MAXSURF MODELLER AND STABILITY para el análisis de la estabilidad intacta. El primer caso en el que las cargas están distribuidas uniformemente en el plano transversal y longitudinal del prototipo, así, se establece el centro de gravedad sobre la vertical de la

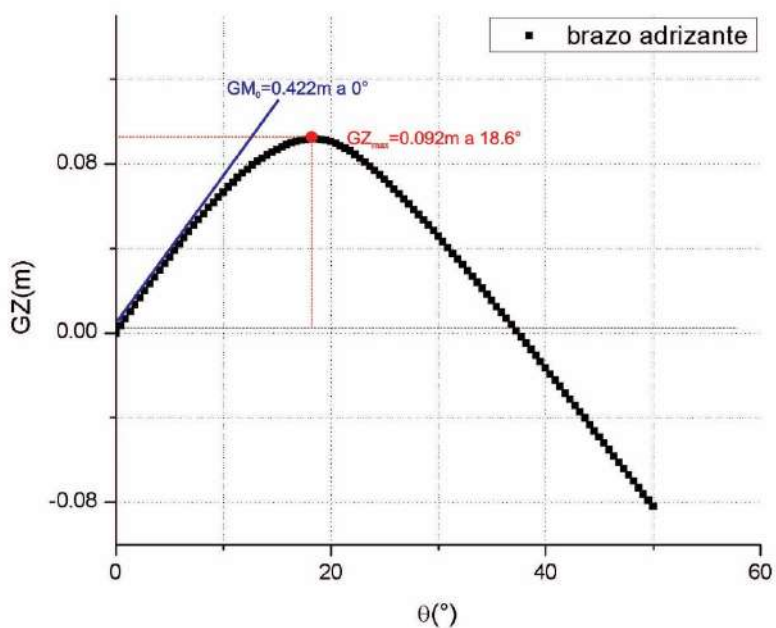


Figura 41. Brazo Adrizante generado a diferentes ángulos de escora del prototipo.

embarcación en posición recta. Si consideramos el peso total del prototipo en 78.8kg, se determina un centro de masa de $x_G=0$ mm, $y_G=0$ mm, $z_G=445.6$ mm con el origen de coordenadas tomada desde la base del prototipo.

La curva de estabilidad muestra características las cuales sugieren condiciones negativas de navegación debido a que no satisface los criterios de diseño establecidos por la Organización Marítima internacional (IMO, 1995), aplicable a todo tipo de embarcación en general. El único criterio que aprueba es con respecto a la altura metacéntrica inicial el cual requiere un valor de 0.150m y la sobrepasa en 180%. Por otro lado, se repetimos el ensayo (caso 2) pero esta vez con el centro de gravedad ligeramente desviado de la línea vertical, esto es, $x_G=-8.7$ mm, $y_G=28.9$ mm, $z_G=445.6$ mm la condición de flotación empeora. No solo no satisface los criterios de estabilidad sino que duplica el margen de la desviación. Este hecho se menciona porque sobre la boya, durante la implementación, puede resultar complicado alinear todas las cargas de forma simétrica tal que se obtenga un centro de gravedad sobre la vertical de la embarcación de modo que es probable obtener desviaciones del orden de 1-2cm.

Los resultados experimentales y de simulación sugieren considerar mecanismos que otorguen estabilidad a la embarcación. Por lo expuesto, se tiene un margen de maniobra limitado con respecto al reacomodo de cargas e incluso podría resultar perjudicial, de modo que no es factible lograr el objetivo reubicando el centro de masa. Se optó por hacer cambios a la geometría de la embarcación. Decidimos colocar una pieza, a la cual denominaremos pieza estabilizadora, para que refuerce la magnitud del momento adrizante. Este sistema estabilizador es básicamente una pieza en forma de cruz (figura 41b) ensamblado a partir de tubos y conectores PVC con galoneras de 20 litros colocadas sobre cada uno de sus cuatro extremos. Es así que se construye la pieza estabilizadora para el segundo ensayo de flotabilidad.

La figura 43a muestra el ensamblado de la pieza a la cámara neumática de flotación con ayuda de sogas de manera que se obtenga un sistema compacto, en otras palabras, que funcione como una sola pieza. En la figura 43b, con el ensayo de flotabilidad en marcha, se adiciona todas las cargas (cajas llenas de rocas) que el prototipo llevara a bordo, similares en forma y peso. Se alcanza nuevamente 65 kg de carga sobre la embarcación y se observa mejores condiciones de navegación. En general, debido a una acción externa, cada brazo de apoyo puede entregar hasta 200N.m adicionales de momento restaurador suficientes para evitar una condición de equilibrio inestable o la volcadura (adicionales a los 74N.m de momento generado en el máximo ángulo de escora). De esta forma, los brazos de apoyo de la pieza garantizarán el equilibrio entre los momentos que tienden a escorar el prototipo y el que tiende a adrizarlo.

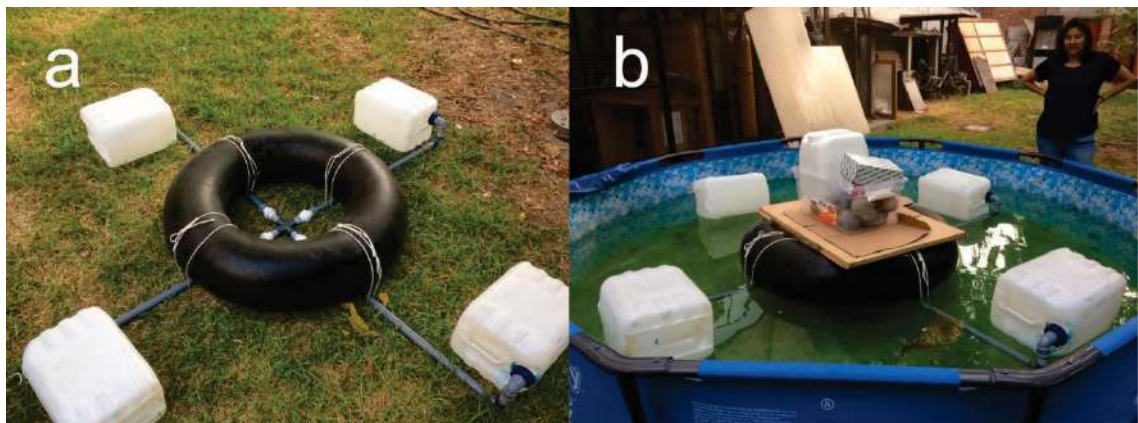


Figura 42. 2^{do} Ensayo de Flotabilidad del prototipo boya descontaminadora

4.6. Construcción y Puesta en Marcha de la Boya

Con el diseño final del sistema descontaminador, esto es, una vez obtenido su geometría y la dimensión de todos sus componentes para su correcto funcionamiento, sigue el prototipado del equipo.

- Figura 44(a). La construcción fue realizada con materiales disponibles pero efectivos, sobre todo para el caso de la pieza de flotación. En la figura se observa sus componentes que son: la cámara neumática, el soporte de la embarcación y la pieza de apoyo.

- Figura 44(b). La pieza de apoyo para flotación es armada a la orilla del lago, en ella los brazos de apoyo están conformadas por galoneras de 20 litros y fueron ensambladas con una pieza cruz.
- Figura 44(c). Una vez terminada la pieza de apoyo, se montó la cámara neumática y el soporte en ese orden. Las tres piezas fueron compactadas y fijadas con el uso de una soga. Se colocan también el cubículo eléctrico e hidráulico (con los dispositivos dentro) sobre la base del soporte.
- Figura 44(d). Una vez instalado el sistema eléctrico y verificado el funcionamiento de todos los dispositivos, en especial el de la bomba hidráulica, se instala el panel solar al final del proceso con el cubículo eléctrico cerrado.

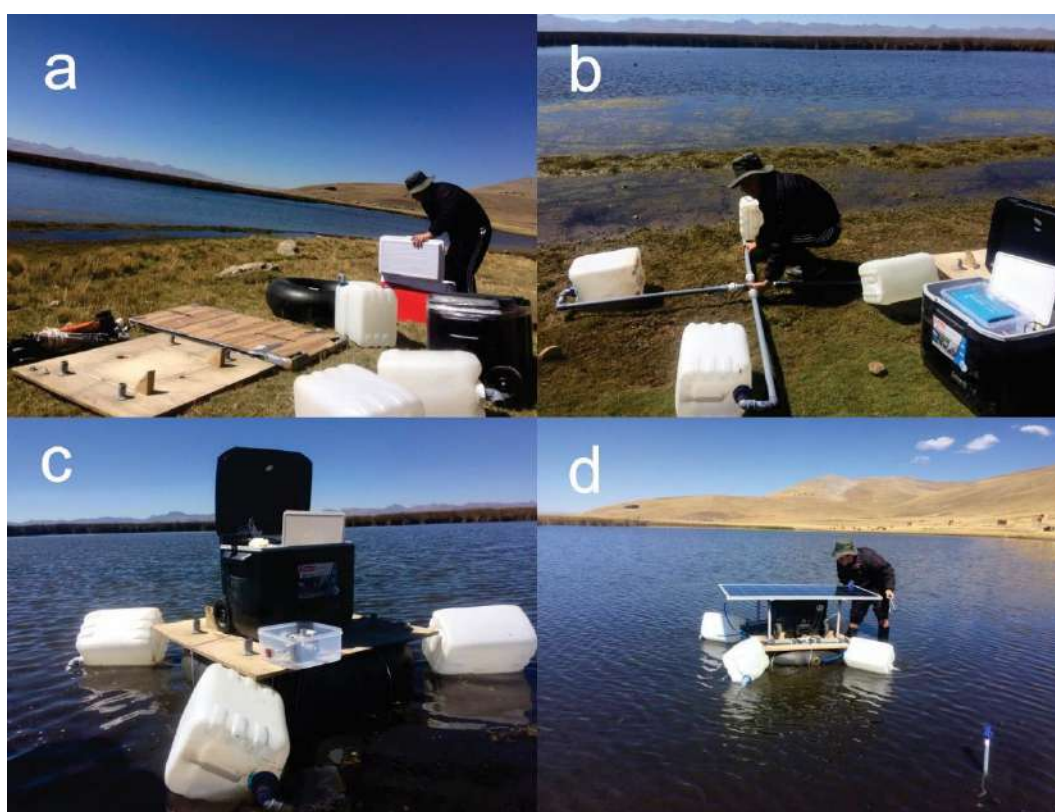


Figura 43. Pasos para la implementación de la boya descontaminadora en campo. Lago Chinchaycocha. Captura: Mayo 2019



Figura 44. Vista anterior. Prototipo boya descontaminadora implementada y en operación. Lago Chinchaycocha. Captura: Mayo 2019



Figura 45. Vista posterior. Prototipo boya descontaminadora implementada y en operación. Lago Chinchaycocha. Captura: Mayo 2019

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

5.1. Ensayo de Columna con el Adsorbente

Si bien es cierto que el sistema fue construido basada en las condiciones de campo, existen mejoras que pueden realizarse. Estas mejoras son planteadas a partir de los resultados obtenidos para el primer diseño. Considere que los cambios son realizados para lograr la mejora de los parámetros de éxito: eficaz, accesible y eficiente.

La primera cuestión es con respecto a la adsorción de especies de Pb^{2+} bajo condiciones de campo. Para la puesta en marcha del equipo, a pesar de los valores de tiempo de contacto sugeridos en la literatura (~5min) se eligió trabajar con un valor considerablemente mayor, esto es 13.07min, por dos motivos; la primera, a partir de los estudios previos de monitoreo realizados por la Autoridad Nacional del Agua(2013-2016), se tenía conocimiento de la presencia no solo de iones plomo, sino también de especies como Arsénico, Cobre, Mercurio, y Zinc las cuales se encontraban en cantidades significativas y superaban los estándares de calidad ambiental en muchos puntos del lago en determinados meses del año. La segunda, teníamos entendido que los niveles de concentración de iones plomo en el lago eran relativamente bajos y representaba un inconveniente para las lecturas en el equipo de medición cuyo nivel de detección ~0.010ppm no era el adecuado. De esta forma, decidimos añadirle cierta cantidad de nitrato de plomo para concentrar el nivel de soluto en la matriz.

Entonces, nos encontrábamos ante un escenario en el que nuestro adsorbente se satura de forma anticipada por la presencia de otros iones y estuvo sometida a un flujo con un nivel alto de iones de plomo. Para contrarrestar este desplazamiento hacia la izquierda de la curva de saturación decidimos manejar un caudal de flujo muy pequeño e implica a su vez, trabajar con un tiempo de contacto considerablemente grande, así, se eligió un valor $t_{bct}=13\text{min}$.

Se obtuvo la curva de ruptura en el primer ensayo y los resultados indican que se eligió un tiempo de contacto conveniente debido a que se logró obtener un poco más del 70% del perfil de la curva de ruptura, sin embargo un volumen pequeño de agua tratada antes de la saturación indica una operación frustrada de adsorción. Para una mejor descripción de la operación, la tendencia de los puntos experimentales fue ajustada a partir de modelos experimentales. Los resultados indican que dos de cuatro modelos describen el comportamiento con un alto grado de precisión; el modelo de Thomas ($X^2=0.8726$) y el modelo Dosis-Respuesta ($X^2=0.9611$). El hecho que el modelo Thomas describa los puntos experimentales con un alto grado de exactitud se debe a que la tendencia cumple las consideraciones del modelo, esto es, que el proceso de adsorción esté controlada principalmente por una reacción superficial entre el adsorbato y la superficie no ocupada en el adsorbente y la no presencia de la dispersión axial del fenómeno. Este hecho sugiere que la adsorción principalmente se da por la presencia de óxido de grafeno superficial debido a que la naturaleza de atracción entre ambas especies es de tipo quimisorción, formándose enlaces entre el ión plomo y el grafeno.

Se utiliza el modelo experimental de Thomas para la descripción de la tendencia sobre todo el intervalo de operación y se obtienen los valores mostrados en la tabla. De estos parámetros de rendimiento se obtiene un valor de carga estequiométrica de 0.107mg/g frente a una carga de total de 0.339mg/g hasta el punto de saturación, la cual nos dice que no todo el área superficial del adsorbente se encuentra disponible para los iones Pb^{2+} en el que más de las dos tercios del área superficial del Aremago no utilizados se debe a las propiedades fisicoquímicas de la matriz pero, principalmente se debe a la presencia de otras especies en la solución implicando de esta forma una eficiencia general del 31.7%. Por otro lado se obtiene

un valor carga en la ruptura de 0.011mg/g bajo una fracción de remoción de 0.3 el cual, si es comparado con la carga estequiométrica, se obtiene que el filtro presenta una saturación muy anticipada e implica una afinidad cuestionable, esto es, el nivel de carga del filtro hasta su desuso alcanza una eficiencia 9.96%. No se logró calcular la longitud de la zona de transferencia másica debido a que su valor se calcula conociendo el nivel de carga en la ruptura a una fracción de remoción del 0.05, su longitud es evidentemente mayor a los 10cm del filtro. Finalmente se determina un pequeño volumen de agua tratada en la ruptura de 1.15 L por kilogramo de adsorbente a una fracción de remoción de 0.3 mientras que en la saturación, con una fracción de remoción de 0.95, se obtiene que son necesarias 27.0 g de adsorbente Aremago por litro de agua que pasa por el filtro en total.

5.2. Análisis Comparativos de Rendimientos

De los resultados encontrados claramente la adsorción es comprometida por la presencia de otras especies en la matriz del lago Chinchaycocha. Para determinar en qué medida es afectado el rendimiento de operación por las propiedades de la mencionada matriz se decide

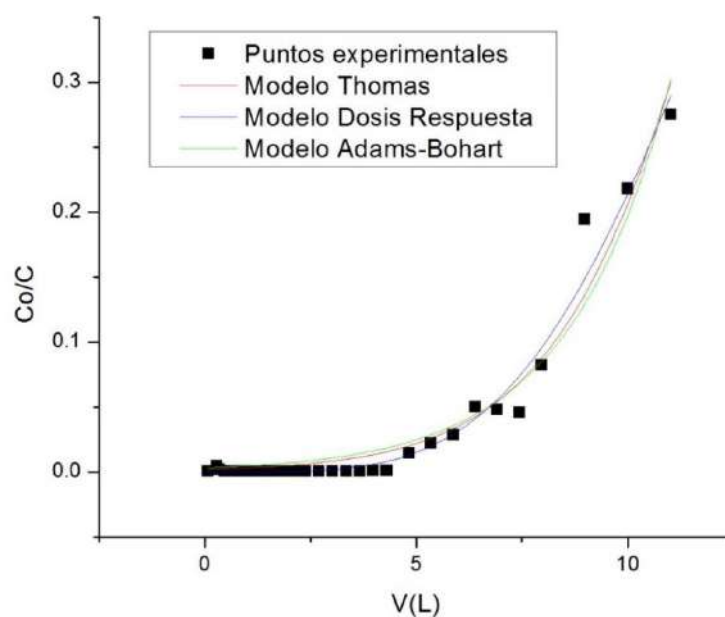


Figura 46. Curva de ruptura de la adsorción de especies Pb^{2+} de agua sintética a base de filtros de Aremago. $Q=15\text{mL/min}$, $C_0=20.55\text{ppm}$, $m_a= 79.44$ g. Condiciones ambientales $T=25^\circ\text{C}$, $P=1$ atm, $\text{pH}=6.5$

realizar ensayos bajo condiciones controladas en laboratorio, las instrucciones de implementación se encuentran en el procedimiento experimental. Los resultados de este ensayo se podrán utilizar, eventualmente, como referencia a futuros ensayos ya que representa el mayor rendimiento logrado por el material sintetizado. De esta forma se determinará el nivel de remoción bajo condiciones ideales de operación y todas las demás disminuciones en la eficiencia únicamente se deberán a la propia afinidad del adsorbente hacia el ión Pb^{2+} .

Tabla 19. Modelo Empíricos para el ajuste de la curva de ruptura. Condiciones de operación $Q=15$ mL/min, $C_o=20.55$ ppm, $m_a=79.44$ g. Condiciones ambientales $T=25^\circ C$, $P=1$ atm, $pH=6.5$

Modelo	Constante	Valor	Chi-Cuadrado (R^2)
Adams-Bohart	k_{ab} (mL/mg. min)	0.3044	0.9458
	N_o (mg/L)	4366.0	
Thomas	k_{th} (mL/mg. min)	0.3584	0.9587
	q_o (mg/g)	3.2944	
Yoon-Nelson	K_{yn} (min^{-1})	0.0074	0.9587
	τ_{yn} (min)	849.02	
Dosis Respuesta	q_o (mg/g)	3.5436	0.9741
	a (adimensional)	0.7100	

Si bien es cierto que cualquiera de los modelos ajusta los puntos experimentales aceptablemente, se utiliza el modelo experimental de Thomas ($X^2=0.9587$) para describir la tendencia de la curva de ruptura para el caso controlado, esto es, análogo al caso de la matriz del lago. Los valores son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 20. Comparación de los parámetros de rendimiento de un cartucho de Aremago bajo dos tipos de matriz; una recogida del lago y otra sintética conformada solo por agua destilada

Parámetro de Rendimiento	Matriz del lago	Matriz sintética
Carga total q_t	0.34 mg/g	4.92mg/g
Carga de Equilibrio q_o	0.11mg/g	3.27mg/g
Eficiencia η_1	31.7%	66.6%
Carga de ruptura $q_b\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	0mg/g	1.68mg/g
Eficiencia η_2 $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	0%	51.40%
Carga de ruptura $q_b\left(\frac{c}{c_o}\right)_{30\%}$	0.01mg/g	2.85mg/g
Eficiencia η_2 $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{30\%}$	9.93%	86.98%
Zona transferencia másica MTZ $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5-95\%}$	>10.0 cm	4.86 cm
Volúmenes de cama en ruptura NBV $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{5\%}$	0 L/kg	81.82 L/kg
Volúmenes de cama en ruptura NBV $\left(\frac{c}{c_o}\right)_{30\%}$	1.39 L/kg	138.47 L/kg
Tasa de agotamiento de adsorbente	0.027 kg/L	0.004 kg/L

Se obtiene el rendimiento bajo condiciones ideales de operación, y se observa una notable mejora. Por ejemplo, determinamos que la eficiencia de carga total se duplica del 31.7% al 66.6% lo que sugiere que la fracción no ocupada por los iones Pb^{2+} en el caso de la muestra real es afectada por la presencia de otras especies en solución lo que reduce casi a su tercera parte de la capacidad superficial activa. Entre las especies más recurrentes dados a conocer

por los trabajos de monitoreo realizados en el lago (AAA-X Mantaro & ANA, 2016; ANA, 2014; García Aragón et al., 2015) se detectaron especies como As^{3+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} (además de Pb^{2+}) en cantidades apreciables y estarían interfiriendo en el proceso de remoción estudiado. Además se sugiere que la presencia del carbono orgánico disuelto en estas aguas superficiales podrían estar afectando la capacidad de adsorción del óxido de grafeno (Worch, 2012). Los estudios de monitoreo no miden este último parámetro de calidad del agua.

Con respecto a las cargas de ruptura bajo una fracción de remoción de 0.05, se observa que el nivel de carga de la columna hasta su desuso mejora de una situación de inutilidad completa a una eficiencia del 51.40%. Note que esta variable de rendimiento es referencial y útil en el sentido comparativo, ya que dicho valor puede aumentar añadiendo por ejemplo mayor masa de adsorbente al filtro. Luego, con respecto a la carga de ruptura bajo una fracción de remoción de 0.3 se obtiene una mejora considerable puesto que la capacidad de remoción del filtro se vuelve hasta nueve veces mayor, esto es, de una eficiencia del 9.93% al 86.98% de forma que será mayor la cantidad de iones Pb^{2+} removidos hasta la ruptura y presentes sobre la fase sólida. Luego, la zona de transferencia másica fue determinada en todo su perfil lo que indica buenas condiciones para el proceso de adsorción de plomo.

Este análisis corresponde a la carga de soluto y se puede realizar un análisis similar pero en términos de volumen de agua de modo que se introduce los últimos dos parámetros de rendimiento que se muestran en la tabla. El primero que se refiere al volumen de agua tratado hasta una fracción de remoción establecida, marca una diferencia significativa de la condición de campo a la condición controlada. Por ejemplo para el caso de una ruptura en 0.3 el volumen de agua tratada pasa de 1.39 a 138.47 Litros por kilogramo de adsorbente. Finalmente, si nos interesa considerar el volumen tratado bajo condiciones de saturación, encontraremos que ya no serán necesarios 27 g de adsorbente por cada litro de agua que pase a través del filtro, si no únicamente 4 g de la misma.

Ahora, solo para fines comparativos se calcula la cantidad necesaria de adsorbente Aremago para los parámetros de operación escalados y analizados en el presente trabajo, solo que en

esta oportunidad se incluirá las condiciones de campo y controladas. Se hace presente que para el escalamiento se procedió de la misma forma al método empleada para escalar los parámetros obtenidos en campo, esto es, el método cinético de escalamiento.

Tabla 21 Masa requerida tras el dimensionamiento del sistema descontaminador en función de la fracción de remoción de acuerdo al método cinético tanto a condiciones de campo como a condiciones controladas o de laboratorio (el caso simulado es resaltado en amarillo)

Concentración final (ppm)	Fracción de remoción (%)	Masa de adsorbente requerida-matriz real (g)	Masa de adsorbente requerida-matriz sintética (g)
0.10	50.0	2333.33	59.50
0.08	40.0	3626.63	126.50
0.06	30.0	5035.92	199.43
0.05	25.0	5837.52	240.94
0.04	20.0	6755.13	288.45
0.02	10.0	9341.71	422.38
0.01	5.0	11725.07	545.78
0.005	2.5	14018.82	664.55

Es oportuno mencionar que el análisis está enfocado a la remoción de iones plomo y formas como este proceso puede llegar a optimizarse. De la tabla, considerando las mismas variables de operación escalada bajo condiciones controladas, se determina que a una fracción de remoción del 50% la masa necesaria para el caso de la matriz sintética es de tan solo 59.50 g de adsorbente Aremago, esto es, unos 39 veces menor que la cantidad requerida para el caso de la matriz real, de forma que, si se llegase proveer de las condiciones óptimas de operación, considerar el adsorbente en un proceso determinado potencialmente implicaría reducciones notables sobre el costo de inversión, en materia prima principalmente..

De esta forma se identifica un proceso de adsorción parcialmente afectada por las condiciones fisicoquímicas de la matriz real, principalmente debido a la presencia del carbono

orgánico disuelto y otras especies inorgánicas en solución. Si se desea mejorar la capacidad de retención únicamente de iones Pb^{2+} , se sugiere eliminar la turbiedad así como las especies mencionadas, con el uso de arena y carbón activado ya que demostraron ser selectivas a la hora de remover compuestos orgánicos y algunos inorgánicos.

5.3. Factores para el Diseño de la Red Hidráulica

Como se mencionó anteriormente, se elaboró un esquema en el que se identifica los estados energéticos del fluido a la entrada y salida del sistema de tratamiento en términos de cabezal hidráulico (altura de columna de agua) la cual se simplifica como la suma de pérdidas de carga por fricción. Entonces de acuerdo a los resultados obtenidos, se determina que el componente más importante para el cálculo de la altura manométrica del sistema de bombeo corresponde a las pérdidas de carga por fricción en el medio poroso. El otro componente resulta ser despreciable debido a que se manejan flujos de fluido de régimen de laminar, esto es, a una velocidad lineal tan baja que resulta en una pérdida de carga por fricción a través de la línea de conducción casi nula. Este hecho pone en relevancia las propiedades del medio poroso y del fluido circulante, es decir, aquellas propiedades del adsorbente en la columna tales como su porosidad, diámetro de partícula y propiedades del fluido circulante tales como su densidad y viscosidad lineal sin mencionar que el caudal de fluido es un factor adicional a tener en cuenta. En este caso nos centraremos en el diámetro de partícula puesto que la manufactura del Aremago encuentra su justificación, parcialmente, a partir de unos resultados de pérdida de carga en la línea de conducción.

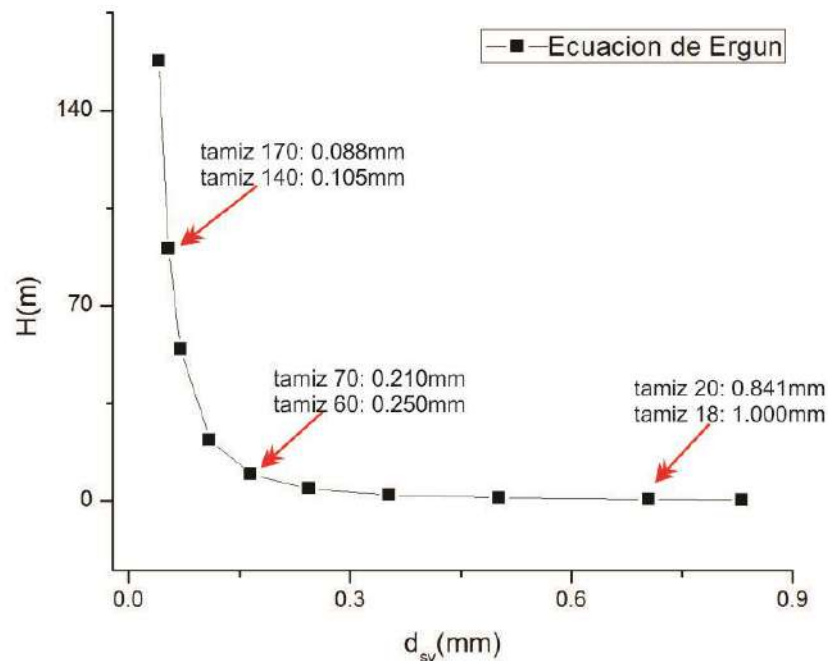


Figura 47. Tendencia de la pérdida de carga hidráulica en la columna de adsorción con respecto al diámetro esférico equivalente del adsorbente. Condiciones de operación $Q_h=4.81\text{cm/min}$, $h=47.33\text{cm}$, $\varepsilon=0.244$, $\mu(14.2^\circ\text{C})=0.00116\text{kg/ms}$, $\rho(14.2^\circ\text{C})=999.17\text{g/cm}^3$.

Como se puede observar de la figura, el diámetro de partícula tiene un rol importante en el diseño del prototipo y paso a explicar. Las dimensiones del prototipo van establecer límites al tamaño del generador fotovoltaico y su capacidad, motivo por el cual la potencia cubierta por el panel solar para el tiempo de operación establecido tendrá una cota superior en términos energéticos. Esta potencia disponible demarca un grupo de bombas hidráulicas las cuales en términos de altura manométrica cubierta resulta ser pequeña, esto es, por lo general se encontrarán un cabezal hidráulico en el rango de 2 a 3m de capacidad. Esto implica la necesidad de controlar la caída de presión a lo largo de la línea de conducción, más específicamente, a través del material poroso. Entonces no conviene manejar diámetros de partícula muy pequeños puesto que la caída de presión sería significativa y la bomba hidráulica no podría sostenerla. El adsorbente Aremago fue obtenido a partir de un tamizado con mallas Nro20-18 e implica una pérdida de carga de 0.535m, una altura conveniente para

la operación de nuestra bomba centrífuga, además, nos da un margen para anexar un sistema adicional de filtros en serie sin ningún tipo de inconveniente. Pero si consideramos un adsorbente tamizado con mallas Nro50-45 o con mallas Nro70-60 las pérdidas de carga hidráulica se van volviendo significativas. Por ejemplo para el primer grupo de mallas se obtiene 4,44m de cabezal hidráulico perdido mientras que para el segundo grupo de mallas se obtiene 9.62m, estos niveles de carga hidráulica comprometerán el rendimiento de la bomba y resultará en niveles de caudal hidráulico generado despreciables. Si se trabajase con adsorbente tamizado con mallas Nro170-140 se espera cubrir una altura manométrica de 90.38m y no sería posible instalar una bomba hidráulica que, con la capacidad limitada, opere bajo tales condiciones.

Este último hace referencia a un material desarrollado previamente en laboratorio y que se pretendía anexarlo a la boya descontaminadora. Aunque posible, su implementación presentaba cuestiones de dimensionamiento con inconvenientes importantes. Un método alternativo para reducir la caída de presión a lo largo de un material poroso es controlando la velocidad de filtración a través de la misma como la ecuación de Ergun lo indica. Esto se logra aumentando la sección transversal del filtro hasta lograr una carga hidráulica que pueda ser sostenida por la bomba a disposición.


Tabla 22. Variación de la carga hidráulica para diferentes valores de sección transversal de la columna de adsorción para un adsorbente tamizado con mallas Nro170-140. Condiciones de operación $Q=195\text{mL}/\text{min}$, $m_a= 2333.33\text{g}$, $\varepsilon=0.244$, $\mu (14.2^\circ\text{C})=0.00116\text{kg}/\text{ms}$, $\rho(14.2^\circ\text{C})=999.17\text{g}/\text{cm}^3$

$Q_n(\text{cm}/\text{min})$	$D(\text{cm})$	$h(\text{cm})$	$\Delta P(\text{bar})$	Re	$H(\text{m})$
0.77	18.02	7.53	0.214	0.0080	2.181
0.87	16.94	8.51	0.273	0.0090	2.789
0.97	16.04	9.50	0.340	0.0101	3.471
1.50	12.86	14.76	0.821	0.0157	8.387
2.00	11.14	19.68	1.460	0.0210	14.912

De la tabla es evidente que es necesaria el uso de filtros de diámetro considerable. Por ejemplo, el sistema puede demandar una altura manométrica de 3.47m si es que se trabaja con columnas de diámetro no menor a 7 pulgadas o podría montarse una red en paralelo de dos columnas de 5 pulgadas de diámetro o de tres columnas de 4 pulgadas de diámetro.

Con respecto al sistema de bombeo hidráulico, si bien es cierto que se utilizó una bomba hidráulica de lavadora de 34W modelo ASKOLL para la generación de caudal de flujo, se obtuvo como máximo valor alcanzado unos 200mL/min bajo una altura manométrica de 1.464m. Este valor para fines de las condiciones establecidas fue suficiente ya que se requería un caudal de 140L/día para doce horas de operación, sin embargo para una demanda de caudal mayor, es necesario reconsiderar el tipo de bomba empleado para la generación continua de flujo. Este bajo rendimiento de la bomba hidráulica sugiere el uso de otros modelos de bomba centrífuga acorde al diseño y capacidad energética del prototipo boya descontaminadora. En la siguiente tabla se lista algunos modelos de bomba hidráulica sumergible.

Tabla 23. Bombas hidráulicas sumergibles acorde a la capacidad del sistema fotovoltaico autónomo del prototipo boya descontaminadora

Marca	Modelo	Potencia W	Caudal L/min	Altura Manométrica máx (m)	Precio (S/.)	Imagen
EcoPlus	ECO-396	20(120V)	25	1.90	272.0	

SOBO	WP-3550	25(220V)	45	2.80	126.0	
AUBIG	PYHG0002	14.4(12V)	8.3	4.90	155.0	
DAEHWA ELECTRIC	DPW44-12	34(12V)	44	3.00	254.0	
RoHS	2002/9S	4.2(12V)	4.0	3.00	35.0	
Micro Bomba	JT-DC3W-4.5	1.0(5V)	1.5	0.55	23.0	

Como ya se mencionó, la altura manométrica que puede sostener la bomba hidráulica utilizada en el prototipo boya descontaminadora se encuentra limitada por las dimensiones del generador fotovoltaico. Nuestro diseño en particular, puede sostener una potencia

demandada de 34W para 12 horas de operación diaria expandible a 38W si fuese posible prescindir del ventilador de refrigeración (ahora se trata de una bomba sumergible). En el mercado, son contados los dispositivos hidráulicos que pueden funcionar bajo una potencia relativamente pequeña de manera que, estos dispositivos operan usualmente bajo un cabezal hidráulico máximo de ~3m. Este hecho condiciona finalmente el diseño de la línea de conducción hidráulica sobre la boya el cual, como ya se explicó, puede controlarse modificando la geometría del medio poroso (el filtro). Conviene que la bomba hidráulica genere el mayor caudal posible sometido al mayor cabezal hidráulico.

Si consideramos el funcionamiento del sistema autónomo fotovoltaico a toda su capacidad es imperante utilizar uno de los cuatro primeros dispositivos listados en la tabla. Por lo ya comentado, el criterio de selección prioriza la altura manométrica sobre el caudal generado. Así, se sugiere el uso de los dispositivos N°2(SOBO-WP3550) y N°4(DAEHWA ELECTRIC-DPW4412) para puesta en marcha de la boya donde ya es relativo escoger entre ambos ya que se debe tener en cuenta: el precio, el tipo de alimentación y la disponibilidad en el mercado. Nuestro contexto sugiere utilizar el modelo SOBO WP3550 puesto que ya se cuenta con un inversor, el cual compensa su bajo precio de lista y está disponible en el mercado local. El equipo N°3(AUBIG-PYHG0002) tiene una interesante capacidad de altura manométrica sostenida aunque se observa un caudal nominal generado 5 veces menor al de los otros dos equipos. De todas formas, no se descarta su uso puesto que manejar valores de caudal considerable tiene su implicancia sobre las dimensiones del filtro.

5.4. Consideraciones Adicionales del Generador Fotovoltaico

Con respecto al sistema fotovoltaico autónomo, se bien es cierto que se realizó el dimensionado considerando un generador fotovoltaico colocado de forma horizontal en la parte superior de la boya, esta no corresponde a una ubicación que maximice la generación energética. Debido a ello, se consideró la disponibilidad solar para diferentes ángulos de inclinación del cosechador a lo largo de diferentes épocas del año. Los cálculos consideraron el ángulo de declinación solar para días representativos de cada mes y la latitud de la zona.

Se verifica de los resultados obtenidos que se obtiene la mayor radiación solar incidente si nuestro módulo fotovoltaico se inclina un ángulo de igual magnitud a la latitud de la zona, esto es, la disponibilidad mejora en un 10.1% si comparamos los peores meses de radiación solar disponible para la inclinación horizontal ($\beta=0^\circ$) y la inclinación efectiva ($\beta=11^\circ$). Para las demás inclinaciones del generador fotovoltaico, la radiación solar en el peor mes del año disminuye respecto a la posición horizontal por lo que no será tomado en cuenta.

Tabla 24. Radiación Global disponible sobre una superficie inclinada ubicada en la zona del Lago Junín para diferentes épocas del año. Latitud $\phi=-11.086^\circ$

Mes	G_β Global (kWh/m ²)						
	$\beta=0^\circ$	$\beta=11^\circ$	$\beta=20^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=40^\circ$	$\beta=50^\circ$	$\beta=60^\circ$
Enero	6,94	6,53	6,02	5,28	4,37	3,34	2,20
Febrero	6,58	6,31	5,93	5,33	4,56	3,66	2,65
Marzo	6,36	6,30	6,08	5,66	5,07	4,33	3,45
Abril	6,09	6,29	6,28	6,10	5,72	5,17	4,47
Mayo	5,76	6,19	6,37	6,39	6,22	5,85	5,31
Junio	5,62	6,22	6,53	6,69	6,65	6,41	5,97
Julio	5,94	6,61	6,97	7,17	7,15	6,92	6,48
Agosto	6,59	7,17	7,44	7,53	7,40	7,03	6,46
Septiembre	6,93	7,25	7,32	7,18	6,83	6,26	5,51
Octubre	7,09	7,12	6,95	6,57	5,98	5,21	4,28
Noviembre	7,42	7,17	6,78	6,15	5,33	4,34	3,23
Diciembre	7,00	6,61	6,11	5,38	4,49	3,46	2,32

Aunque se pudo observar una mejora, esta no representa un impacto significativo sobre el diseño de la boya. Primero, si se considera la inclinación efectiva esta no implica sobre los cálculos de dimensionamiento, la posibilidad de utilizar un módulo solar de menor potencia. Segundo, si la consideramos la disponibilidad mejorada de 6.19 kWh/m² para el módulo solar

de 150W, se dispondría de 4.22W adicionales a doce horas de operación bajo una señal alterna, la cual no es muy significativo si se desea maximizar el número de bombas hidráulicas instaladas. Finalmente, para obtener esta radiación incidente mejorada con la nueva inclinación, se sugiere que el ángulo azimutal del generador fotovoltaico coincida con el ecuador del observador $\alpha=0$ e implicaría consideraciones adicionales de diseño para que pueda sostener una posición fija cuando esta se encuentra a bordo en operación. De esta forma, se bien la inclinación representa una mejora no genera mayor impacto sobre el diseño establecido sin embargo podría reconsiderarse si se pretende instalar dispositivos adicionales de pequeña potencia.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE COSTOS

Para estimar el costo de la tecnología se consideró al prototipo boya descontaminadora trabajando a toda su capacidad, esto es, utilizando toda la energía disponible cosechada por el generador para el funcionamiento de bombas hidráulicas. Se utilizó la expresión del método cinético para escalamiento de los parámetros bajo las siguientes condiciones de operación: $c_o=0.2\text{ppm}$, $c_f=0.01\text{ppm}$, $Q=4000\text{mL/min}$ a una operación de 12 horas diarias por un tiempo total de 7 días. Para la estimación del capital fijo se utilizará el método de Vian, en el cuadro líneas abajo se listan los equipos que forman parte del proceso de producción de la planta.

Tabla 25 Determinación de capital invertido en toda la maquinaria.

Sistema	Equipo	Unidades para tamaño	Costo (\$/.)	N°	Costo Total (\$)
Sistema Hidráulico	Bomba Hidráulica	Potencia (W) 14.4	155.0	2	310
	Sistema de medición Pb^{2+}	Potencia (W) 72	2700	2	5400
Sistema Autónomo Fotovoltaico	Panel solar	Potencia (W) 150	360.0	1	360
	Batería 12V	Capacidad (Wh) 1200	700.0	1	700

	Inversor 12V	Potencia (W)	500	967.0	1	967
	Controlador de carga solar	Amperaje (A)	20	227.5	1	228
Embarcación	Soporte de piezas	Superficie (m ²)	0.81	60.0	5	300
	Cámara de flotación	Volumen (m ³)	0.16	65.0	5	325
	Pieza Estabilizadora	Superficie (m ²)	4.91	140.0	5	700
	Cubículos	Volumen (m ³)	0.02	200.0	1	200
Síntesis del adsorbente Aremago	Máquina tamizadora	Potencia (W)	1100	3110.0	1	16 397
	Mezcladora de concreto	Potencia (W)	9694	3150.0	1	3150
	Horno Industrial de secado	Volumen (m ³)	1.13	2800.0	1	2800
CAPITAL INVERTIDO EN MAQUINARIAS(S)						31 836

Con este valor ya se puede calcular los diferentes parámetros que forman el método de Vian y así, obtener el coste del capital fijo.

Tabla 26. Método de Vian desglosado para la estimación del capital fijo

Parámetro	Definición	Cálculo	Valor(S/)
I1	Maquinaria y Aparatos	X	31 836
I2	Instalación	0.50X	15 918
I3	Tuberías y válvulas	0.50X	15 918
I4	Instrumentación	0.30X	9551

I5	Aislamientos	0.10X	3184
I6	Instalación Eléctrica	0.20X	6367
I7	Terrenos y edificios	0.05X	1592
I8	Instalaciones Auxiliares	0.25X	7959
Y	Capital físico o primario	$Y = \sum_{1}^{8} I_i$	92 325
I9	Proyecto, dirección de obra y montaje	0.30Y	27 698
Z	Capital directo o secundario	$Z=Y+I9$	120 022
I10	Contratista	0.10Z	12 002
I11	Gastos Imprevistos	0.30Z	36 009
TOTAL CAPITAL FIJO(S/)			168 032

Para nuestro caso, representará el 30% del capital más el costo del material adsorbente requerido para el primer bimestre de operación, esto es S/297 192 mientras que los gastos previos y los costes de puesta en marcha representarán cada una el 10% del capital. Así, ya se puede estimar la inversión inicial total necesaria para poner en marcha la estación de tratamiento de aguas y cuyo monto asciende a **S/498 831**.

Ahora se calcula los costes de producción las cuales se refieren a los bienes y servicios utilizados. Estos costos se dividen en los costos de fabricación (M) y los costes generales (G). Con respecto a los costos por manufactura, repercuten al proceso de producción los siguientes factores:

Tabla 27. Partidas anuales por fabricación y sus respectivos montos asignados

Partida	Descripción	Costo(S/)
Materia Prima	<p>Este material fue creado en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. La masa utilizada anual es de 25.09 ton y el costo por kilogramo de adsorbente, considerando los reactivos, es de S/59.0. Se realizaron las siguientes cotizaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Óxido de grafeno (Jueguan Manufacture) \$720/kg • Arena (Ferretería) S/6.0/kg • Cloruro de hierro II (Dalian Yoking Chemical) \$4.71/kg • Cloruro de hierro III(Dalian Yoking Chemical) \$1.96/kg • Ácido clorhídrico 37%(Merck Millipore) S/11.1/L • Amoniaco en solución 30%(Merck Millipore) S/21.4/L 	1 480 695
Mano de Obra	<p>El salario de los trabajadores de la planta. Los salarios fueron obtenidos en aptitus.com y neuvo.com, páginas que publican ofertas de empleo a nivel nacional. El salario se obtuvo considerando la zona de labor, las funciones y beneficios.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 operarios S/11 000 • 2 seguridad S/3 600 • 2 jefes de planta S/6 000 • 2 Laboratorio S/4 400 • 1 Directivo S/3 000 	336 000
Servicios	<p>Para el correcto funcionamiento y mantenimiento de la planta, es necesario considerar el servicio por transporte a partir de lanchas o alquiler de equipos de traslado (S/70 por día).</p>	25 200
Mantenimiento	<p>Para aquellas labores de mantenimiento y reparación que no puedan ser realizadas por los operarios de la planta se utilizará el 20% anual del capital fijo. Esto va destinado a cubrir trabajos que requieran conocimiento especializado como programación, calibración de sensor e instrumentación electrónica.</p>	33 606
Distribución y Administración	<p>Transporte del producto de la planta al consumidor. Este coste equivale al 20% de la mano de obra. También considera los gastos administrativos, esto es, el salario de tres oficinistas anual</p>	121 200
Depreciación	<p>Asociado a la pérdida de valor de las instalaciones. Se espera una actividad de planta de 6 años. El monto destinado a la amortización equivale el 16.7% del capital fijo</p>	8895

COSTOS POR FABRICACIÓN(S/)	2 005 597
-----------------------------------	-----------

Los costos generales se pueden dividir en gastos comerciales, gastos financieros y los gastos en investigación y servicios técnicos. Los gastos comerciales hacen referencia a los gastos correspondientes a los temas de marketing y asumiremos representa el 5% del costo de fabricación el cual equivale a S/100 280. No se considera gastos por intereses de capital prestado o invertido en el negocio. Los gastos por investigación y servicios técnicos incluye los gastos en I+D+i y gastos por asesoramiento al cliente sobre el servicio prestado, representa el 20% del capital fijo y equivale a S/33 606. El valor final de los costos generales equivale a S/133 886.

El costo total de producción se calcula sumando el costo de fabricación y el costo general dando un monto de **S/2 139 483**.

El ingreso por ventas se determina a partir del precio de venta del servicio prestado, esto es, el precio asignado por tratar cierto volumen de agua. En general los precios de venta se seleccionan a partir de un estudio de mercado donde se escoge la media de los precios de venta de otras instituciones que prestan el mismo servicio o parecido. Para nuestro caso consideramos un precio de venta mínimo que garantice una inversión rentable. Realizamos los cálculos para una valor de venta S/1.06/L .Por otro lado el volumen producido es de 2 102 402 L lo que equivale a un monto anual de **S/2 291 622** anuales.

Se calcula el flujo neto de caja para un periodo de un año y se tomará en cuenta los siguientes parámetros: una vida útil de planta de 6 años, que si bien algunos dispositivos puedan caducar al año por desperfectos, tranquilamente el monto asignado para mantenimiento y suministros pueden cubrirlo; una construcción de planta de un mes de manera que el importe destinado al capital fijo será únicamente en el primer año; una amortización determinada por el método de la suma de dígitos; un valor residual nulo ya que todos los equipos se degradan en el tiempo; un beneficio que se calcula a partir de un precio de venta invariante a lo largo del periodo de evaluación y un impuesto a la renta que se calcula como el 30% de la base

imponible. Con estos parámetros se calcula un flujo de caja neto anual y se muestra el respectivo balance económico en la siguiente tabla. Para el cálculo del flujo neto, se consideró en la sección ventas el precio mínimo que genere beneficios para el desembolso de S/498 831.

Tabla 28. Balance económico para la obtención del Flujo Neto de Caja Anual. Las unidades son nuevos soles(S/)

Año	0	1	2	3	4	5	6
Gastos previos	-16803						
Capital fijo	-168032						
Capital circulante	-2972	-294220					
Puesta en marcha	-16803						
Ventas		2291622	2291622	2291622	2291622	2291622	2291622
Costos		-2139483	-2139483	-2139483	-2139483	-2139483	-2139483
Amortización		-48009	-40008	-32006	-24005	-16003	-8002
B. imponible		104130	112132	120133	128135	136136	144138
Impuestos		-31239	-33640	-36040	-38440	-40841	-43241
Flujo de caja Neta	-204610	-173320	118500	116099	113699	111299	108898

Se realiza el cálculo del valor actual neto (VAN) para estimar la viabilidad del proyecto bajo el precio de venta considerado. Para ello, se calcula la suma de valores actuales de los futuros ingresos y los costes. Los cálculos fueron realizados con el uso de la hoja de cálculo de Excel. Se determina que el precio de S/1.09/L de agua tratada asegura una rentabilidad mínima, es decir, situación de beneficios a bajo interés. Un precio de venta por debajo este límite encontrado no será recomendable puesto que no solo deja de ser rentable, además, puede generar pérdidas.

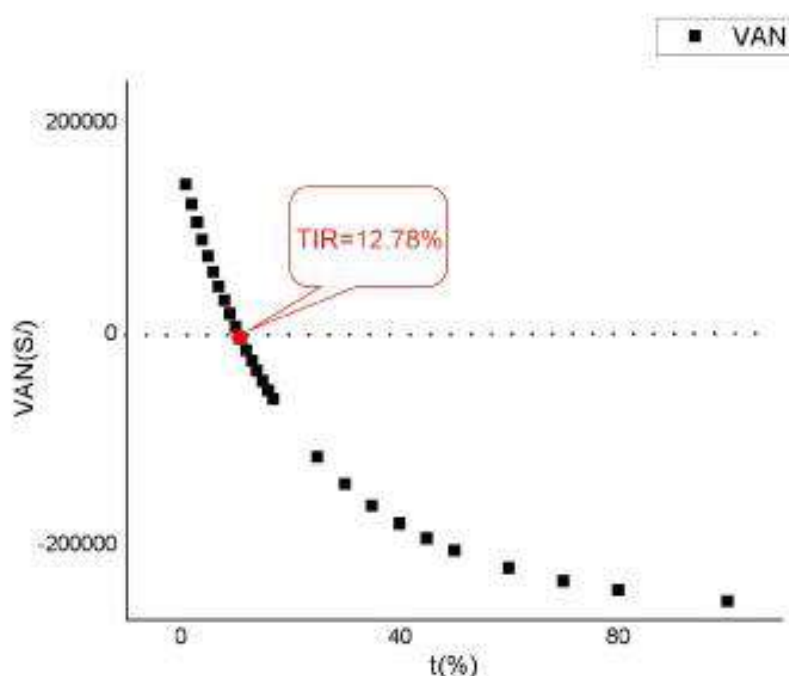


Figura 48. Valor actual Neto en función de tasas de descuento aplicados a los flujos de capital

Como se puede notar de la gráfica, la tasa de retorno intrínseco es de 12.78% y representa un estado de rentabilidad mínima al valor de venta elegido. Puesto que el capital circulante es significativa se analiza el caso en el que se solicita un préstamo para cubrir dicho monto, a una tasa interés del 10% anual. Se encuentra que el mínimo precio de venta requerido para que la inversión en el proyecto alcance rentabilidad es de S/1.11, este valor genera una tasa de retorno intrínseco de 14.24%. El análisis económico para el caso que el sistema se utilice

como suministro de agua potable es válida puesto que los resultados comparativos de remoción en laboratorio y campo muestran la alta superficie activa no ocupada por iones plomo pero si por otras especies disueltas en el lago. Estamos bajo la suposición que el agua en el efluente del sistema no solo cumple con el ECA para el ión plomo sino para los principales agentes contaminantes encontrados en el Lago Junín.

CONCLUSIONES

Se diseña un prototipo a base de nanoadorbentes con la capacidad de tratar las aguas del lago Chinchaycocha contaminadas con especies Pb^{2+} . El diseño resulta conveniente puesto ya que el punto de operación se encuentra en una zona remota de difícil acceso con una alta disponibilidad solar, magnificando así, sus características del prototipo. En realidad, muchos de los lagos contaminados del Perú presentan rasgos muy similares en condiciones de operación, por lo que este diseño se puede adaptar sin mayor dificultad pero con los ajustes necesarios a estos cuerpos de agua. Finalmente, sigue un proceso de diseño escalonado pero sencillo, construido a partir de materiales disponibles en el mercado atribuyéndole una aceptable accesibilidad.

Se determina la curva de ruptura de la columna de Aremago bajo condiciones de campo y los parámetros de rendimiento de la operación. Si bien es cierto que los antecedentes de la investigación demuestran interesantes resultados bajo condiciones controladas sobre todo por su alto rendimiento en medio básico, se determina un proceso de adsorción claramente reducido por las propiedades de la matriz real, en particular, por la presencia de especies como lo son el carbono orgánico disuelto y especies iónicas de otros metales las cuales son dadas a conocer en estudios de monitoreo del ANA. Finalmente estos resultados cuestionan la supuesta afinidad del material en presencia de otras especies de la matriz contaminada.

Para implementar el proceso de diseño, se simula un caso de operación y se determina la cantidad de material adsorbente necesaria para el escalamiento del proceso con el uso del método cinético. Para el dimensionamiento del prototipo se tuvo en cuenta las respectivas curvas de rendimiento de los dispositivos en: el sistema de tratamiento, el sistema fotovoltaico autónomo y el sistema de flotación, y de esta forma, garantizar las mejores condiciones de operación maximizando la durabilidad de todos los elementos que conforman la boya. Con las dimensiones calculadas, se diseñó una geometría de la embarcación adaptada al lago, esto es, le otorgará flotabilidad, estabilidad y movilidad a la boya descontaminadora. Finalmente la construcción fue llevada a cabo con el uso de materiales accesibles de modo que el proceso de diseño no limita el tipo de material a emplear siempre y cuando se tomen las consideraciones técnicas y de implementación.

En el análisis económico se determina las condiciones para la comercialización del prototipo. Si bien es cierto que la planta requiere de un significativo capital fijo e inversión inicial, el mayor costo lo afronta su operación, en particular la obtención del material adsorbente. En el análisis se calcula un valor de venta mínimo de S/1.09, monto que permite recuperar la inversión inicial al cabo de seis años a una rentabilidad mínima. También se analiza el caso de préstamo para el capital de trabajo ya que representa un monto significativo, la tasa de interés considerada representa un caso general. Se encuentra que el monto el precio de venta mínimo debe de ser S/1.11 por litro. Ambos precios pueden entrar en competencia con el agua embotellada ofrecida en la zona. El análisis como suministro de agua encuentra justificación si consideramos que fueron removidas el resto de especies metálicas en el lago.

En conclusión, se logra un diseño confiable cuya operación representa una clara oportunidad de negocio rentable. Además, se podría considerar el caso de obtener beneficios indirectos e invaluable por remediar las aguas del lago impulsando su conservación, es decir, el escenario termina siendo positivo ya que el impacto se da en la población beneficiaria y en el ecosistema lacustre.

RECOMENDACIONES

De los resultados de rendimiento de la columna, se sugiere como trabajo a futuro determinar el perfil completo de iones presentes en la matriz real. Este resultado permitiría afirmar con mayor certeza cuáles serían las especies responsables de la atenuación de la capacidad extractiva del ión plomo. Los resultados podrían sugerir una red de filtros de capacidad extractiva combinada con materiales varios como adsorbentes.

Con los pasos para el diseño y puesta en marcha del prototipo boya descontaminadora se recomienda iniciar los ensayos de campo sobre el lago por un periodo prolongado de tiempo para determinar las potenciales fallas del prototipo. Los posibles desperfectos del equipo se pueden localizar en: la red de conducción hidráulica, en particular en el dispositivo de bombeo. De acuerdo al manual del usuario, estos dispositivos pueden funcionar sin problemas por mucho tiempo, se podría analizar el decaimiento del rendimiento a través de la altura manométrica sostenida en función a los días o meses de operación. Las fallas potenciales también se podrían ubicar sobre los componentes eléctricos del sistema fotovoltaico. En general, se podría analizar la degradación en el tiempo de todos los componentes. Finalmente, las condiciones de navegación sugeridas son de estabilidad intacta, hecho que permite sugerir la instalación del equipo próxima a los humedales del lago, en el que la marea es amortiguada y el diseño asegura la estabilidad.

El análisis de costos implica determinar de forma mucho más detallada las condiciones para que el equipo alcance rentabilidad a un bajo precio de venta, no solo por los beneficios indirectos que implicaría el derecho de uso de la patente o incentivos económicos de parte del Estado por acciones responsables a favor de la conservación ambiental.

Por último se extiende criterios con respecto a la selección del cuerpo de agua a analizar. Existen muchas herramientas que facilitan la selección además de los trabajos de monitoreo, que son escasas por cierto. Por ejemplo, la Defensoría del Pueblo pone bajo conocimiento público mapas de conflictos sociales por recursos hídricos. En general, el hecho se denuncia a partir de la mínima sospecha de contaminación y puede llegar hasta la confirmación del problema. También se podría utilizar el seguimiento periódico que da el Ministerio de Salud al número de casos expuestos por metales pesados en las localidades estudiadas. También se podría utilizar el mapa de pasivos ambientales mineros ya que no hace falta registrar una denuncia para atenderla, la contaminación por metales pesados representa una amenaza progresiva que muestra daños patológicos en la última etapa, cuando llegó al torrente sanguíneo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAA-X Mantaro, & ANA. (2016, Septiembre 1). Informe de Monitoreo de la Calidad de Agua Superficial del Lago Chinchaycocha. | SIAR Junín | Sistema Regional de Información Ambiental. <http://siar.regionjunin.gob.pe/documentos/iv-informe-monitoreo-calidad-agua-superficial-lago-chinchaycocha>
- Abella, M. A. (2006). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Abella 2006. <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20168/dimensionado-de-sistemas-fotovoltaicos-autonomos>
- Adsorption of metal ions on bed sediments: Hydrological Sciences Journal: Vol 42, No 5. (2009). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626669709492068>
- ANA. (2014, julio 1). Informe Monitoreo Participativo de la Calidad del Lago Chinchaycocha (Época de Avenida) Junín-Pasco | SIAR Junín | Sistema Regional de Información Ambiental. <http://siar.regionjunin.gob.pe/documentos/monitoreo-participativo-calidad-agua-lago-chinchaycocha-epoca-avenida>
- Autoridad Nacional del Agua, & Dirección de Gestión de Calidad de Recursos Hídricos. (2014). Diagnóstico de la calidad de los recursos hídricos en el Perú 2000 - 2012: Versión preliminar. Autoridad Nacional del Agua. <http://repositorio.ana.gob.pe/xmlui/handle/ANA/212>
- Berrosipi Alania, L. Y. (2019). Remoción de metales pesados presentes en las aguas ácidas de la laguna Yanamate mediante la aplicación de la dolomita como agente remediante a escala experimental-2019.
- Bianchini, F., Pascali, G., Campo, A., Orecchio, S., Bonsignore, R., Blandino, P., & Pietrini, P. (2015). Elemental contamination of an open-pit mining area in the Peruvian Andes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(3), 1065-1074. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0493-8>
- Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., & Reynel-Ávila, H. E. (Eds.). (2017). Adsorption Processes for Water Treatment and Purification. Springer International Publishing. <https://www.springer.com/gp/book/9783319581354>

- Burbujas nanotecnológicas para recuperar lagos contaminados. (2015, noviembre 11).
Noticias ambientales. <https://es.mongabay.com/2015/11/burbujas-nanotecnologicas-para-recuperar-lagos-contaminados/>
- Camayo V., B. F., Condezo H., D. E., Ramos C., A. Y., & Massipe H., J. R. (2017).
Estimación de la radiación solar global, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Junín, Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4685>
- Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades. (2019).
https://www.dge.gob.pe/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=660:documentos-33&catid=20:institucional
- Chatterjee, S., Mondal, S., & De, S. (2018). Design and scaling up of fixed bed adsorption columns for lead removal by treated laterite. *Journal of Cleaner Production*, 177, 760-774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.249>
- Chávez Rodríguez, L. (2014). Fitoremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo. Universidad Nacional Agraria La Molina.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2435>
- Cheremisinoff, N. P. (1996). Laboratory Techniques and Analysis. Elemental and Structural Characterization Tests. En N. P. Cheremisinoff (Ed.), *Polymer Characterization* (pp. 43-81). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551403-9.50006-6>
- Concurso Reto Bio—Innovate Perú. (2017).
<https://www.innovateperu.gob.pe/convocatorias/por-tipo-de-concurso/concursos-no-disponibles-historico/231-concurso-reto-bio>
- Creed, J. T., Brockhoff, C. A., & Martin, T. D. (1996). Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. En *Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples* (pp. 88-145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1398-8.50011-2>
- Creed, J. T., Martin, T. D., Lobring, L. B., & O'Dell, J. W. (1996). Determination of Trace Elements by Stabilized Temperature Graphite Furnace Atomic Absorption. En

- Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples (pp. 146-186). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1398-8.50012-4>
- Delman, E. (2012). The History of Mining in Cerro de Pasco and Heavy Metal Deposition in Lake Junin Peru. Honors Theses. <https://digitalworks.union.edu/theses/800>
- Dextre Rubina, A. (2017). Acumulación de metales pesados en *Senecio rufescens* DC. en dos lagunas altoandinas de las regiones de Lima y Junín, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/7232>
- Engineering and Design: Adsorption Design Guide (DG-1110-1-2). (2001). CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA403095>
- Enos, D. G. (2015). Chapter 3—Lead-acid batteries for medium- and large-scale energy storage. En C. Menictas, M. Skyllas-Kazacos, & T. M. Lim (Eds.), *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage* (pp. 57-71). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-013-2.00003-0>
- Fernández, B., Lobo, L., & Pereiro, R. (2019). Atomic Absorption Spectrometry | Fundamentals, Instrumentation and Capabilities. En P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, & M. Miró (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* (pp. 137-143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14116-2>
- Figueiredo-Filho, L. C. S., Janegitz, B. C., Fatibelilo-Filho, O., Marcolino-Junior, L. H., & Banks, C. E. (2012). Inexpensive and disposable copper mini-sensor modified with bismuth for lead and cadmium determination using square-wave anodic stripping voltammetry. *Analytical Methods*, 5(1), 202-207. <https://doi.org/10.1039/C2AY26078F>
- Gaga, A., Diouri, O., Es-sbai, N., & Errahimi, F. (2017). Design and realization of an autonomous solar system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 186, 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/186/1/012031>
- García Aragón, F., Ysla Cedeño, E. A., Bazán Alguiar, J. P., Saldaña Alfaro, D. R., & Llanos Vásquez, C. F. (2015). Informe de Evaluación Ambiental del Lago Chinchaycocha

2015. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – Oefa.
<http://repositorio.oefa.gob.pe//handle/123456789/87>
- Garcia, M. C. A. (2006). El generador Fotovoltaico.
<https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20216/el-generador-fotovoltaico>
- Grosell, M., Gerdes, R., & Brix, K. V. (2006). Influence of Ca, humic acid and pH on lead accumulation and toxicity in the fathead minnow during prolonged water-borne lead exposure. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 143(4), 473-483. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2006.04.014>
- Hanco, E. S. M. (2013). Determinación de los metales pesados en la Laguna Choquene, Quilcapunco-Putina-Puno. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 15(02). <https://doi.org/10.18271/ria.2013.4>
- Hídricos, A. N. del A. D. de G. de C. de los R. (2014). Informe del segundo monitoreo 2014 de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Rímac: Informe técnico. Autoridad Nacional del Agua. <http://repositorio.ana.gob.pe/xmlui/handle/ANA/2074>
- Hídricos, A. N. del A. D. de G. de C. de los R. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. Autoridad Nacional del Agua. <http://repositorio.ana.gob.pe/xmlui/handle/ANA/209>
- Holdich, R. (2002). *Fundamentals of Particle Technology*.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2013). Batteries | PVEducation.
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/welcome-to-pvcdrom/batteries>
- Hontoria, L., & Aguilera, J. (2004). Dimensionado de sistemas Fotovoltaicos autónomos. Aguilera 2004. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, Vol. 2, 2004, ISBN 84-7834-464-0, pág. 15, 15.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1103105>
- IANAS Publications. (2019). <https://www.ianas.org/index.php/books/ianas-publications>
- IMO. (1995). Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments: Resolution A.749(18). International Maritime Organization.

- Jacobi, Z. E., Li, L., & Liu, J. (2012). Visual detection of lead(II) using a label-free DNA-based sensor and its immobilization within a monolithic hydrogel. *Analyst*, 137(3), 704-709. <https://doi.org/10.1039/C2AN15754C>
- Jara-Peña, E., Gómez C, J., Montoya T, H., Sánchez, T., Tapia, L., Cano, N., & Dextre, A. (2017). Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. Ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*, 24(2), 583-598. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210>
- Joseph, L., Jun, B.-M., Flora, J. R. V., Park, C. M., & Yoon, Y. (2019). Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229, 142-159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>
- Kaludjerovic-Radoicic, T., Boskovic-Vragolovic, N., Garic-Grulovic, R., Đuriš, M., & Grbavcic, Z. (2016). Friction factor for water flow through packed beds of spherical and non-spherical particles. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 23, 6-6. <https://doi.org/10.2298/CICEQ150506006K>
- Khatib, T., Ibrahim, I. A., & Mohamed, A. (2016). A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 120, 430-448. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.011>
- Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A., & Conde, C. G. (2016). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista ION*, 29(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>
- Lead in Aquatic Environments—Understanding the Science < Responsibility | ILA - International Lead Association Website. (2017). <https://www.ila-lead.org/responsibility/lead-in-aquatic-environments--understanding-the-science>
- Ledesma Velita, W. J. (2019). Propuesta de tratamiento del depósito de relaves de Quiulacocho-Pasco para su remediación ambiental, basada en experiencias exitosas en empresas mineras.

- Levenson, R. (2001). *More Modern Chemical Techniques*.
<https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-0-85404-929-5>
- Lewis, E. V. (Ed.). (1988). *Principles of Naval Architecture, Vol. 1: Stability and Strength* (Revised edition). Society of Naval Architects &.
- Li, F., Feng, Y., Zhao, C., & Tang, B. (2011). Crystal violet as a G-quadruplex-selective probe for sensitive amperometric sensing of lead. *Chemical Communications*, 47(43), 11909-11911. <https://doi.org/10.1039/C1CC15023E>
- Li, W., Yang, Y., Chen, J., Zhang, Q., Wang, Y., Wang, F., & Yu, C. (2014). Detection of lead(II) ions with a DNzyme and isothermal strand displacement signal amplification. *Biosensors & Bioelectronics*, 53, 245-249.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.09.055>
- López Tarabochia, M. (2017, octubre 30). Contaminación minera en Perú: Informe médico reveló presencia de metales pesados en menores. *Wayka.pe*.
<https://wayka.pe/presencia-metales-pesados-en-ninos-de-los-andes/>
- Martin, T. D., Brockhoff, C. A., Creed, J. T., & Long, S. E. (1996). Determination of Metals and Trace Metals in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. En *Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples* (pp. 31-87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1398-8.50010-0>
- Menis, O., & Rains, T. C. (1970). Sensitivity, Detection Limit, Precision and Accuracy in Flame Emission and Atomic Absorption Spectrometry. En C. Th. J. Alkemade, R. Bleekrode, J. C. Burger, C. C. Butler, P. G. Cath, V. A. Fassel, P. T. Gilbert, W. Gillies, R. Herrmann, R. N. Kniseley, R. Mavrodineanu, O. Menis, W. Müller-Herget, M. Pinta, T. C. Rains, R. Smith, J. B. Willis, J. D. Winefordner, G. K. Yamasaki, & R. Mavrodineanu (Eds.), *Analytical Flame Spectroscopy: Selected Topics* (pp. 47-77). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-01008-0_2
- MINAM. (2017, junio 7). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua* [Text]. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental.

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>

Moore, C. S. (2010). Principles of Naval Architecture Series: Intact Stability. SNAME.

Nithyanandam, R. (2015). Treatment of lake water from Taylor's University using adsorption column. Journal of Engineering Science and Technology.

OLIVE - Natural Swimming Pool Filter. (2016). Indiegogo.

<https://www.indiegogo.com/projects/1932867>

Polat, F., Dogan, H., Buhan, E., Kılıç, O., Yılmaz, D., & Buhan, S. (2015). Accumulation and behavior of some heavy metals in the main components of Zinav Lake Basin ecosystem. Fresenius Environmental Bulletin, 24, 180-187.

Poma, L. (2016). Ecosistema Laguna Punrun-caso de contaminación por metales pesados. <http://www.laborpasco Peru.org.pe/index.php/publicaciones/punrun/168-ecosistema-de-la-laguna-punrun>

Publicaciones-Labor Pasco. (2018).

<http://www.laborpasco Peru.org.pe/index.php/publicaciones/publicaciones>

Raghubanshi, H., M. Ngobeni, S., Osikoya, A., Shooto, N., Wokwu Dikio, C., Naidoo, E., Dikio, E., Pandey, R. K., & Prakash, R. (2016). Synthesis of graphene oxide and its application for the adsorption of Pb⁺² from aqueous solution. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.11.028>

Rodbell, D. T., Delman, E. M., Abbott, M. B., Besonen, M. T., & Tapia, P. M. (2014). The heavy metal contamination of Lake Junín National Reserve, Peru: An unintended consequence of the juxtaposition of hydroelectricity and mining. GSA Today, 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSATG200A.1>

Sánchez, B. B. R., Espinoza, R. F. R., & Roña, J. M. I. (2013). Determinación de la acumulación de Metales Tóxicos en agua, sedimento y biota del Humedal el Paraíso. INFINITUM..., 3(2).

<http://revistas.unjfsc.edu.pe/index.php/INFINITUM/article/view/379>

Shoobridge, D. (2006, enero). Junin National Reserve—Park Profile—Biodiversity.

<https://www.parkswatch.org/parkprofile.php?l=eng&country=per&park=jnar&page=bio>

Sitko, R., Turek, E., Zawisza, B., Malicka, E., Talik, E., Heimann, J., Gagor, A., Feist, B., & Wrzalik, R. (2013). Adsorption of divalent metal ions from aqueous solutions using graphene oxide. *Dalton Transactions*, 42(16), 5682-5689.

<https://doi.org/10.1039/C3DT33097D>

Sobieski, W., & Zhang, Q. (2014). Sensitivity analysis of Kozeny-Carman and Ergun equations.

Spiers, D. (2012). Chapter IIB-2—Batteries in PV Systems. En A. McEvoy, T. Markvart, & L. Castañer (Eds.), *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)* (pp. 721-776). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00022-2>

Tapía Ugaz, L., Sanchez, T., Baylón, M., Enoc, J., Arteaga, C., Maceda, D., & Salvatierra, A. (2018). Invertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua en Lagunas Altoandinas del Perú. *Ecología Aplicada*, 17, 149.

<https://doi.org/10.21704/rea.v17i2.1235>

Thornton, I., & Rautiu, R. (2001). Lead. *The Facts*. 12.

Vidal, N. F., Acosta, H. S., & Villacres, F. G. (2017). Determinación de metales pesados en los cuerpos de agua del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Región Callao, Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 20(39), 149-158.

Wang, C.-Y. (2013). Floating wetlands for urban stormwater treatment.

<https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/52036>

Wang, X. S., Lu, H. J., Zhu, L., Liu, F., & Ren, J. J. (2010). Adsorption of Lead(II) Ions onto Magnetite Nanoparticles. *Adsorption Science & Technology*, 28(5), 407-417.

<https://doi.org/10.1260/0263-6174.28.5.407>

Wei, B., Cheng, X., Wang, G., Li, H., Song, X., & Dai, L. (2019). Graphene Oxide Adsorption Enhanced by Attapulgite to Remove Pb (II) from Aqueous Solution. *Applied Sciences*, 9(7), 1390. <https://doi.org/10.3390/app9071390>

WHO | Chemical hazards in drinking-water: Lead. (2016). WHO.

http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/lead/en/

Worch, E. (2012). Adsorption Technology in Water Treatment, Fundamentals, Processes, and Modeling. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>

Yang, X., Shi, Z., & Liu, L. (2015). Adsorption of Sb(III) from aqueous solution by QFGO particles in batch and fixed-bed systems. *Chemical Engineering Journal*, 260, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.036>

ANEXOS

Ensayos de remoción de Pb^{2+} tipo batch con el uso del adsorbente Aremago
bajo condiciones controladas de laboratorio

Fue realizado estudios de cinética del material aremago durante remoción de iones Pb^{2+} en solución. El resultado indica que el tiempo de contacto requerido para remoción casi completa de la especie de plomo fue de 2 minutos. A partir de este tiempo, no se presenta cambios importantes sobre la concentración de plomo en solución y decimos que alcanzó el equilibrio bajo tales circunstancias. Las condiciones trabajadas fueron colocadas en la descripción de la figura mostrada. Se utilizaron modelos cinéticos de pseudo primer, segundo orden y exponencial doble para ajustar la curva de adsorción en el tiempo. Los resultados encontrados fueron:

Tabla 29. Modelo cinético de pseudo primer orden. Chi-cuadrado de ajuste 0.99877

$C = q(1 - e^{-kt})$		
Constante	Valor	Error estándar
Q	0.65306	0.00231
K	1.92689	0.26547

Tabla 30. Modelo cinético de pseudo segundo orden. Chi-cuadrado de ajuste 0.99928

$C = \frac{kq^2t}{1 + qkt}$		
Constante	Valor	Error estándar
Q	0.65733	0.00233
K	23.01966	6.73419

Tabla 31. Modelo cinético de exponencial doble. Chi-cuadrado del ajuste 0.99983

$C = q - \left(\frac{d_1}{20}\right)e^{-k_1t} - \left(\frac{d_2}{20}\right)e^{-k_2t}$		
Constante	Valor	Error estándar
q	0.64448	0.00565
k ₁	-0.03375	0.01843
k ₂	2.16054	0.17499
d ₁	-0.06703	0.08603
d ₂	12.95671	0.06084

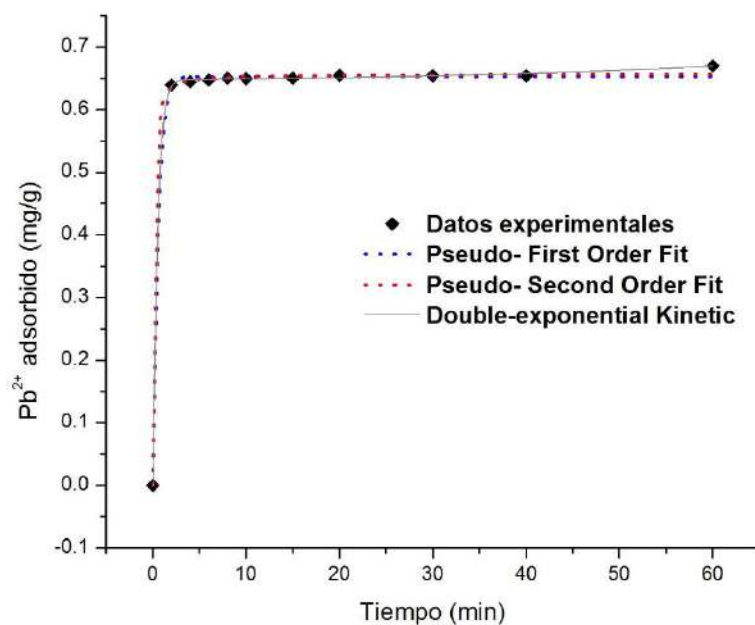


Figura 49. Curva de la cinética del material AreMaGO. Ensayo batch realizado a una concentración inicial de 15 ppm, dosis de adsorbente de 0.02 g/mL y un pH=4. Para la agitación un tiempo de contacto de 24 h a 200 rpm

La gráfica se explica considerando las especies en solución y la carga superficial del adsorbente. Se observa que en la banda de $\text{pH} < 4$ el nivel de remoción es pequeña pero crece constantemente con el pH. La especie de Pb (II) de mayor actividad en esa banda es Pb^{2+} pero la alta concentración de protones en solución le genera un apantallamiento sobre las zonas de unión con carga negativa. Luego, conforme nos desplazamos a niveles de pH

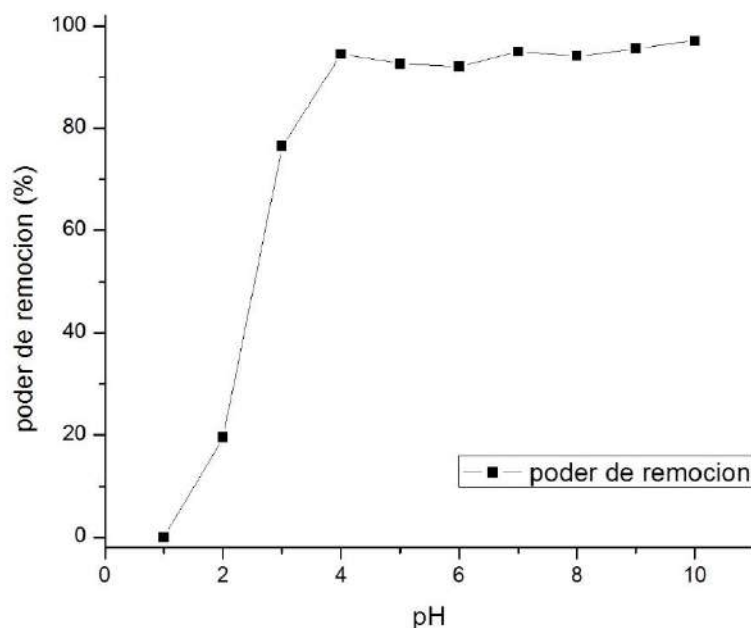


Figura 50. Remoción de Pb^{2+} a niveles de pH con el uso del material adsorbente AreMaGo. Ensayo batch realizado a una concentración inicial de 10 ppm, dosis de adsorbente de 0.02 g/mL y valores de pH en el rango 1-10. Para la agitación un tiempo de contacto de 24 h a 200 rpm

mayor la carga neta de la superficie se hace menos positiva siendo más pequeña su repulsión hacia las especies positivas. Para valores de $\text{pH} > 4$, el adsorbente alcanza los niveles máximos de remoción y se mantiene sin mayor cambios en el intervalo. A este nivel, la adsorción de las especies de Pb (II) es afectada casi de forma despreciable por la pequeña concentración de iones H^+ . Dichas especies encontrarán una carga superficial negativa al estar a un $\text{pH} > \text{pzc}$ e irá en aumento con el nivel de acidez. Si el pH de la solución acuosa es altamente básico, se pueden presentar especies de $\text{Pb}(\text{OH})^+$ con una actividad no despreciable, el cual, al ser cationes de menor carga positiva, implica una menor intensidad de atracción hacia la superficie del óxido de grafeno.

Finalmente, se obtuvo la isoterma de adsorción de plomo. Las muestras fueron preparadas en un amplio intervalo de concentraciones en agua destilada. Los resultados mostrados corresponden a valores de equilibrio, esto es, el ensayo batch fue realizado durante un intervalo de tiempo suficientemente grande y permite suponer que un proceso sin más cambios completada la duración del ensayo. Se utilizaron los modelos de Freundlich y Langmuir para ajustar la isoterma de adsorción.

Tabla 32. Modelo de Freundlich. Chi-cuadrado del ajuste 0.96316

$q = aC^b$		
Constante	Valor	Error estándar
A	0.26562	0.2274
B	0.66379	0.1337

Tabla 33. Modelo de Langmuir. Chi-cuadrado del ajuste 0.9455

$q = \frac{q_m b C}{1 + b C}$		
Constante	Valor	Error estándar
q_m	62.82063	66.5058
B	0.00071	0.0011

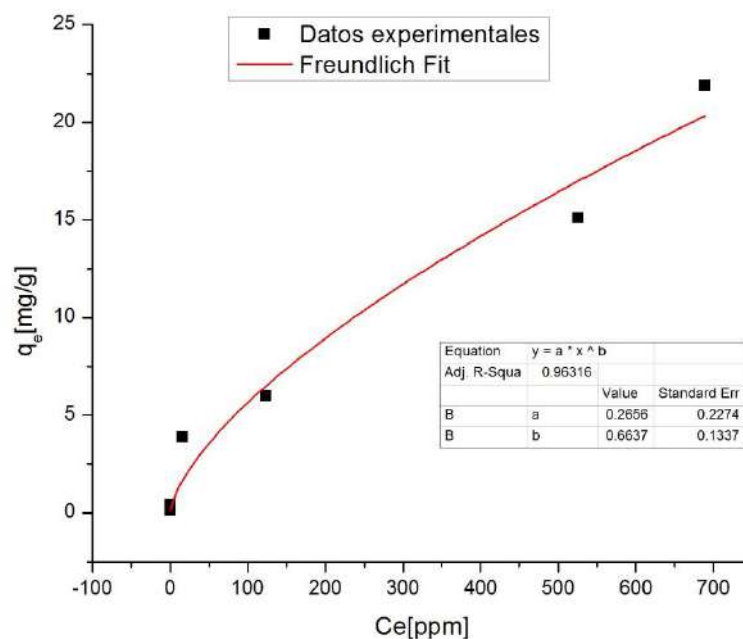


Figura 51. Isotherma de adsorción de Pb^{2+} de material AreMaGo. Ensayo batch realizado a concentraciones iniciales de 10-1000 ppm, dosis de adsorbente de 0.02 g/mL y a un pH=6. Para la agitación un tiempo de contacto de 24 h a 200 rpm

Estudio de la contaminación del Lago Chinchaycocha por la presencia de especies de plomo (II)

Es importante conocer la gravedad del problema de la contaminación por plomo en el lago objetivo; esto es su naturaleza, severidad, extensión e identificar las causas del problema. El propósito fue conocer las condiciones de campo del lago en un margen de tiempo cercano a la fecha de muestreo.

Se realizan estudios de muestreo en las aguas del Lago Chinchaycocha para determinar la concentración de iones Pb^{2+} . Se establecieron 4 puntos sobre el Lago Junín y uno sobre la cuenca del Mantaro. Los puntos elegidos son mostrados en la tabla. La fecha de muestreo fue el 5 de Mayo del presente año.

La ubicación de las estaciones parte de los estudios previos de calidad de agua realizados por el ANA (AAA-X Mantaro & ANA, 2016; ANA, 2014; García Aragón et al., 2015). Se

considera que corresponden a muestras representativas y que podrían indicar el estado de contaminación. Los puntos más próximos al delta presentan los niveles más altos de plomo por lo general. Se presume que la fuente de polución proviene del Río San Juan y de los sedimentos en Upamayo.



Figura 52. Puntos de muestreo sobre el Lago Chinchaycocha (5 de Mayo del 2019)

En el mapa presentado, los pines de presión corresponden a los puntos de muestreo mientras que los marcadores en estrella corresponden a las zonas que permiten el fácil acceso del equipo para la correcta toma de muestras. Shore Access S1 se refiere a la entrada al lago por el pueblo de Pari, más próxima a su delta. Shore Access S2 se refiere al acceso por pueblo de Ondores, el cual presenta un pequeño muelle para la partida de pequeñas lanchas y

finalmente Shore Access 3 se refiere al acceso al lago por el pueblo de Carhuamayo el cual ofrece un muelle para salida de embarcaciones más grandes.

Para la toma de muestras se siguió las sugerencias establecidas por el Protocolo de Monitoreo de la Autoridad Nacional del Agua (Hídricos, 2016). Las muestras fueron conservadas en botellas de polietileno limpias de un litro. Una vez llenada el frasco, se mide la concentración de iones hidrógeno H^+ , temperatura y nivel de TDS. Luego, esta se preservó con ácido nítrico HNO_3 . Se añadió tanto ácido de modo que el Ph de preservación se mantuvo por debajo de 2.

Finalmente fueron colocadas en un cooler para mantener la temperatura. Los resultados son mostrados en la tabla, en ella todos los puntos de muestreo evidenciaron niveles de plomo por encima de los estándares de calidad ambiental para consumo humano, irrigación y conservación de ecosistemas. Con el objetivo de mejorar el análisis de la contaminación del ecosistema lacustre, se sugieren estudios en el tiempo debido a que los resultados de los informes técnicos elaborados por el ANA sugieren una naturaleza cambiante del estado de contaminación por especies de plomo (II).

Tabla 34. Puntos de muestreo en el Lago Chinchaycocha (coordenadas UTM)

Zona UTM	Estación	Este	Norte	Zona UTM	[Pb ²⁺] ppm
18	Pari	365668.86	8787669.46	18	0.1368
18	Mantaro	360841.52	8789293.98	18	0.1280
18	LChin 3	372134.57	8782732.88	18	0.1192
18	LChin 5	379020.54	8781178.67	18	0.1280
18	LChin 6	378670.03	8784372.36	18	0.1016

SISTEMA REMOTO DE MEDICIÓN Pb^{2+}

El equipo fue construido para la detección de plomo in-situ. Facilitará un adecuado seguimiento a la operación del prototipo boya descontaminadora.

Los métodos más aceptados para detección de plomo están mostrados en la tabla 35. Las tres primeras técnicas son confiables con un límite de detección muy pequeño pero requieren de equipos especializados, generalmente de laboratorio, lo cual no sería adecuado para cumplir con las condiciones de portabilidad del proyecto. Existen otro tipo de técnicas como la detección electroquímica cuyos trabajos reportados han logrado lecturas de la especie en estudio con límites de detección aceptables. En base a los logros alcanzados y las condiciones dadas para el proyecto, la detección electroquímica es la más adecuada para nuestra aplicación, además se tienen electrodos comerciales.

Por otro lado, se conoce que es posible debido a los fenómenos de óxido reducción que se dan en la doble capa de los electrodos electroquímicos, que la detección de un analito pueda ser interferida por otro agregando ruido a la respuesta de corriente. Por eso se debe elegir un electrodo que sea selectivo a Pb^{2+} . Además, que el cuerpo del electrodo sea resistente al movimiento generado por pequeñas vibraciones (cuerpo plástico).

Tabla 35. Métodos para detección de plomo (II) en medio acuoso confiables

Método de determinación	Límite de detección	Referencia
Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)	0.6 ppb	(Creed, Brockhoff, et al., 1996)
Espectroscopía de Emisión Atómica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-AES)	42 ppb	(Martin et al., 1996)
Mufla de Grafito para Espectrometría de Adsorción Atómica (GFAAS)	0.7 ppb	(Creed, Martin, et al., 1996)
Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)	20 ppb	(Menis & Rains, 1970)

Método Electroquímico para detección de Pb^{2+}	0.17 ppm	(Figueiredo-Filho et al., 2012)
	4.14 ppb	(Jacobi et al., 2012)
	0.83 ppb	(F. Li et al., 2011)
	0.04 ppb	(W. Li et al., 2014)

Luego de evaluar diversos electrodos comerciales se elige el dispositivo Oakton Lead Pb^{2+} Ion-Selective Electrode (ISE) modelo WD-35802-24 con rango de detección de 0.2-20,700 ppm el cual se caracteriza por ser un equipo comercial, barato y robusto.

Por otro lado, para la toma de muestras fue necesario calibrar el equipo de medición con estándares de plomo de concentración 1, 3 y 5 ppm. La curva de calibración sigue la ecuación de Nernst la cual expresa una relación lineal entre el voltaje registrado (mV) y la concentración de soluto (ppm). El chi-cuadrado del ajuste $r^2= 0.9774$ la cual es aceptable para las respectivas mediciones.

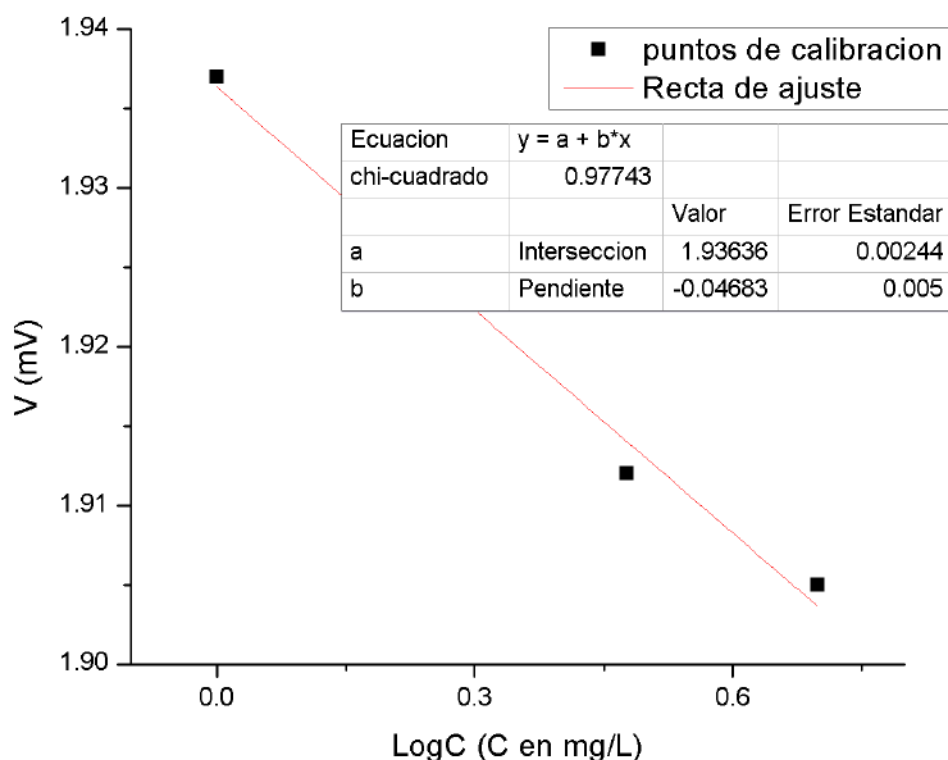


Figura 53. Calibración del sensor de plomo para medición remota

El diseño de celda y sistema de fluidica se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones del electrodo (figura 36). El amplificador debe tener un rango de medición de 0.1mV. Existen diversas opciones en el mercado, no obstante se elige el modelo CA3140 por la necesidad de utilizar un hardware abierto. Las mini electroválvulas y la bomba se pueden controlar utilizando relés electromagnéticos. Los módulos de 4 relés para Arduino® son bastante comunes y confiables. Como el sistema debe ser portable y presentar la opción de que un usuario remotamente pueda activar la medición y recibir el dato de la concentración de Pb²⁺, se sugirió el uso de la red de celular de manera que el usuario pueda enviar un mensaje SMS, el equipo luego de recibir el SMS activa las bombas, llena la celda y realiza la medición obteniendo un valor de voltaje el cual es enviada al usuario.

El módulo Adafruit Phona® es el adecuado, dispone de control serial con nivel TTL y trama RS-232. El microcontrolador utilizado será un Arduino DUE el cual cumple con las condiciones del trabajo; posee un ADC de 12 bits, puertos RX/TX con trama de RS232, uno para el módulo GSM Adafruit Phona® y otro de reserva para conexión a una computadora en caso se requiera un diagnóstico off-line del sistema. Se elaboró un programa para la implementación del sistema, no es objetivo del presente trabajo.shimadzu

Tabla 36. Materiales para la fabricación del módulo detector de Pb²⁺

Material	Descripción
Microcontrolador	Arduino DUE.
Batería para microcontrolador	Batería 9V recargable.
Modem GSM	Adafruit Phona ® SIM800L.
Batería para Modem	Batería Li-Po 3.7V 2000mAh.
Módulo de Relés	Tablero de 4 relés Arduino.
Amplificador	Amplificador de sonda pH para Arduino.
Electrodo	Oakton WD-35802-24.
03 Mini-electroválvulas	Mini-electroválvulas, normalmente cerradas 12V.

01 Mini-bomba	Mini-bomba 12V.
Celda de muestreo y fluídica	Según diseño.
Módulo para alimentación	Módulo Down-voltage 12V a 5V.
Cableado y encapsulado	Cables de cobre varios y caja de ABS.
Manguera y conectores	Manguera y conectores de rosca de 0.5cm de radio interno.
Filtro de agua	Filtro con malla menor a 1mm.

Las consideraciones energéticas finales indican que se necesita una fuente de poder de 12V 2.5A para el sistema de relés, electroválvulas y bomba; otra fuente de poder de 3.3V 2.5A para el modem GSM y una batería de 9V que alimente al microcontrolador y amplificador. Se puede reducir a una batería de 12V 6A (obtenida de la batería de auto) y una batería recargable de 9V para alimentación exclusiva del microprocesador y amplificador.

Dada la celda muestreo y el sistema de fluídica, se determina que para un trayecto de 1.2m de mangueras 0.5mm de diámetro interno se necesita activar la bomba por lo menos 5 minutos. Entonces, se establece una potencia de 72W con una energía demanda de 6Wh por cada vez que el operador desee medir especies Pb^{2+} con el equipo.

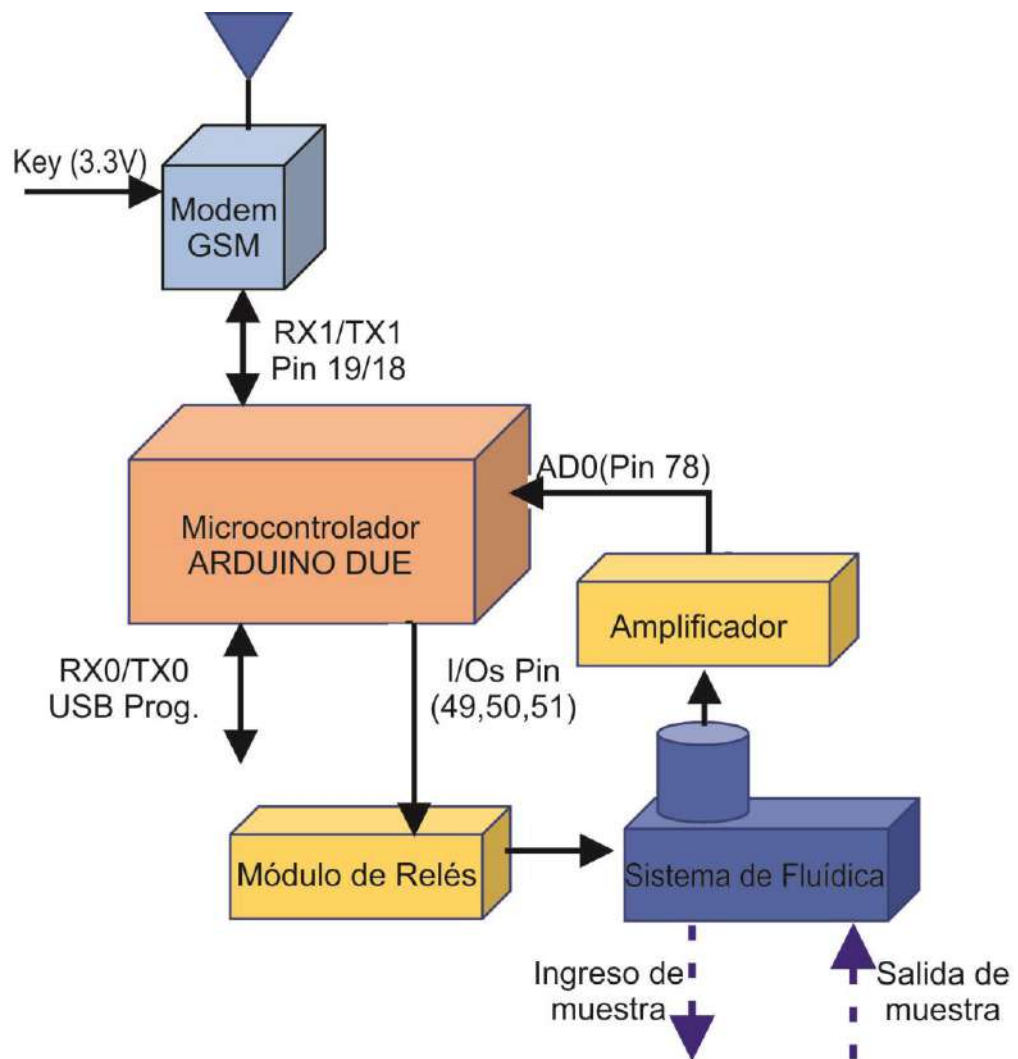


Figura 54. Diseño integrado utilizando diagrama de bloques. Sistema Remoto de medición de Pb^{2+} en agua