UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Máster Titulado:

"**LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN."**

Realizado por:

ING. ELIANA MARGARITA VÁSQUEZ ZAMORA

Director del proyecto:

Ing. Katty Verónica Coral Carrillo, MSc.

Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 18 de febrero, de 2019

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, ELIANA MARGARITA VÁSQUEZ ZAMORA, con cédula de identidad # 100271131-3, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

FIRMA
ELIANA MARGARITA VÁSQUEZ ZAMORA

100271131-3

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

"LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN."

Realizado por:

ELIANA MARGARITA VÁSQUEZ ZAMORA

Como requisito para la obtención del Título de: MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Ha sido dirigido por la profesora

KATTY VERÓNICA CORAL CARRILLO

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

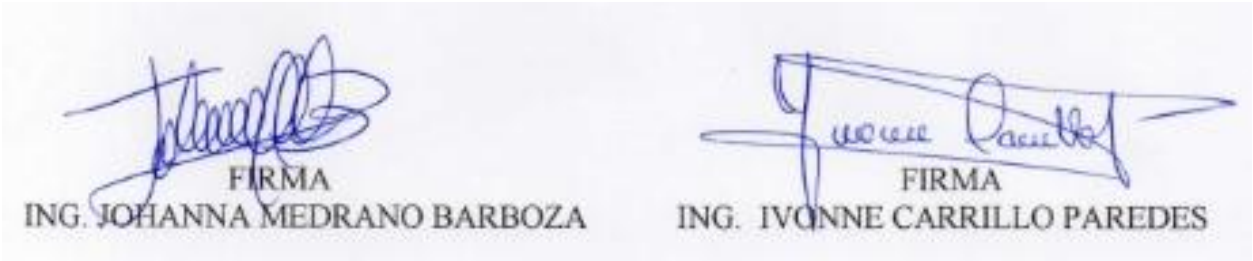
ING. JOHANNA LUCIA MEDRANO BARBOZA

ING. EMMA IVONNE CARRILLO PAREDES

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



Quito, 19 de febrero de 2019

DEDICATORIA

El presente trabajo abajo investigativo lo dedico principalmente a mi hija que es mi fuente de inspiración y el motor que impulsa mi vida y me ayuda a esforzarme cada día para cumplir con las metas propuestas.

A mi madre por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos de mi vida, en la que siempre confiaré. Te amo mucho Mamita.

Finalmente, a todas las personas especiales que forman parte de mi vida, que me han acompañado en esta etapa y que han aportado con mi desarrollo profesional y como ser humano.

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

AGRADECIMIENTO

Al finalizar esta nueva etapa de mi vida quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación del presente trabajo de investigación y contribuyeron con su aporte durante el proceso de investigación y de redacción.

Agradezco a mi directora de tesis Katty Coral y a Marcelo Cabrera por haberme considerado en este proyecto de investigación ya que gracias a su apoyo logramos desarrollar el presente trabajo, también agradezco a los miembros del tribunal Emma Ivonne Carrillo y Johanna Medrano que aportaron a la culminación del presente trabajo.

A la UISEK y su programa de maestría, a los profesores y compañeros de maestría y a todas las personas que hicieron posible llegar a terminar mis estudios con éxito.

¡Gracias a todos!

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

Para someter a:

To be submitted:

Lixiviación de metales pesados de los sedimentos de la Laguna de Limoncocha en agua ultrapura para determinar su movilidad con fines de conservación.

Eliana Vásquez[1], Katty Coral[1*]

[1] Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.

*AUTOR DE CORRESPONTENCIA: Katty Coral, Msc., Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Ambientales y Naturales, Quito, Ecuador.

Teléfono: +593-9-83084617; email: katty.coral@uisek.edu.ec

Título corto o Running title: Determinación de movilidad de metales pesados hacia agua ultrapura.

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

RESUMEN.

En la presente investigación se establecieron los niveles de movilidad de metales pesados, mediante ensayos de lixiviación en dos diferentes tiempos de agitación, desde los sedimentos de la laguna de Limoncocha hacia agua ultrapura con fines de conservación. Se consideraron tiempos de agitación de 0,01 a 24 y de 24 a 96 horas y se realizaron análisis de laboratorio que corresponden al ensayo de lixiviación según EPA 1311. Los ensayos cuantitativos de determinación de metales se realizaron mediante ICP-MS aplicando el método EPA 6020 B. Las curvas de ajustes de niveles de movilidad y los gráficos de concentración vs tiempo confirman la existencia de movilidad de Cadmio, Plomo, Bario, Vanadio, Cromo, Estaño, Níquel y Zinc desde el sedimento, hacia agua ultrapura y estos valores tienden a estabilizarse a las 96 horas de agitación. Adicionalmente, los resultados de pH, Eh y los diagramas de Pourbaix para cada uno de los metales confirman que los mismos se encuentran en solución y en su mayoría están presentes en el agua de la laguna de Limoncocha en forma de complejos o sales.

Palabras clave: lixiviación, metales pesados, movilidad, sedimentos, Limoncocha.

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

ABSTRACT.

In the present investigation were established the levels of mobility of heavy metals from the sediments of Limoncocha lagoon to ultrapure water by leaching tests in two different agitation times, for conservation purposes. Agitation times selected were 0,01 to 24 h and 24 to 96 h. leaching test analyses were carried out according to EPA 1311. Quantitative tests for metal level determination were carried out by ICP-MS Applying the method EPA 6020 B. Mobility levels trend charts and concentration vs time curves confirmed that there is mobility of cadmium, lead, barium, vanadium, chromium, tin, nickel and zinc, from sediments to the ultrapure water and the values tend to stabilize when reaching the 96 hours of agitation. In addition, the results of pH, Eh and the diagrams of Pourbaix for each metal confirmed that they are in a soluble phase and mostly are present in the form of complexes or salts in Limoncocha lagoon.

Key words: leaching, heavy metals, mobility, sediments, Limoncocha.

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

INTRODUCCIÓN.

La contaminación en el agua puede darse de forma natural, mediante procesos como la descomposición orgánica o por procesos antrópicos como actividades extractivas agrícolas y/o minerales. (Nas y Berktay, 2006). Dentro de las sustancias antropogénicas contaminantes que ingresan en el medio acuático se destacan los metales; estos llegan principalmente a través de efluentes generados a partir de minería, actividades petroleras, descargas industriales y urbanas. (Ghrefat y Yusuf, 2006; Krupadam et al., 2006; Cáceres et al 2013).

El comportamiento ambiental de los metales depende críticamente de su forma química, influyendo en la biodisponibilidad y toxicidad para los organismos. Así mismo las características del medio receptor tanto acuoso como sólido, condicionan la movilidad de los metales en la interfase agua/sedimento. (Cáceres et al., 2013)

Los metales pesados se pueden discriminar de otros contaminantes como los orgánicos porque estos no los pueden degradar los microorganismos, seres vivos (plantas, animales), tampoco por tratamientos químicos. Se bioacumulan en tejidos de seres vivos y se pueden movilizar a considerables distancias del lugar en donde inicialmente se encontraron evidencias de contaminación. (De La Cruz - Landero et al., 2013).

En el caso de la Reserva Biológica de Limoncocha (RBL), se han realizado estudios de línea base que han permitido determinar la presencia de trazas de metales pesados en el agua, sedimento y suelo.

Las áreas protegidas con alguna figura de protección ambiental como por ejemplo Parques (Natural, Rural, Periurbano Regional, Nacional) y Reservas (Nacional, Natural de la Biosfera, Biológica), en particular los lagos, no están exentas de verse afectadas directa o indirectamente por fuentes de contaminación antropogénicas y naturales de metales, tanto en agua, sedimentos como en suelos adyacentes. (Dudley, 2008)

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), el término Área Protegida se define como: "*Un espacio geográfico claramente definido, reconocido y administrado, a través de medios legales u otros medios efectivos, para lograr la conservación a largo plazo de la naturaleza con sus servicios ecosistémicos asociados y culturales*" (Dudley, 2008).

Rodríguez - Jorquera et al (2017) afirman que en la actualidad no existen suficientes estimaciones que permitan establecer el impacto de la contaminación química sobre la biodiversidad en áreas protegidas de Latinoamérica, siendo los ecosistemas acuáticos los más vulnerables en términos de preservación. (Rodríguez – Jorquera et al., 2017)

Como soporte a la presente investigación se contó con resultados de análisis de metales pesados realizados en muestras de agua, suelo y sedimento de la RBL en diferentes tiempos, así se dispone de datos para mercurio, aluminio, (Agurto D., 2016), arsénico, manganeso (Carillo D 2016), calcio, magnesio, sodio, potasio, cromo y mercurio, (Bilbao J, 2017), cadmio y níquel, (Cerón M, 2016), arsénico, bario, manganeso y plomo,(Estrella,2017), aluminio, cobre, hierro y vanadio, (Ochoa J,2017), cadmio, cobalto, níquel, zinc. (Robalino R, 2017).

Los elementos químicos (metales pesados) se consideran de interés ambiental por las consecuencias directas hacia el ecosistema, las diferentes cantidades de metales pesados tanto en agua superficial, suelo y sedimento bentónico sirven para confirmar niveles de toxicidad y su capacidad de ingresar en la cadena trófica. (Agurto, 2016, p. 12). La toma de muestras y análisis de los niveles de metales pesados en agua superficial, suelo y sedimento, principalmente los que se producen por intervención del ser humano, son de importancia para obtener valores respecto al estado de conservación del ecosistema. (Agurto, 2016, p. 12-13).

Los metales pesados están considerados como los contaminantes más peligrosos que se encuentran en los ecosistemas debido a sus niveles de persistencia y toxicidad, en cuanto a

los metales de gran interés ecotoxicológico se tiene: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn. (Alcivar Mariana, Mosquera Jessica, 2011).

En gran parte de los seres vivos, un nivel de concentración por encima de los límites máximos permitidos es perjudicial. (Alcivar Mariana, Mosquera Jessica, 2011). Los metales pesados en su gran mayoría son tóxicos, y lo que los hace perjudiciales no corresponde a sus cualidades fundamentales, pero si a los niveles en los que se encuentran presentes y los complejos que forman en determinados lugares. (Alcivar Mariana, Mosquera Jessica, 2011).

En cuanto a la información de este estudio, para cada uno de los metales considerados se realizó, la siguiente descripción:

Cadmio

El cadmio(Cd^{+2}), en su forma de ion, está combinado a otros iones como el oxígeno, cloruros o sulfuros.

El cadmio es perjudicial para órganos y tejidos como son: riñón (disfunción renal, tubular, proteinuria e insuficiencia renal crónica), corazón (arterioesclerosis aórtica y coronaria, incremento en colesterol y ácidos grasos); huesos, testículos, placenta y sistema nervioso central y periférico. (Cabrera, 2018, p.7).

Plomo

El Plomo se encuentra en la litosfera y, está presente en la corteza terrestre en una cantidad aproximada de 15 µg/g. También puede encontrarse formando sulfuro de plomo PbS (galena), carbonato de plomo $PbCO_3$ (cerusita) y sulfato de plomo $PbSO_4$ (anglesita). El plomo es un metal casi inmóvil y estaría adsorbido en sitios no saturados de ríos, materiales arcillosos y materia orgánica. Cuando se incrementa el valor de pH puede precipitar como plomo $Pb(OH)_2$. Un límite de tolerancia para la presencia del plomo en el agua, es el que

corresponde a la formación de hidróxido y carbonato soluble. Para los intervalos de pH entre 5 y 7, el Pb puede adsorberse sobre las partículas arcillosas. Se puede encontrar para el plomo variedad de especies químicas: Pb (0) metal, Pb (I), Pb (II) y Pb (IV). Las especies mencionadas y posiblemente a excepción del Pb (I), son de interés para el medio ambiente. En mayor proporción el Pb que se encuentra en el ambiente proviene de actividades mineras. (Jumbo, 2009).

El plomo puede ingresar en el organismo por diferentes vías como la absorción intestinal por ingestión, por inhalación ingresa a los pulmones en el caso de la piel por adsorción, en el cuerpo también el plomo ingresa por vía sanguínea hacia tejidos y órganos, este es absorbido acumulándose en sitios como huesos, dientes, hígado, pulmón, riñón, cerebro y bazo. (Cabrera, 2018, p. 6,7).

Vanadio

El vanadio como elemento se encuentra en la superficie terrestre y está en el lugar 22 que corresponde a todos los elementos con mayor presencia de 0,014 a 0,02%. (J. J. RODRÍGUEZ-MERCADO, 2006). El Vanadio puede estar incluido en procesos biológicos como anión o catión, para las condiciones fisiológicas mayor presencia de vanadato ($H_2VO_4^-$) y catión vanadilo (VO^{2+}), también se puede encontrar otras formas de cationes (VO^{3+}, VO_2^+) y aniones (HVO_4^{2-}, $VO_4O_{12}^{4-}$ y $V_{10}O_{28}^{6-}$). Para un resultado de pH cercano a 7 V^{III} está presente principalmente como catión V_3^+ y formando complejos en el ambiente celular. En condiciones ácidas de pH 3.5, el ion vanadilo es muy estable en soluciones básicas predomina el ion ortovanadato (VO_4^{3-}) que es muy similar por su geometría al fosfato (PO_4^{3-}). (J. J. RODRÍGUEZ-MERCADO, 2006).

El Vanadio se obtiene como resultado del proceso de la de la refinación del petróleo. Para la obtención de las diferentes sustancias químicas se utiliza el pentóxido de vanadio, entre estas sustancias está el ácido sulfúrico, se usa en el endurecimiento del acero, elaboración de pigmentos en fotografía y en insecticidas y se observan cantidades importantes en la leche, mariscos, cereales y vegetales. (Klaassen, Curtis D., and John B, 2001). La toxicidad del vanadio se limita en su mayoría a las vías respiratorias. Enfermedades como bronquitis y bronconeumonía están presentes en puesto de trabajo en los que existe exposición a especies químicas de vanadio, en cuanto a la piel y ojos también se considera que se debe a niveles de exposición en puestos de trabajo.

Asimismo, las molestias gastrointestinales, náuseas, vómitos, dolor abdominal, palpitaciones cardiacas, temblor, depresión nerviosa y daño renal se han relacionado de igual manera a niveles de exposición industrial. (Klaassen, Curtis D., and John B, 2001)

Bario

Es un metal presente en la naturaleza, ocupa el 0,04 % de la superficie de la tierra. Se encuentra principalmente en minerales como barita (sulfato de bario, $BaSO_4$) y witherita (carbonato de bario, $BaCO_3$). (Fuentes, 2017). El bario está considerado como nocivo por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1990) y por la Agencia de Protección Ambiental Americana como peligroso (EPA, 1990). Para el medio ambiente natural la cantidad de bario es muy baja, niveles altos de bario pueden estar presentes en suelo y alimentos. Los mayores riesgos corresponden a los derivados de sulfato de bario o carbonato de bario a través de la respiración. (Álvarez, Acevedo Barrios, & Severiche Sierra, 2013)

Dependiendo de la solubilidad de los compuestos que forma el bario al solubilizarse con el agua, producen efectos negativos en la salud humana, la ingesta de bario soluble en gran cantidad puede provocar parálisis y la muerte en algunos casos. (Álvarez et al., 2013)

Cromo

Se encuentra distribuido en la superficie de la tierra y de acuerdo a la tabla periódica con valencias de 2^+ a 6^+, la alimentación es la mayor vía de ingreso del cromo al organismo. (Alcivar M., Mosquera J. 2011). En la naturaleza el cromo suele encontrase con valencia 3^+, en cuanto al hexavalente en su gran mayoría se genera a través de actividades humanas. Doménech (1995).

El ($Cr_2O_7^{-2}$), ion dicromato tiene una alta capacidad oxidante y se estabiliza en medios ácidos. La especie mayoritaria es el cromato (CrO_4^{2-}) que corresponde a valores cercanos a la neutralidad y su capacidad oxidante es menor. (Jumbo, 2009).

Otras especies que se obtienen a través de la reducción de Cr VI ($Cr_2O_7^{-2}$, $HCrO_4^-$ o CrO_4^- (correspondiente a los diferentes valores de pH del medio), convirtiéndose en Cr^{3+}, que puede precipitarse a hidróxido $Cr(OH_3)$, en valores de pH de 5 y 8 se encuentra en formando coloides, pudiendo encontrarse suspendidos o adheridos a otras partículas sólidas como son arcillas y limos, el Cr^{3+} se mantiene en suspensión a pH menor a 5 es decir se mantiene en solución y no se precipita. El cromo trivalente que está presente en la naturaleza se considera que no causa efectos en la salud a diferencia del hexavalente que es tóxico. (Jumbo, 2009).

Entre las afectaciones más relevantes causadas por este elemento corresponden a la piel (ulceraciones), cavidades nasales y senos paranasales (cáncer), leucemia y cáncer de pulmón. Se conoce que el cromo se bioacumula generalmente en la piel, pulmones, músculos, grasa. En el hígado, baso, espina dorsal, cabellos, uñas y placenta en mayor cantidad. (Fuentes Erika, 2017).

Níquel

Este elemento puede encontrarse principalmente en el agua en disolución y en menor cantidad formando especies químicas de baja estabilidad, el níquel en cierta proporción se

absorbe en las partículas sólidas. El Ni^{2+} se moviliza con facilidad en el agua formando sales solubles. En la superficie de la tierra se encuentra en una proporción de 80 µg/g. (Jumbo, 2009).

Los niveles de exposición a los complejos que puede formar el níquel y que corresponde a riegos para el hombre producen principalmente: enfermedades respiratorias, cáncer de las cavidades nasales, de pulmón, rinitis, sinusitis; (Fuentes Erika, 2017)

Estaño

Los compuestos de Estaño son poco frecuentes en la naturaleza y generalmente se encuentran asociados a otros metales como el Zn y el Pb, presenta dos estados principales de oxidación, de forma que el Sn^{4+} forma varios complejos clorurados, así como el oxalato, de alta estabilidad, mientras que el Sn^{6+}, también forma varios complejos con cloruro, con oxalato, con fluoruro y con sulfuro, así mismo muy estables. Finalmente, tanto los sulfuros estannosos (Sn^{4+}) como estánnicos (Sn^{6+}) son ligeramente solubles.

A parte de las pequeñas cantidades de estaño naturalmente aportadas al agua, otra fuente importante de este metal a los cauces naturales, es el asociado a las formulaciones de pesticidas.

Desde el punto de vista toxicológico, tanto el Sn orgánico como el inorgánico son pobremente adsorbidos por el tracto intestinal, siendo rápidamente excretados y no acumulándose en los tejidos. De acuerdo con las evidencias existentes, el Sn no muestra acción teratogénica o embriotóxica en ensayos de laboratorio en vivo, aunque niveles excesivos de Sn en los alimentos pueden provocar irritación gástrica aguda en el ser humano. (Marín, 2003).

Zinc

El Zinc se encuentra presente en cauces naturales (superficiales y subterráneos), se encuentra presente en la corteza terrestre en asociación con otros elementos (Fe, Cu, Cd, Pb) y formando otros complejos como sulfuro de zinc y de forma más abundante como Zn^{2+}, $Zn(OH)^{+}$ y $ZnCl_3^{-}$. Forma especies poco solubles (hidróxidos y carbonatos) que se encuentran principalmente en agua superficial en los sedimentos y en el lecho. (Jumbo, 2009).

Al ser necesario para el hombre, el zinc puede encontraras en aminoácidos y enzimas necesarias para la digestión de proteínas, metabolismo del etanol, del Ca y el P, etc. Está presente además en otras funciones vitales como el desarrollo encefálico, crecimiento, conducta, reproducción, funciones sensitivas, inmunoresistencia, insulina, etc. El zinc no es toxico sin embargo a cantidades elevadas es posible que forme complejos con el cadmio mismo que es muy tóxico y en el agua superficial cantidades elevadas (Zn), están asociadas a la presencia de cadmio. (Marín, 2003).

Un aporte importante a esta investigación corresponde el estudio realizado por Cabrera, quien llevó a cabo la determinación de coeficientes de transferencia de masa de metales pesados, realizando el ensayo de lixiviación en dos tiempos diferentes (24 horas y 96 horas) y una vez terminado este proceso, se determinó la concentración de los metales directamente en los sedimentos para establecer la pérdida de concentración de los mencionados metales. (Cabrera M, 2018).

El Objetivo general planteado consistió en determinar la movilidad de metales pesados de los sedimentos de la laguna de Limoncocha a través de ensayos de lixiviación y análisis químicos, con fines de conservación. Para ello se llevaron a cabo ensayos de lixiviación y tiempo de agitación adecuado para establecer la movilidad de metales pesados desde los sedimentos hacia agua ultrapura, utilizando el método EPA 1311. Las concentraciones de los metales pesados desde los sedimentos hacia agua ultrapura se determinaron en diferentes

tiempos de agitación y en 5 puntos de la laguna de Limoncocha para la obtención de datos de concentración vs tiempo. Finalmente, mediante el ajuste de la curva se encontraría la movilidad de metales pesados desde los sedimentos hacia agua ultrapura en la zona de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Área de estudio

El área de estudio para la presente investigación, corresponde a la Reserva Biológica Limoncocha RBL, ubicada en la provincia de Sucumbíos, cantón Shushufindi y que corresponde a una extensión de 4163 hectáreas conformada por la laguna Capucuy y la laguna Negra o Yanacocha, bosques húmedos tropicales, zonas de pantano y humedales que albergan una gran diversidad de especies de flora y fauna (Moscoso, 2013).

El Ministerio de Agricultura y Ganadería el 23 de septiembre de 1985 la declaró como Reserva Biológica. (MAE, 2015). Corresponde también a un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (IBA) y de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Sitio RAMSAR), (Armas y Lasso, 2011).

La RBL comprende varios aportantes del Río Napo y la Laguna de Limoncocha, sus cuencas principales incluyen; el Río Capicuy (actualmente conocido como Laguna de Limoncocha), Río Jivino, Río Itaya, Río Napo y Río Indillana, cuyas cabeceras se localizan en zonas intervenidas fuera de la Reserva, donde existen fuentes potenciales de contaminación que incluyen aguas servidas de zonas urbanas y de población dispersa, actividades petroleras y agricultura (MAE, 2002).

Es necesario aclarar que la RBL es de gran importancia debido a que es una de las pocas reservas con intervención antrópica, ya que se pueden encontrar comunidades que están ubicadas en la zona de amortiguamiento. Estas comunidades son: Limoncocha, Santa Elena, Jivino, Itaya, Indillama y Pompeya. (Ortiz, et al., 2012, ECOLAP y MAE).

.

Figura 2. Área de estudio con ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos (Fuente: Google maps Elaboración: Cabrera, 2018)

Metodología de campo

Se recolectaron las muestras de sedimentos de la laguna de Limoncocha según la metodología establecida por USGS (2009) y USGS (2006). La toma de muestras se realizó en los cinco (5) puntos establecidos en investigaciones anteriores de la UISEK, descritos en la Tabla 1. Para dicha toma se utilizó un nucleador de acero inoxidable de tipo “core sampler”, el cual se dispone en la Estación Científica de la UISEK en la Reserva Biológica Limoncocha.

En la Laguna de Limoncocha es posible tener en cuenta dos grupos de puntos de muestreo: Un primer grupo que incluye tres puntos de muestreo en un eje transversal a la laguna, estos puntos son: Caño (1), Zona profunda (4) y Muelle (5). Un segundo grupo

incluye dos puntos de muestreo Desembocadura Pishira (2) y Desembocadura Playayacu (3), mismos que fueron establecidos por la UISEK para evaluar la evolución en la concentración de los metales correspondientes a aportes de los afluentes superficiales a la laguna, presentando mayor movilidad de sus aguas.

Tabla 1. Puntos de muestreo establecidos por la UISEK.

		Coordenadas UTM		
Punto	**Nombre**	X (m)	Y (m)	h (m.s.n.m.)
1	Caño	18M0322450	9957026	244 m.
2	Desembocadura Pishira	18M0321523	9957107	242 m.
3	Desembocadura Playayacu	18M0320315	9956422	243 m.
4	Zona profunda	18M0320464	9955756	240 m.
5	Muelle	18M0319828	9954858	243 m.

El propósito del muestreo de sedimentos es la obtención de una parte de material lo suficientemente pequeña como para extraerla y transportarla, pero suficiente para el proceso de análisis y que pueda representar de forma apropiada al material muestreado. (Standard Methods, 2012).

Metodología de análisis

Para la investigación realizada se emplearon muestras de sedimentos tomadas en la laguna de Limoncocha. Una vez realizada la toma muestras, estas se trasladaron inmediatamente a la ciudad de Quito para dar inicio a su preparación, previo a la realización del ensayo de lixiviación y su posterior análisis, para lo cual se siguieron los pasos recomendados por USGS (2005). Al ser muestras que se obtienen con un alto contenido de

humedad, se realizó un secado según metodología USEPA (2014), y posteriormente se realizó un proceso de molienda y tamizado (Universidad de Concepción, 2007).

Se realizó la determinación de la granulometría en los sedimentos de los cinco puntos de la laguna de Limoncocha, y se procedió de acuerdo a la metodología propuesta por Aragón (2013, pp. 42-45). El objetivo de este análisis fue encontrar las condiciones óptimas para la movilidad de los metales pesados de los sedimentos hacia agua ultrapura, para el ensayo de lixiviación se utilizó como referencia el método EPA 1311, las muestras se agitaron durante un período de 0.01 -24 horas y de 24-96 horas. (USEPA, 1992).

Para el proceso de agitación se construyó un equipo de rotación continua, que se describe en la siguiente imagen:

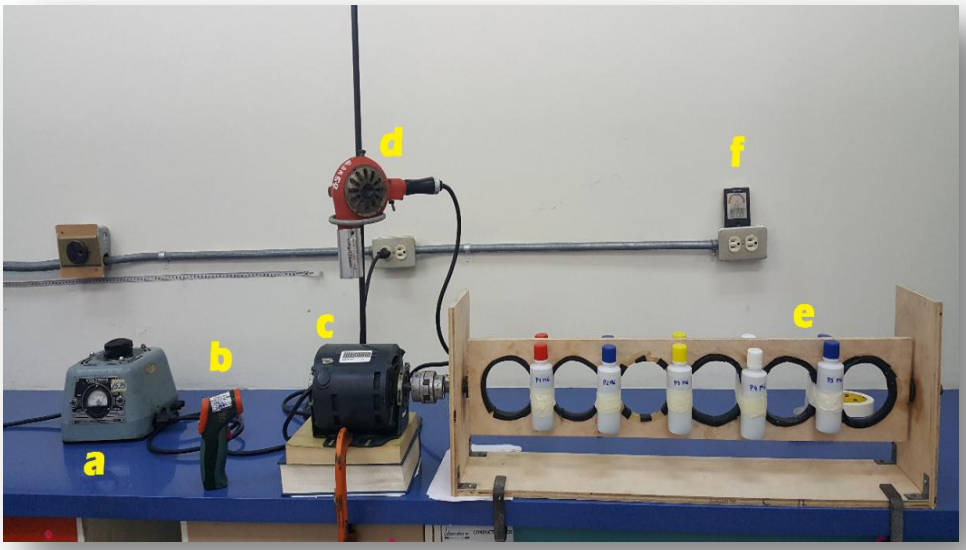


Figura 3. Esquema del sistema de agitación según norma USEPA 1311.

Fuente: (Cabrera, 2018).

Se incluye una descripción de los componentes del equipo de agitación

Tabla 2. Componentes del equipo de agitación.

ITEM	EQUIPO	FUNCION
A	Regulador de voltaje	Obtener una agitación constante a 30 RPM

ITEM	EQUIPO	FUNCION
	de 110 V	
B	Termocupla de IR	Verificar la temperatura de pared del motor a máximo 60ºC para evitar daño del mismo
C	Motor 1/3 Hp	Permitir el giro del sistema de agitación
D	Ventilador	Mantener la temperatura del motor por debajo de los 60ºC
E	Porta muestras para agitación	Sostener a los recipientes con las muestras. Puede sostener 10 frascos de 125 mL cada uno o 6 frascos de 1 L cada uno
F	Termohidrómetro	Medir y verificar la Temperatura ambiente a la cual se da el proceso de agitación

Fuente: (Cabrera, 2018).

Para realizar el proceso de agitación, se colocaron 20 gramos de muestra de sedimento previamente tamizada en 100 mL de agua ultrapura, de acuerdo al esquema de la Figura 3. El tiempo transcurrido entre la preparación de las muestras y su análisis inicial, se estimó y este corresponde al valor de tiempo inicial para el primer análisis. A continuación, se realizó la agitación continua de las muestras de sedimentos en agua ultrapura, en dos tiempos de agitación diferentes: 0.01 a 24 horas y de 24 a 96 horas.

Pasado el tiempo de agitación antes señalado, se procedió a filtrar las muestras según norma USEPA (2014); las muestras líquidas (lixiviados) se almacenaron en refrigeración antes del análisis correspondiente. Todos los ensayos se realizaron en la Escuela Politécnica Nacional. (EPN) Laboratorio de Análisis Instrumental.

La determinación de metales pesados (cadmio, plomo, vanadio, bario, cromo, níquel, estaño y zinc) en agua ultrapura para los cinco puntos de muestreo establecidos por la UISEK

en estudios anteriores se realizó en un ICP-MS (Plasma Inductivo Acoplado) y espectrometría de masas aplicando el método EPA 6020 B, en un laboratorio acreditado de la ciudad de Quito.

Para este análisis los analitos fueron detectados y cuantificados en un equipo ICP-MS, las muestras fueron preparadas según procedimientos correspondientes a la naturaleza de la muestra (digestión). (EPA 6020 B, 2014)

Una vez que se realizó el pre-tratamiento, la muestra fue inducida al plasma de argón del equipo ICP-MS, que ioniza y atomiza los compuestos metálicos a temperaturas muy altas (~ 8000 K). Los compuestos se detectan y cuantifican por espectrometría de masas. (EPA 6020 B, 2014)

Determinación de movilidad de metales pesados desde los sedimentos de la laguna de Limoncocha hacia agua ultrapura.

Con los resultados obtenidos a tiempos de agitación de 0.01 a 24 horas y de 24 a 96 horas, se realizaron los gráficos de tendencia para obtener la curva de ajuste de estos valores. Estas curvas proporcionaron información sobre la tipología de transferencia, sus causas y consecuencias.

Diagramas Eh-pH (Diagramas de Pourbaix)

Los diagramas de potencial redox-pH o diagramas de Pourbaix, están referidos a la forma estable de un metal como una función de potencial redox y pH. Son muy parecidos a los diagramas de fases de equilibrio, donde la estabilidad de varias fases se muestra como una función de temperatura y porcentaje de composición del metal. Particularmente una combinación de potencial redox y pH, en fase estable, puede ser determinado del diagrama de

Pourbaix. (De León, 2014). Para la representación en los diagramas, el potencial de reducción es graficado en el eje vertical y el pH en el eje horizontal.

Se basa en ecuaciones y en datos de solubilidad para el metal y sus especies, como por ejemplo el Fe, Fe_2O_3, $Fe(OH)_2$, Fe_3O_4, etc., en equilibrio y en condiciones estándar (generalmente agua a 25°C).

Los elementos en forma de complejos se encuentran como, cloruros, bromuros, cianuros, amoniaco, carbonatos, etc., que pueden modificar regiones de estabilidad en los diagramas de Pourbaix ya que en disolución o en sales disueltas, la formación de compuestos con el metal altamente estable. En los diagramas se encuentran nuevos dominios para especies iónicas en disolución, los cuales ocupan espacios más amplios que los correspondientes a los sistemas metal-agua a 25 ° C y en condiciones estándar. (De León, 2014).

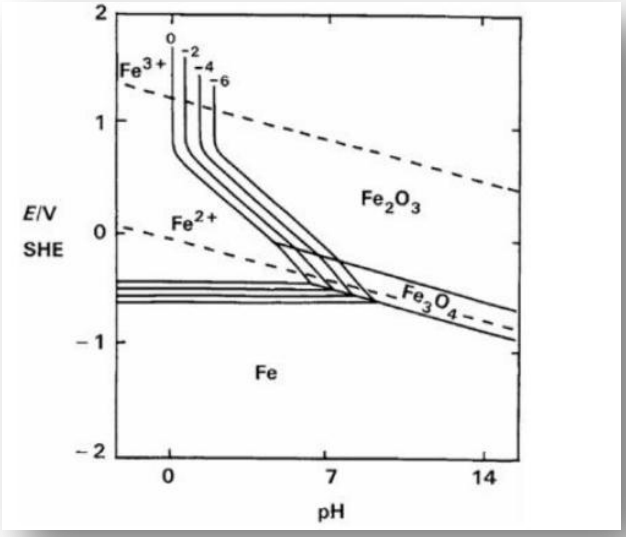


Figura 4. Ejemplo: Sistema Fe-H_2O a 25°C. (De León, 2014).

Como se puede observar, para la representación en los diagramas de Pourbaix se encuentran tres diferentes líneas, las cuales representan el equilibrio entre dos especies.

- En las líneas horizontales se indican reacciones con dependencia solamente del potencial redox.
- En las líneas verticales se indican reacciones con dependencia solamente del pH.

- En las líneas oblicuas se indican reacciones con dependencia tanto del potencial como del pH.

En todos los iones metálicos se asume que la concentración es de 10^{-6} mol por litro de solución. Con el incremento del potencial, el poder oxidante aumenta. En cuanto a las líneas de hidrógeno y oxígeno están indicadas en los diagramas por líneas punteadas. (De León, 2014). Adicionalmente en el presente trabajo se incluyeron los resultados correspondientes a mediciones de pH y Potencial Redox realizadas directamente en agua de la laguna en el año 2017.

Con esta información y en función de los diagramas de Pourbaix se identificaron las especies químicas presentes en el agua para cada uno de los metales evaluados. Se consultaron los valores de Eh-pH de la laguna Limoncocha mediante datos obtenidos en la tesis de Rodríguez (2017).

A través de la interpretación de los diagramas de Poubaix se obtuvo una representación visual de los diferentes estados de oxidación de un elemento en agua mostrado en un diagrama de Eh-pH, en donde las líneas continuas indican los valores de Eh y pH donde las concentraciones de las 2 especies en ambos lados de la línea son iguales. (Colin Baird / Michael Cann, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de metales pesados en agua ultrapura

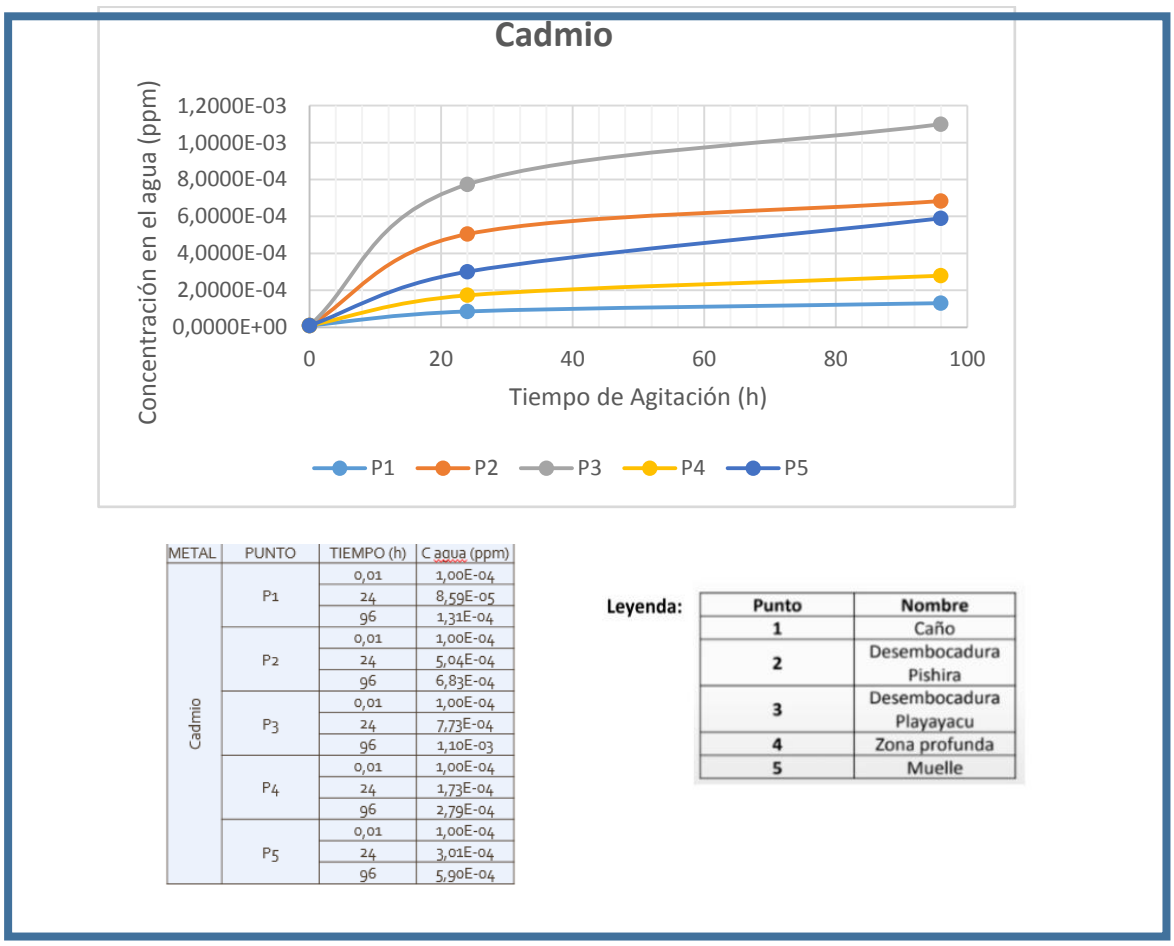
En el ANEXO 1 se incluyen los resultados del análisis de laboratorio realizado para los siguientes metales pesados: cadmio, plomo, vanadio, bario, cromo, níquel, estaño y zinc. En referencia a los resultados obtenidos, se realizaron comparaciones de concentraciones vs tiempo de agitación para confirmar la movilidad de los metales desde el sedimento hacia agua ultrapura. La alta sensibilidad del equipo empleado para cuantificar los metales en estudio,

permitió diferenciar las concentraciones obtenidas, entre los tiempos ensayados, pudiendo determinar la movilidad desde el sedimento, al agua ultrapura.

En algunos puntos no fue posible determinar si existía movilidad de metales pesados hacia agua ultrapura ya que se presentaron interferencias analíticas, en el momento del análisis y por lo tanto se reportaron como no determinados.

Es necesario mencionar que, en el análisis de los resultados obtenidos, se observa que en las desembocaduras de los ríos existe mayor concentración de metales pesados, por tratarse de zonas con mayor movimiento de sus aguas.

Para la interpretación de los resultados se elaboraron gráficas con los datos de concentración de los metales analizados en relación al tiempo de agitación, dichos resultados se muestran a continuación:



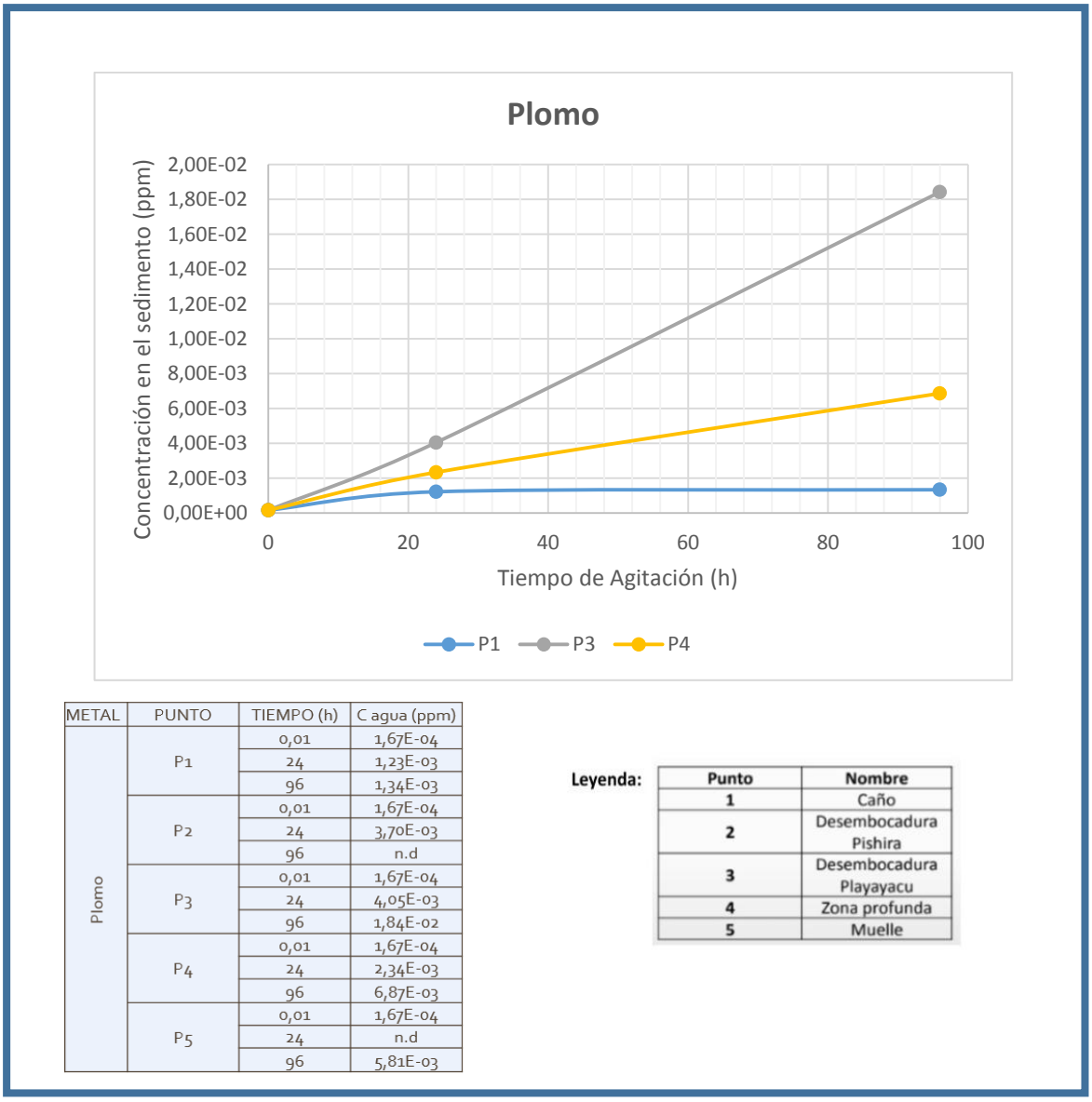
METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Cadmio	P1	0,01	1,00E-04
		24	8,59E-05
		96	1,31E-04
	P2	0,01	1,00E-04
		24	5,04E-04
		96	6,83E-04
	P3	0,01	1,00E-04
		24	7,73E-04
		96	1,10E-03
	P4	0,01	1,00E-04
		24	1,73E-04
		96	2,79E-04
	P5	0,01	1,00E-04
		24	3,01E-04
		96	5,90E-04

Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 5. Concentración de Cadmio vs tiempo de agitación.

En la Figura 5, para el análisis de Cadmio se observan concentraciones desde las 24 horas de agitación y tienden a estabilizarse a las 96 horas. Los puntos que presentan mayor concentración del metal corresponden a la desembocadura del Río Playayacu con valores de $7{,}73x10^{-04}$ (24 horas) y de $1{,}10x10^{-03}$ (96 horas), y la Desembocadura del Río Pishira con valores de $5{,}04x10^{-04}$ (24 horas) y de $6{,}83x10^{-04}$ (96 horas), en el caso de la Zona profunda corresponde al menor valor obtenido y es de $1{,}73x10^{-04}$ (24 horas) y $2{,}79x10^{-04}$ (96 horas).



METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Plomo	P1	0,01	1,67E-04
		24	1,23E-03
		96	1,34E-03
	P2	0,01	1,67E-04
		24	3,70E-03
		96	n.d
	P3	0,01	1,67E-04
		24	4,05E-03
		96	1,84E-02
	P4	0,01	1,67E-04
		24	2,34E-03
		96	6,87E-03
	P5	0,01	1,67E-04
		24	n.d
		96	5,81E-03

Leyenda:

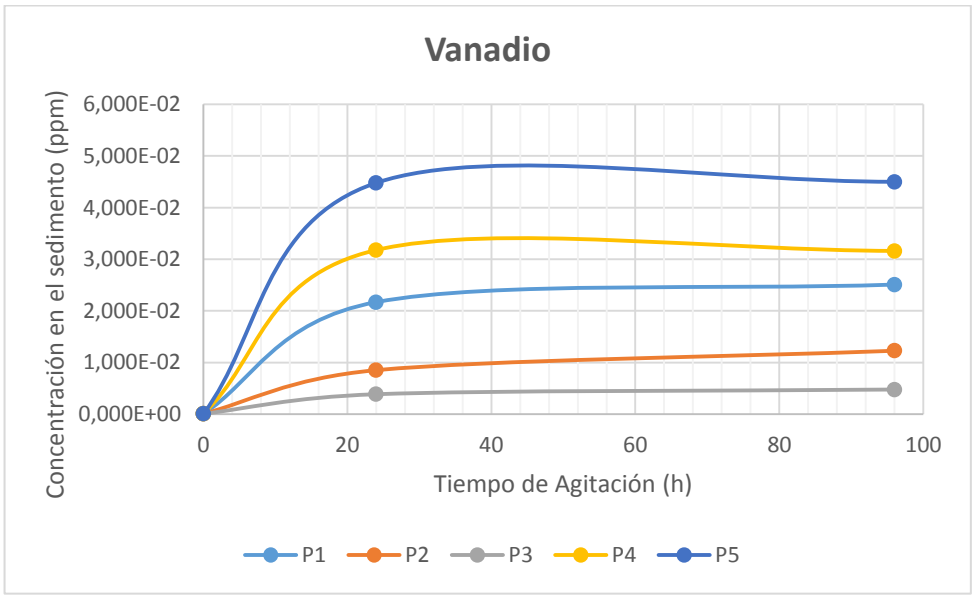
Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 6. Concentración de Plomo vs tiempo de agitación.

En la figura 6, se observa que, para el caso del plomo, por interferencias en el momento del análisis, no fue posible determinar la movilidad en el Punto 2 (Desembocadura Pishira) y en el Punto 5 (Muelle).

En cuanto a movilidad, la Desembocadura Playayacu presenta el mayor valor obtenido que es de $4{,}05 \times 10^{-03}$ (24 horas) y $1{,}84 \times 10^{-02}$ (96 horas).

En el caso del Caño los valores obtenidos en los 2 tiempos de agitación se mantienen o no presentan mayor variación.



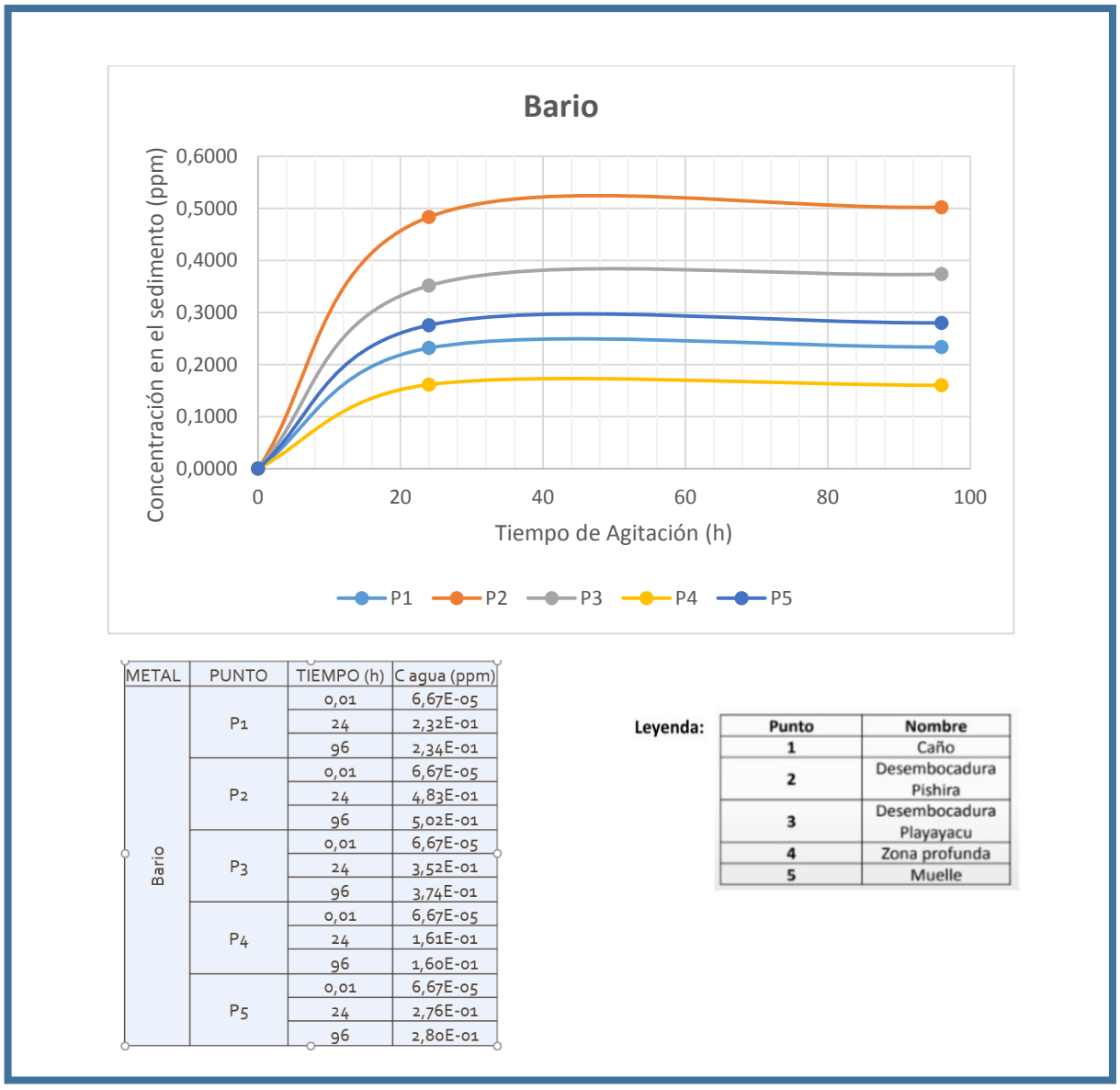
METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Vanadio	P1	0,01	6,67E-05
		24	2,17E-02
		96	2,51E-02
	P2	0,01	6,67E-05
		24	8,51E-03
		96	1,23E-02
	P3	0,01	6,67E-05
		24	3,85E-03
		96	4,76E-03
	P4	0,01	6,67E-05
		24	3,18E-02
		96	3,16E-02
	P5	0,01	6,67E-05
		24	4,48E-02
		96	4,50E-02

Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 7. Concentración de Vanadio vs tiempo de agitación.

En cuanto al Vanadio, en la figura 7, se puede observar que en el caso del Muelle es en donde se encuentra mayor concentración o movilidad del metal, los valores obtenidos son de $4{,}48x10^{-02}$ (24 horas) y de $4{,}50x10^{-02}$ (96 horas) en cada uno de los puntos es posible observar que no existe mayor variación entre los resultados obtenidos a las 24 y 96 horas de agitación. Es decir que se mantienen estables.



METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Bario	P1	0,01	6,67E-05
		24	2,32E-01
		96	2,34E-01
	P2	0,01	6,67E-05
		24	4,83E-01
		96	5,02E-01
	P3	0,01	6,67E-05
		24	3,52E-01
		96	3,74E-01
	P4	0,01	6,67E-05
		24	1,61E-01
		96	1,60E-01
	P5	0,01	6,67E-05
		24	2,76E-01
		96	2,80E-01

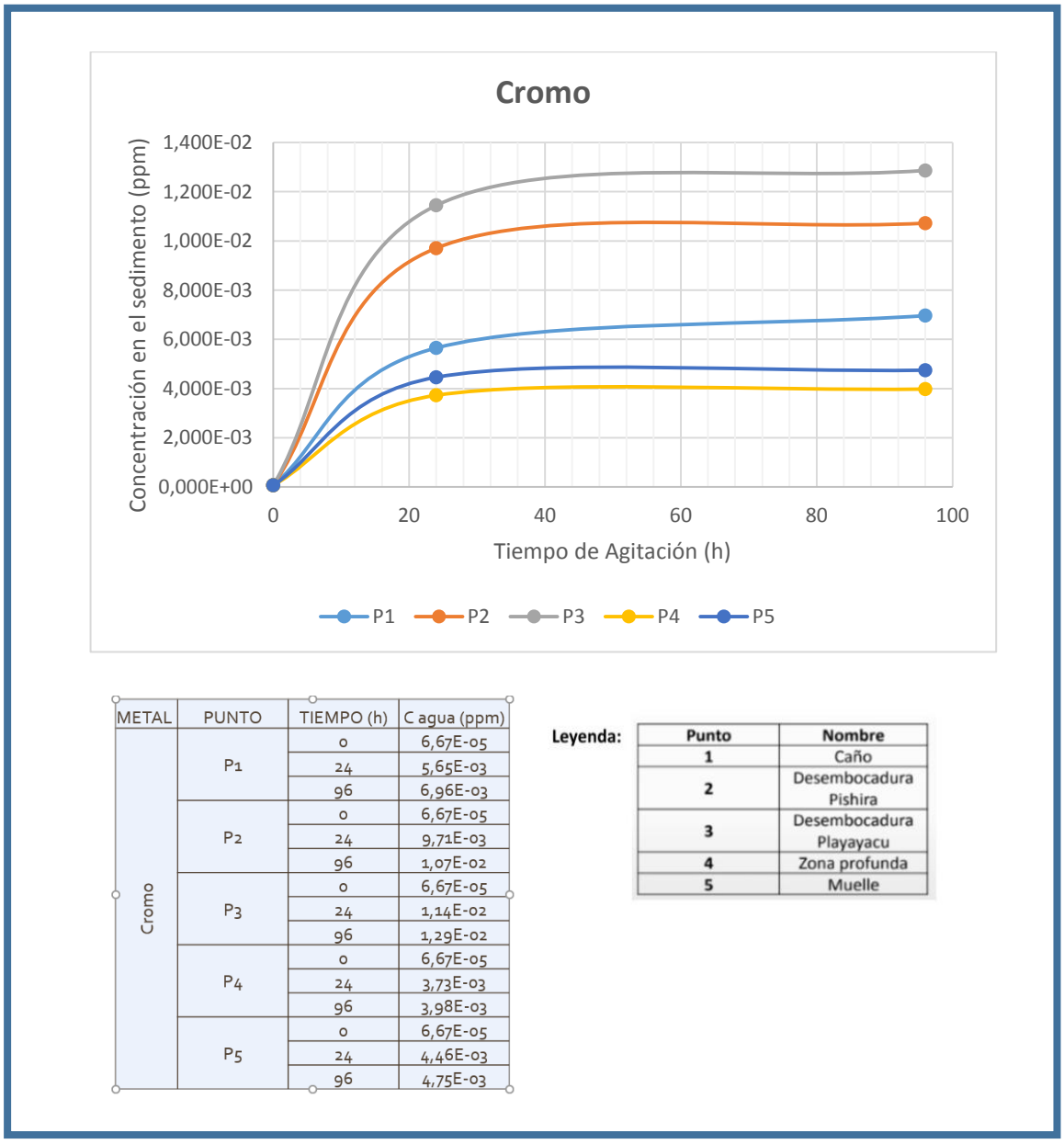
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 8. Concentración de Bario vs tiempo de agitación.

En la figura 8, para el análisis de Bario se puede observar que se mantienen los mayores valores de movilidad en las desembocaduras en el caso de Pishira se obtuvo un valor de $4{,}83x10^{-01}$ (24 horas) y de $5{,}02x10^{-01}$ (96 horas), y en Desembocadura Playayacu los valores son de $3{,}52x10^{-01}$ (24 horas) y $3{,}74x10^{-01}$, prácticamente son valores que se mantienen estables entre los dos periodos de agitación y aplica también al resto de puntos evaluados.

El menor valor de movilidad es el que corresponde a la Zona Profunda.



METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Cromo	P1	0	6,67E-05
		24	5,65E-03
		96	6,96E-03
	P2	0	6,67E-05
		24	9,71E-03
		96	1,07E-02
	P3	0	6,67E-05
		24	1,14E-02
		96	1,29E-02
	P4	0	6,67E-05
		24	3,73E-03
		96	3,98E-03
	P5	0	6,67E-05
		24	4,46E-03
		96	4,75E-03

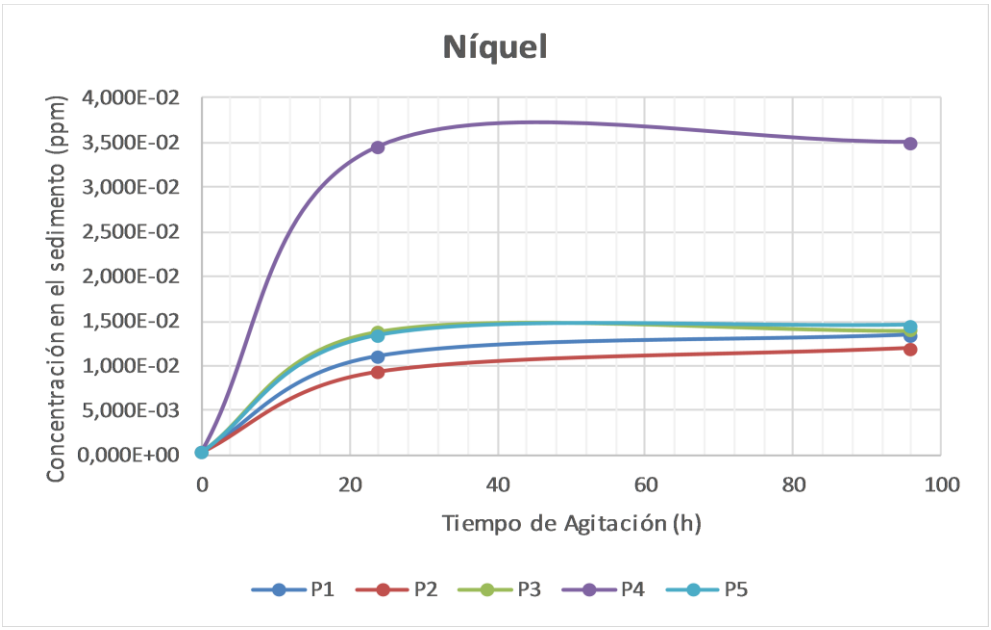
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 9. Concentración de Cromo vs tiempo de agitación

En la figura 9, en los resultados obtenidos para el análisis de Cromo se observa que, al igual que en las referencias anteriores, las desembocaduras presentan los mayores valores correspondientes a movilidad para este metal, en el caso de Playayacu se obtuvo un valor de $1{,}14x10^{-02}$ (24 horas) y $1{,}29x10^{-2}$ (96 horas), en el caso de Pishira los valores obtenidos son de 9,71x10-^{03} (24 horas) y de 1,07x10-02 ^{2} (96 horas).

El mínimo valor obtenido corresponde al reportado para la Zona Profunda con valores de $3{,}73x10^{-03}$ (24 horas) y 3,98x10-^{03} (96 horas).



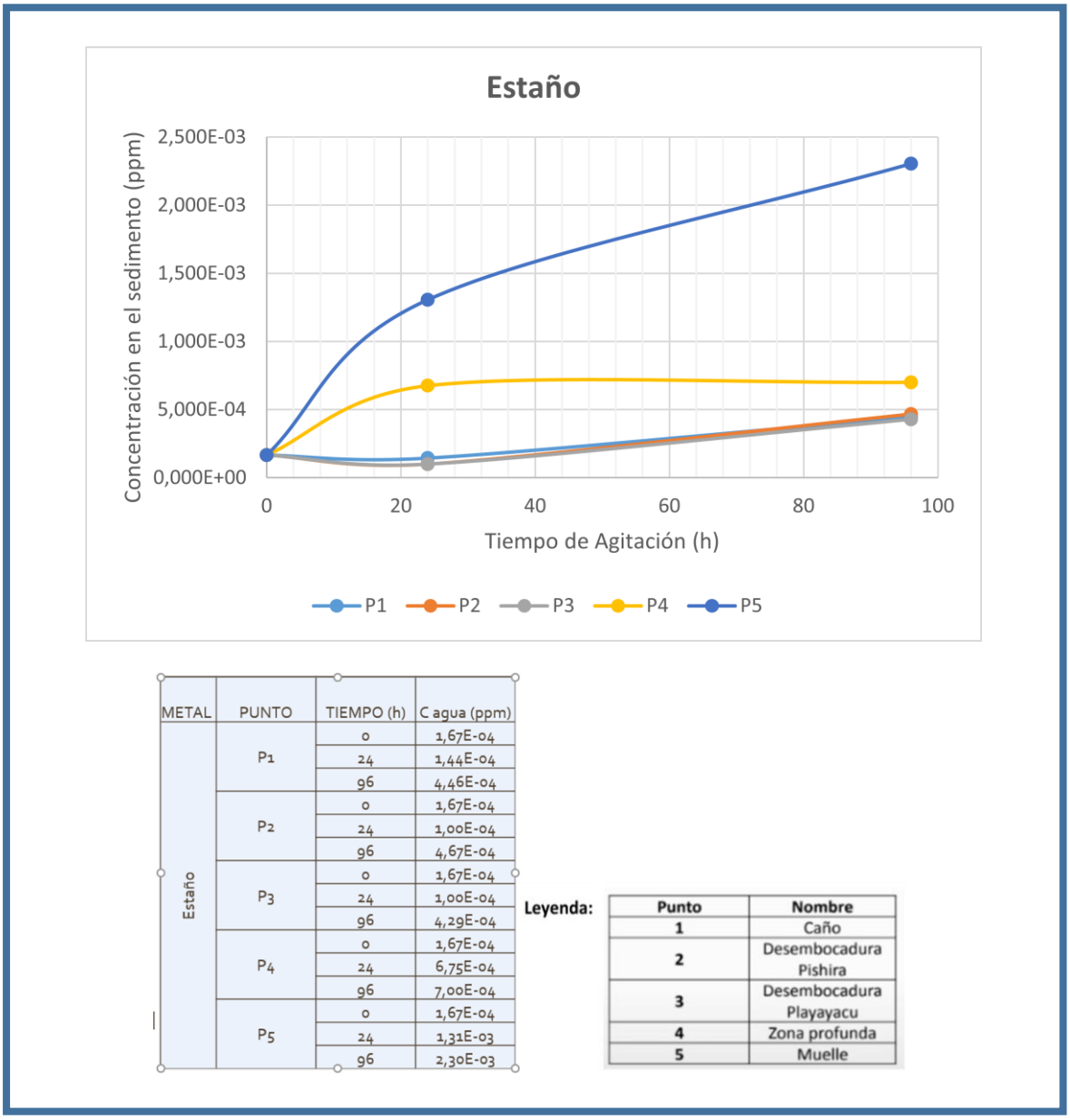
METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Níquel	P1	0,01	3,33E-04
		24	1,11E-02
		96	1,34E-02
	P2	0,01	3,33E-04
		24	9,30E-03
		96	1,19E-02
	P3	0,01	3,33E-04
		24	1,39E-02
		96	1,40E-02
	P4	0,01	3,33E-04
		24	3,45E-02
		96	3,50E-02
	P5	0,01	3,33E-04
		24	1,34E-02
		96	1,45E-02

Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 10. Concentración de Níquel vs tiempo de agitación

En la figura 10, en cuanto a los resultados reportados para el Níquel se puede observar que únicamente existe movilidad en el punto señalado como Zona Profunda y los valores obtenidos son de $3{,}45x10^{-02}$ (24 horas) y de $3{,}50x10^{-02}$ (96 horas), en el resto de puntos se puede observar que los resultados corresponden a valores que se mantienen estables en los dos diferentes periodos de agitación.



METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Estaño	P1	0	1,67E-04
		24	1,44E-04
		96	4,46E-04
	P2	0	1,67E-04
		24	1,00E-04
		96	4,67E-04
	P3	0	1,67E-04
		24	1,00E-04
		96	4,29E-04
	P4	0	1,67E-04
		24	6,75E-04
		96	7,00E-04
	P5	0	1,67E-04
		24	1,31E-03
		96	2,30E-03

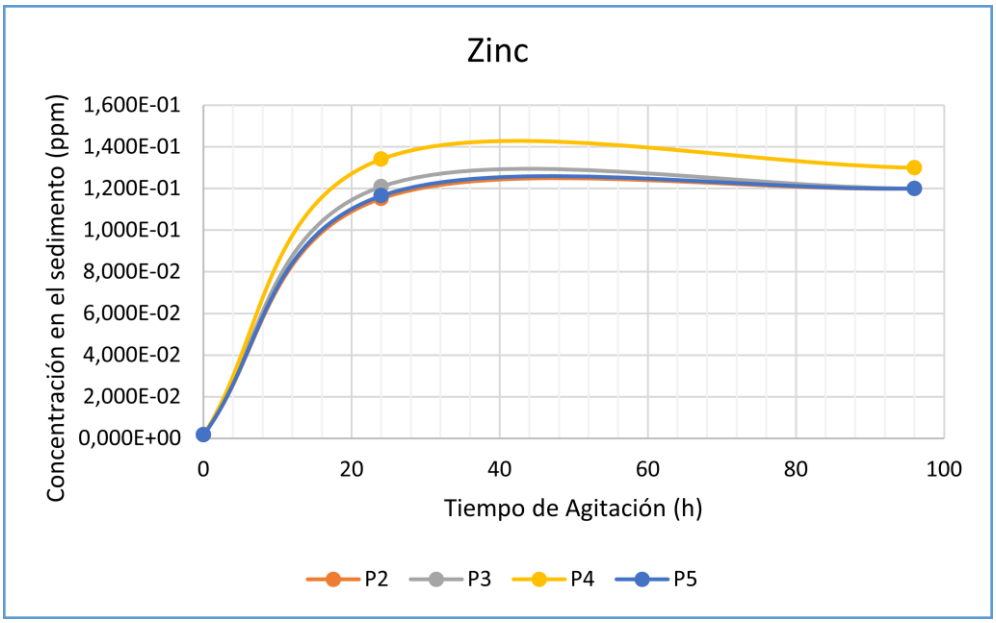
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 11. Concentración de Estaño vs tiempo de agitación

En la figura 11, para el caso del Estaño los resultados son similares en todos los puntos evaluados, a excepción del Muelle donde se observa movilidad y en el que los valores obtenidos corresponden a $1{,}31x10^{-03}$ (24 horas) y de $2{,}30x10^{-03}$ (96 horas).

En el resto de puntos evaluados los valores obtenidos son parecidos por lo que no existe una diferenciación entre un punto y otro encontrándose sobrepuestos en la gráfica presentada.



METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C agua (ppm)
Zinc	P1	0,01	1,67E-03
		24	n.d
		96	6,23E-02
	P2	0,01	1,67E-03
		24	1,15E-01
		96	1,20E-01
	P3	0,01	1,67E-03
		24	1,21E-01
		96	1,20E-01
	P4	0,01	1,67E-03
		24	1,34E-01
		96	1,30E-01
	P5	0,01	1,67E-03
		24	1,17E-01
		96	1,20E-01

Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

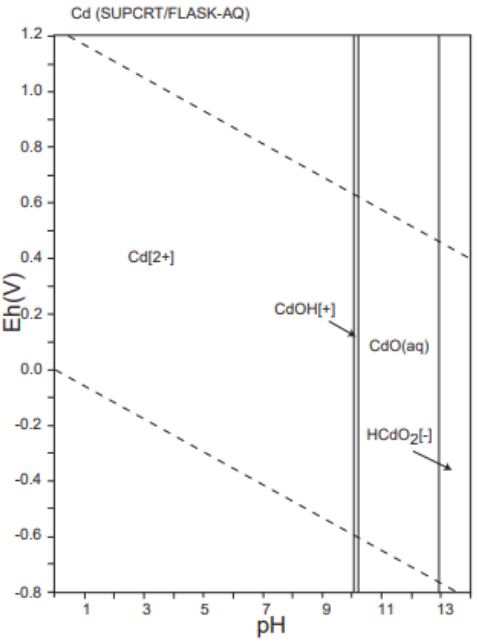
Figura 12. Concentración de Zinc vs tiempo de agitación

En la figura 12, para el análisis de Zinc, no fue posible realizar el análisis en el punto denominado Caño por interferencias presentadas en su realización.

Los valores reportados son similares para cada uno de los puntos y se puede observar que se encuentran sobrepuestos en la gráfica presentada.

Para la revisión de las especies químicas en los diagramas de Pourbaix, se utilizaron los resultados correspondientes a las mediciones realizadas directamente en el agua de la laguna de Limoncoha en el año 2017 para el trabajo de tesis realizado por Rodríguez (2017). Se realizaron análisis de varios parámetros entre ellos los necesarios para su referencia en los diagramas de Pourbaix, estos son análisis de pH y Potencial Redox mismos que se encuentran en el presente estudio, en el Anexo 1.

Las mediciones de pH para cada uno de los puntos considerados en este estudio, en promedio, se encuentran en el rango de 7,2 a 7,6 unidades de pH, mientras que para el potencial redox se encuentran en un rango de 0,2 a 0,3 voltios. Se incluye a continuación los diagramas de Pourbaix para cada uno de los metales evaluados:



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Cadmio	7,2	0,3	Cd[2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Cadmio	7,6	0,3	Cd[2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Cadmio	7,6	0,3	Cd[2+]	Soluble
Zona Profunda	Cadmio	7,5	0,2	Cd[2+]	Soluble
Muelle	Cadmio	7,3	0,2	Cd[2+]	Soluble

Leyenda:

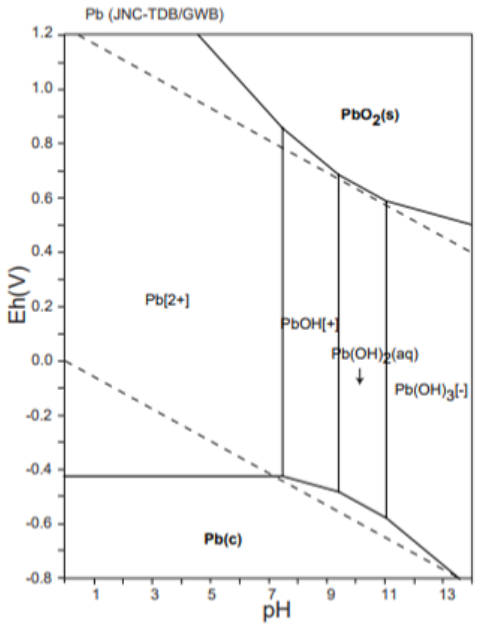
Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 13. Diagrama de Pourbaix para el sistema Cd-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En la figura 13, el diagrama de Pourbaix para el sistema cadmio – agua se puede observar que la especie predominante es el Cd ($^{2+}$), el cual se mantiene estable en cada uno de los puntos considerados. El metal en el diagrama se encuentra en su forma soluble, por lo que de acuerdo a la bibliografía consultada y en función de los valores de pH que se encuentran entre 7,2 a 7,6 se encontró que, para aguas naturales, en este caso la laguna, el Cadmio se encuentra en forma de Hidróxido, esto es $Cd(OH)_2$.

Plomo



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Plomo	7,2	0,3	Pb[2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Plomo	7,6	0,3	Pb[2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Plomo	7,6	0,3	Pb[2+]	Soluble
Zona Profunda	Plomo	7,5	0,2	Pb[2+]	Soluble
Muelle	Plomo	7,3	0,2	Pb[2+]	Soluble

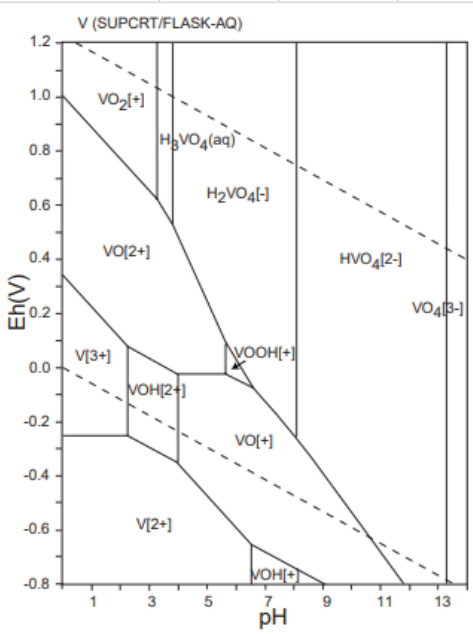
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 14. Diagrama de Pourbaix para el sistema Plomo-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En el caso del plomo en la figura 14, se puede observar en el diagrama que se encuentra en la zona de estabilidad, por lo tanto, también es soluble y se encuentra en forma de metal Pb ($^{+2}$) pero se cuenta con valores de pH que lo acercan al Hidróxido, por lo que en caso de que cambien las condiciones de pH en la laguna es posible que se forme el $Pb(OH)_2$.



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Vanadio	7,2	0,3	H_2VO_4 [-]	Soluble
Desembocadura Pishira	Vanadio	7,6	0,3	H_2VO_4 [-]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Vanadio	7,6	0,3	H_2VO_4 [-]	Soluble
Zona Profunda	Vanadio	7,5	0,2	H_2VO_4 [-]	Soluble
Muelle	Vanadio	7,3	0,2	H_2VO_4 [-]	Soluble

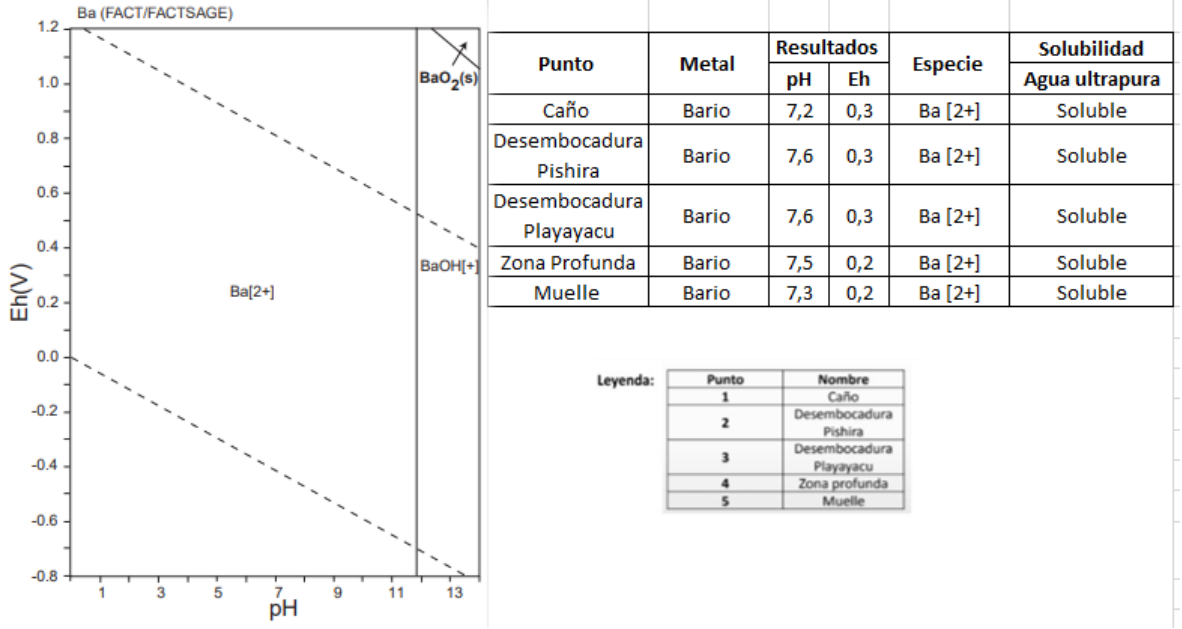
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 15. Diagrama de Pourbaix para el sistema Vanadio-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En la figura 15, el diagrama de Pourbaix para el Vanadio, como se puede observar, es de los metales que pueden llegar a formar una gran cantidad de complejos en el agua, de la misma forma que en los casos anteriores, se encuentra en el mencionado diagrama en la zona de estabilidad y su forma química es el Vanadato monomérico ($H_2VO_4^-$), de acuerdo a bibliografía consultada esta es la que corresponde a las condiciones ambientales más comunes en relación al pH y el Eh.



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Bario	7,2	0,3	Ba [2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Bario	7,6	0,3	Ba [2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Bario	7,6	0,3	Ba [2+]	Soluble
Zona Profunda	Bario	7,5	0,2	Ba [2+]	Soluble
Muelle	Bario	7,3	0,2	Ba [2+]	Soluble

Leyenda:

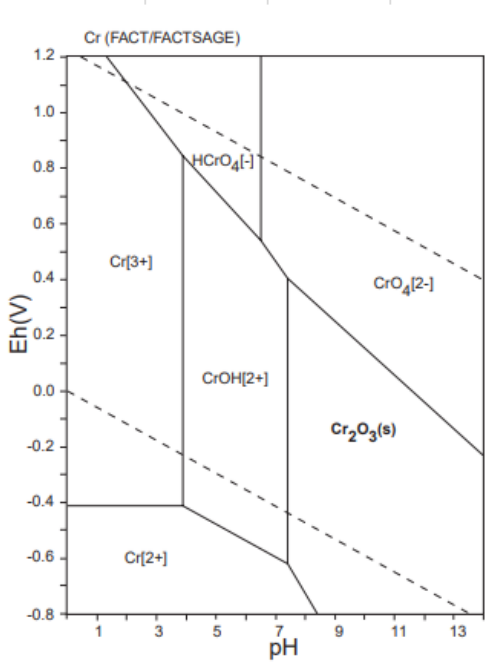
Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 16. Diagrama de Pourbaix para el sistema Bario-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En la figura 16, se puede observar que el bario, al igual que en los anteriores metales, mantiene su posición en el diagrama en la zona de estabilidad y se encuentra en forma soluble, como metal Ba ($^{2+}$).

El bario se encuentra muy asociado a los minerales por lo que podría formar complejos como el sulfato de bario ($BaSO_4$) y carbonato de bario ($BaCO_3$).



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Cromo	7,2	0,3	CrOH [2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Cromo	7,6	0,3	CrOH [2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Cromo	7,6	0,3	CrOH [2+]	Soluble
Zona Profunda	Cromo	7,5	0,2	CrOH [2+]	Soluble
Muelle	Cromo	7,3	0,2	CrOH [2+]	Soluble

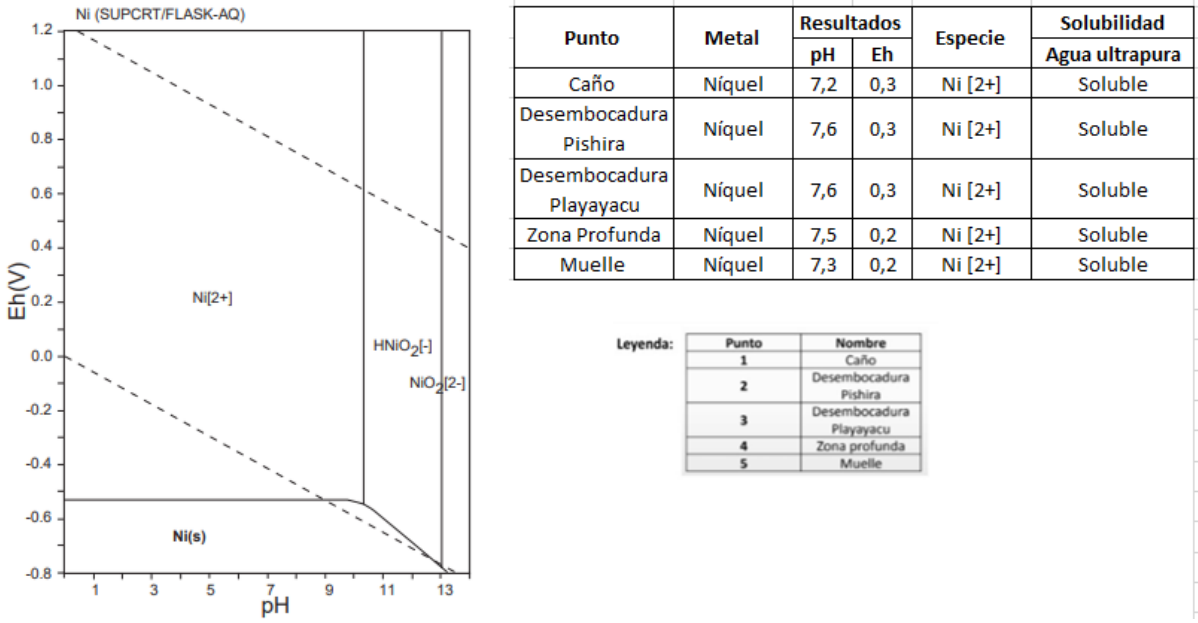
Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 17. Diagrama de Pourbaix para el sistema Cromo-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

Para el caso del cromo en la figura 17, se puede observar en el diagrama que se encuentra en la zona de estabilidad en su forma soluble, pero por los valores de pH y Eh su especie química corresponde al Hidróxido de cromo ($CrOH^{2+}$), de acuerdo a la bibliografía consultada en condiciones de pH entre 5 y 8 el Cr^{3+} puede precipitar y formar Hidróxido de cromo ($CrOH_3$) y que coincide con los valores obtenidos para pH en la laguna de Limoncocha.



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Níquel	7,2	0,3	Ni [2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Níquel	7,6	0,3	Ni [2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Níquel	7,6	0,3	Ni [2+]	Soluble
Zona Profunda	Níquel	7,5	0,2	Ni [2+]	Soluble
Muelle	Níquel	7,3	0,2	Ni [2+]	Soluble

Leyenda:	Punto	Nombre
	1	Caño
	2	Desembocadura Pishira
	3	Desembocadura Playayacu
	4	Zona profunda
	5	Muelle

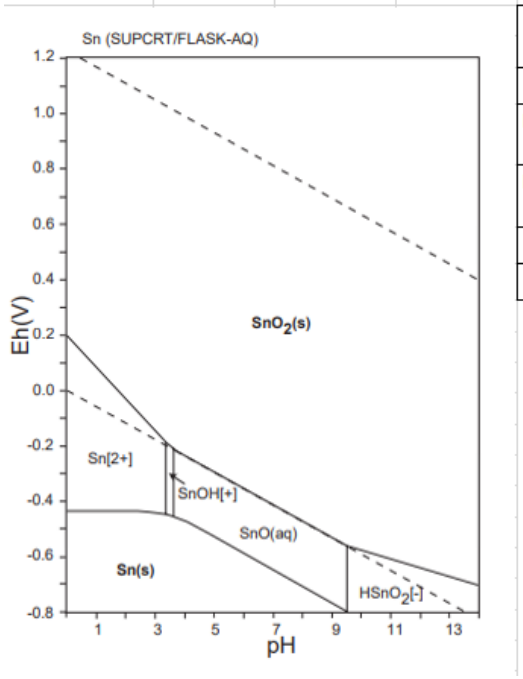
Figura 18. Diagrama de Pourbaix para el sistema Níquel-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En la figura 18, el níquel en el diagrama de Pourbaix en función de los valores de pH y Eh se encuentra en la zona de estabilidad y en su forma soluble como metal Ni ($^{2+}$).

En cuanto a la bibliografía consultada sobre el níquel, este suele estar disuelto y casi no es capaz de formar complejos estables.

Estaño



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Estaño	7,2	0,3	SnO_2 (s)	Soluble
Desembocadura Pishira	Estaño	7,6	0,3	SnO_2 (s)	Soluble
Desembocadura Playayacu	Estaño	7,6	0,3	SnO_2 (s)	Soluble
Zona Profunda	Estaño	7,5	0,2	SnO_2 (s)	Soluble
Muelle	Estaño	7,3	0,2	SnO_2 (s)	Soluble

Leyenda:

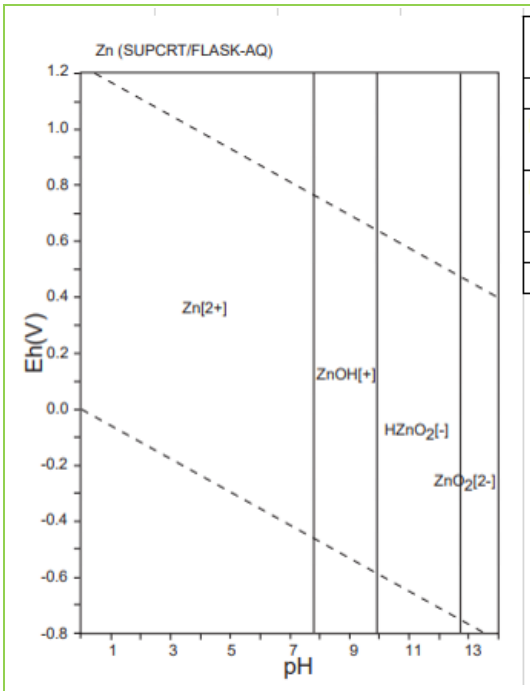
Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 19. Diagrama de Pourbaix para el sistema Estaño-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

En cuanto al estaño, en la figura 19, al igual que para el resto de metales, se puede observar que en el diagrama se encuentra en la zona de estabilidad, en forma soluble y la especie química en función del pH y Eh corresponde al óxido de estaño SnO_2.

De acuerdo a lo descrito en el marco teórico, el estaño se encuentra generalmente combinado con otros metales como el Zn o el Pb, por lo que es poco frecuente encontrar trazas de estaño, estando asociada su presencia a las formulaciones de los pesticidas, vía por medio de la cual puede llegar a fuentes naturales.



Punto	Metal	Resultados		Especie	Solubilidad
		pH	Eh		Agua ultrapura
Caño	Zinc	7,2	0,3	Zn [2+]	Soluble
Desembocadura Pishira	Zinc	7,6	0,3	Zn [2+]	Soluble
Desembocadura Playayacu	Zinc	7,6	0,3	Zn [2+]	Soluble
Zona Profunda	Zinc	7,5	0,2	Zn [2+]	Soluble
Muelle	Zinc	7,3	0,2	Zn [2+]	Soluble

Leyenda:

Punto	Nombre
1	Caño
2	Desembocadura Pishira
3	Desembocadura Playayacu
4	Zona profunda
5	Muelle

Figura 20. Diagrama de Pourbaix para el sistema Estaño-H_2O

Fuente: Naoto Takeno, 2005.

Finalmente, en la figura 20, el diagrama de Pourbaix para el zinc, de la misma forma que en los otros metales, se encuentra en la zona de estabilidad y en forma soluble como metal Zn ($^{2+}$).

En cuanto a la información respecto al zinc se conoce que es poco frecuente encontrarlo en los cauces naturales, pero está asociado a los sedimentos de los lechos en cauces hídricos en forma de hidróxidos y combinados con carbonatos.

CONCLUSIONES.

De las gráficas concentración vs tiempo de movilidad, se observa que mientras más alta es la concentración de un metal en el sedimento, más rápido se moviliza hacia el agua ultrapura. lEl tiempo de agitación considerado no es suficiente para llegar al equilibrio ya que existe movilidad desde las 24 hasta las 96 horas, sin llegar a determinar si se ha movilizado o no todo el metal existente.

Se determinó a través del ensayo de lixiviación que los metales se mueven de una zona de mayor concentración (sedimentos) hacia una zona de menor concentración (agua ultrapura). Por lo que se puede homologar este fenómeno con la movilidad de los metales desde los sedimentos, directamente hacia el agua de la laguna.

Al analizar la movilidad de cada metal en estudio se pudo determinar que:

CADMIO. - en los puntos correspondientes a las desembocaduras de los ríos Playayacu (P3) y Pishira (P2), se encuentra en mayor concentración, por lo que su movilidad no llega a detenerse ni en el tiempo de 96 horas, esto se debería a que, en este sitio al juntarse las desembocaduras de los ríos con la laguna, existe mayor movimiento y por lo tanto los metales presentes en los sedimentos tienen mayor movilidad en estos sitios.

PLOMO. - No fue posible determinar movilidad para todos puntos por interferencias en el momento del análisis; sin embargo, en los puntos estudiados se registró mayor movilidad en la desembocadura del río Playayacu (P3), por el aporte del río a la laguna lo cual permite tener mayor movilidad de metales y en este caso del plomo.

VANADIO. - La mayor movilidad se encontró en el Muelle (P5), porque en cada uno de los puntos a las 24 horas de agitación las concentraciones del vanadio ya se encuentran en equilibrio entre las fases, existiendo una mayor concentración en P5, el vanadio es un metal que se encuentra relacionado a actividades petroleras.

BARIO. - Demuestra movilidad de metales en las desembocaduras de los ríos Pishira (P2) y Playayacu (P3), al igual que para los otros metales determinados, es en las desembocaduras en donde se observa mayor movilidad, a las 24 horas ya se alcanza cierto equilibrio en cada uno de los puntos, pero es mayor en P2 y P3 por la dinámica de los ríos que pueden aportar mayor movilidad del metal y al igual que el anterior también se encuentra relacionado a actividades petroleras.

CROMO. - al igual que en los metales anteriores existe mayor movilidad en las desembocaduras de los ríos Pishira (P2) y Playayacu (P3), el mayor movimiento en estas zonas ha permitido encontrar mayor concentración para los metales evaluados, como es el caso del cromo.

NIQUEL. - el mayor valor de movilidad reportado corresponde a Zona profunda (P4). En cuanto a la movilidad para este metal se determinó que existe una diferencia significativa en relación a los otros puntos evaluados para este metal, ya que alcanza la mayor movilidad a las 24 horas de agitación y llegando al equilibrio a las 96 horas.

ESTAÑO. - la mayor movilidad se registra en el Muelle (P5). A diferencia de los otros puntos considerados en donde la concentración del metal es mínima, se registra mayor movilidad en P5 desde las 24 horas y al llegar a las 96 horas se puede observar que existe aún movilidad.

ZINC. - no fue posible obtener resultados que nos permitan hacer comparaciones debido a interferencias en el momento del análisis obteniéndose casi los mismos

valores en los puntos evaluados, lo cual no permitió evaluar en cual punto existe mayor movilidad.

Analizando los diagramas de Pourbaix, que relaciona pH y Eh, se puede observar que la mayoría de especies de metales existentes en la laguna, son solubles ya sea en forma de sales o en forma de complejos. En estos diagramas se visualiza que el pH es una propiedad determinante en el estado de oxidación que se encuentran los metales, y por tanto si son solubles o insolubles. Una alteración en el pH podría cambiar el equilibrio del ecosistema. El pH del agua de la Laguna está entre 7,2 y 7,6. Las mayores concentraciones de las sustancias solubles se encuentran disueltas en el agua de la laguna, por lo que afectan de forma directa a la flora y la fauna existente en el sitio.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda, que un trabajo posterior se realice ensayos por lo menos en dos tiempos más de agitación, uno intermedio entre 24 y 96 horas y uno posterior a las 96 horas. El tiempo intermedio para determinar la tendencia y la ecuación a la que corresponde la gráfica, y la posterior para determinar en qué tiempo llega al equilibrio de movilidad entre el sedimento y el agua.

Será importante realizar el ensayo en agua de la laguna en lugar de agua ultrapura determinando primero una línea base de concentración inicial.

Se recomienda realizar un monitoreo periódico de pH, y Eh al agua de la laguna de Limoncocha, por el ecosistema que mantiene, ya que la Comunidad obtiene beneficios importantes de sus aguas.

Al existir uso por parte de la población es necesario realizar controles periódicos a los niveles de pH y Eh que confirmen que se mantiene el equilibrio de laguna y de esta manera

contar con alertas en caso de que se alteren las condiciones y tenga lugar a complejos que contaminen el agua de la laguna afectando al ecosistema y al componente humano.

Es recomendable que se realice un muestreo semestral de sedimentos de la laguna para el seguimiento de la concentración de metales pesados en los sedimentos y agua de la laguna.

AGRADECIMIENTOS.

Un agradecimiento al personal que labora en la estación científica de la UISEK en Limoncocha quien colaboró para la toma de muestras; adicional a ello, un agradecimiento a los colaboradores de laboratorios de Operaciones Unitarias y de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional quienes colaboraron facilitando los equipos para el tratamiento de las muestras.

REFERENCIAS CITADAS.

Agurto, D. (2016). Evaluación de la concentración de mercurio, aluminio y cobre en agua, suelos y sedimentos de la Reserva Biológica Limoncocha para establecer la línea base. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental no publicado). Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.

Alcivar M., Mosquera J. (2011). Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Naturales "Concentración de metales pesados (cr total, pb, cd) en agua superficial y sedimentos en el Estero Salado (Guayaquil).

Álvarez, C. A., Acevedo Barrios, R., & Severiche Sierra, C. (2013). Evaluación analítica para la determinación de aluminio, bario y cromo en aguas, por espectroscopia de absorción atómica con llama óxido nitroso-acetileno. Universidad Tecnológica de Bolívar, 7(8), 19–24.

Cabrera, M (2018). Lixiviación de plomo, cadmio y vanadio para la determinación del coeficiente de transferencia de masa con fines de conservación en la laguna de Limoncocha, Sucumbíos.

Cabrera Drouet, J. (2018). Trabajo Fin de Máster Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos y suelos de la Reserva Biológica Limoncocha – Ecuador mediante índices de polución . (Assessment of heavy metals contamination in sediments and soils of Biological Res, 77.

De Leon J., (2014). Universidad autónoma de Nuevo león. Corrosión inducida por flujo en un acero API x 65 en una solución acuosa NaCl 3% saturada de CO_2.

J. J. RODRÍGUEZ-MERCADO, M. A. A.-L. (2006). (Recibido octubre 2003, aceptado diciembre 2004). Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 22(4), 173–189.

Jumbo, D. (2009). "Metales Pesados En Sedimentos Riverinos De Cuencas Hidrográficas Impactadas Por Minería En La Región Sur Del Ecuador." Retrieved fromhttp://dspace.unl.edu.ec:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4343/ARELLANO WASHINGTON - JIMENEZ GALO.pdf

Naoto Takeno. (2005). National Institute of Advanced Industrial Science and Technology http://www.eosremediation.com/download/Chemistry/Chemical%20Properties/Eh_pH_Diagrams.pdf.

Ortiz, J. (2012). Estado trófico de la Laguna de Limoncocha en base a los índices de Carlson y Lacat. Universidad Internacional SEK. Quito, Ecuador.

Rodríguez-Jorquera, I., P., Siroski, W., Espejo, J., Nimptsch, P., Gusso, R., Brasil, C., Moraga, M., Mora, G., Toor., 2017, Latin American Protected Areas: Protected from Chemical Pollution, Integrated Environmental Assessment and Management, 13 (2), 360 – 370. Sutherland.

Rodríguez, A (2017). Determinacion del estado trófico de la laguna de Limoncocha mediante el análisis de perfiles hidroquímicos en el período 2015-2017. Universidad Internacional Sek, Quito, Ecuador.

Universidad de Concepción. (2007). Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. Recuperado de: http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Protocolos_suelos%20y_lodos_Sadzawka.pdf. (Noviembre, 2017).

USEPA – United States Environmental Protection Agency. (1992). Method 1311 – Toxicity characteristic leaching procedure. Recuperado de: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf. (Noviembre, 2017).

USEPA – United States Environmental Protection Agency. (2014). Chapter three – Inorganic analytes. Recuperado de: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/chap3_1.pdf. (Noviembre, 2017).

USGS – United States Geological Survey. (2005). National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data: Preparation for Water Sampling. Recuperado de: https://water.usgs.gov/owq/FieldManual/chapter1/Ch1_contents.html. (Noviembre, 2017).

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

ANEXO 1. Concentraciones de los metales pesados análisis de laboratorio

Tabla 3. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Cadmio

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Cadmio	P1	0,01	0,00001
		24	0,0001
		96	0,0001
	P2	0,01	0,00001
		24	0,0005
		96	0,0007
	P3	0,01	0,00001
		24	0,0008
		96	0,001
	P4	0,01	0,00001
		24	0,0002
		96	0,0003
	P5	0,01	0,00001
		24	0,0003
		96	0,0006

Tabla 4. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Plomo.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Plomo	P1	0,01	0,0002
		24	0,001
		96	0,001
	P2	0,01	0,0002
		24	0,004
		96	n.d
	P3	0,01	0,0002
		24	0,004
		96	0,02
	P4	0,01	0,0002
		24	0,002
		96	0,01
	P5	0,01	0,0002
		24	n.d
		96	0,01

Tabla 5. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Vanadio.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Vanadio	P1	0,01	0,0001
		24	0,02
		96	0,03
	P2	0,01	0,0001
		24	0,01
		96	0,01
	P3	0,01	0,0001
		24	0,004
		96	0,005
	P4	0,01	0,0001
		24	0,03
		96	0,03
	P5	0,01	0,0001
		24	0,04
		96	0,05

Tabla 6. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Bario.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Bario	P1	0,01	0,0001
		24	0,23
		96	0,23
	P2	0,01	0,0001
		24	0,48
		96	0,50
	P3	0,01	0,0001
		24	0,35
		96	0,37
	P4	0,01	0,0001
		24	0,16
		96	0,16
	P5	0,01	0,0001
		24	0,28
		96	0,28

Tabla 7. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Cromo.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Cromo	P1	0,01	0,0001
		24	0,01
		96	0,01
	P2	0,01	0,0001
		24	0,01
		96	0,01
	P3	0,01	0,0001
		24	0,01
		96	0,01
	P4	0,01	0,0001
		24	0,004
		96	0,004
	P5	0,01	0,0001
		24	0,004
		96	0,005

Tabla 8. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Níquel.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Níquel	P1	0,01	0,0003
		24	0,01
		96	0,01
	P2	0,01	0,0003
		24	0,01
		96	0,01
	P3	0,01	0,0003
		24	0,01
		96	0,01
	P4	0,01	0,0003
		24	0,03
		96	0,04
	P5	0,01	0,0003
		24	0,01
		96	0,01

Tabla 9. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Estaño.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Estaño	P1	0,01	0,0002
		24	0,0001
		96	0,0004
	P2	0,01	0,0002
		24	0,0001
		96	0,0005
	P3	0,01	0,0002
		24	0,0001
		96	0,0004
	P4	0,01	0,0002
		24	0,001
		96	0,001
	P5	0,01	0,0002
		24	0,001
		96	0,002

Tabla 10. Resultados de informe de laboratorio concentración versus tiempo de agitación por punto. Zinc.

METAL	PUNTO	TIEMPO (h)	C. agua ultrapura (ppm)
Zinc	P1	0,01	0,002
		24	n.d
		96	0,06
	P2	0,01	0,002
		24	0,12
		96	0,12
	P3	0,01	0,002
		24	0,12
		96	0,12
	P4	0,01	0,002
		24	0,13
		96	0,13
	P5	0,01	0,002
		24	0,12
		96	0,12

Tabla 11. Resultados de las mediciones de pH y potencial redox, febrero 2017.

Punto	Fecha	pH	Potencial Redox (V)
Caño	28/02/2017	7,38	0,3
Caño	28/02/2017	7,28	0,3
Caño	28/02/2017	7,25	0,3
Caño	28/02/2017	7,25	0,3
Caño	28/02/2017	7,27	0,3
Caño	28/02/2017	7,22	0,3
Caño	28/02/2017	7,21	0,3
Caño	28/02/2017	7,19	0,4
Caño	28/02/2017	7,02	0,4
Caño	28/02/2017	7,12	0,4
Caño	28/02/2017	7,03	0,4
Caño		**7,20**	**0,3**
Zona Profunda	28/02/2017	7.46	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.46	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.51	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.48	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.5	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.55	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.54	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.48	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.52	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.52	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.54	0,3
Zona Profunda	28/02/2017	7.38	-0,1
Zona Profunda	28/02/2017	7.33	-0,1
Zona Profunda	28/02/2017	6.98	-0,1
Zona Profunda		**7.45**	**0,2**
Muelle	28/02/2017	7.61	0,3
Muelle	28/02/2017	7.5	0,3
Muelle	28/02/2017	7.46	0,3
Muelle	28/02/2017	7.35	0,3
Muelle	28/02/2017	7.36	0,3
Muelle	28/02/2017	7.33	0,3
Muelle	28/02/2017	7.27	0,2
Muelle	28/02/2017	7.21	0,1
Muelle	28/02/2017	6.98	-0,1
Muelle	28/02/2017	6.95	-0,1
Muelle	28/02/2017	6.94	-0,1
Muelle		**7.27**	**0,2**
Pishira	28/02/2017	7.71	0,3
Pishira	28/02/2017	7.65	0,3

Punto	Fecha	pH	Potencial Redox (V)
Pishira	28/02/2017	7.47	0,3
Pishira	28/02/2017	7.42	0,3
Pishira		**7.56**	**0,3**
Playayacu	28/02/2017	7.85	0,2
Playayacu	28/02/2017	7.64	0,3
Playayacu	28/02/2017	7.61	0,3
Playayacu	28/02/2017	7.53	0,3
Playayacu	28/02/2017	7.48	0,3
Playayacu	28/02/2017	7.36	0,3
Playayacu		**7.58**	**0,3**

Fuente: (Rodríguez, 2017).

LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA EN AGUA ULTRAPURA PARA DETERMINAR SU MOVILIDAD CON FINES DE CONSERVACIÓN.

ANEXO. Anexo Fotográfico

AREA DE ESTUDIO

Figura 21. Laguna de Limoncocha (Área de estudio), cinco puntos determinados por la UISEK

MUESTREO

Figura 22. Toma de muestras de sedimentos

Figura 23. Muestreo realizado de acuerdo a SM 2012.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Figura 24. Muestra húmeda

Figura 25. Muestra seca

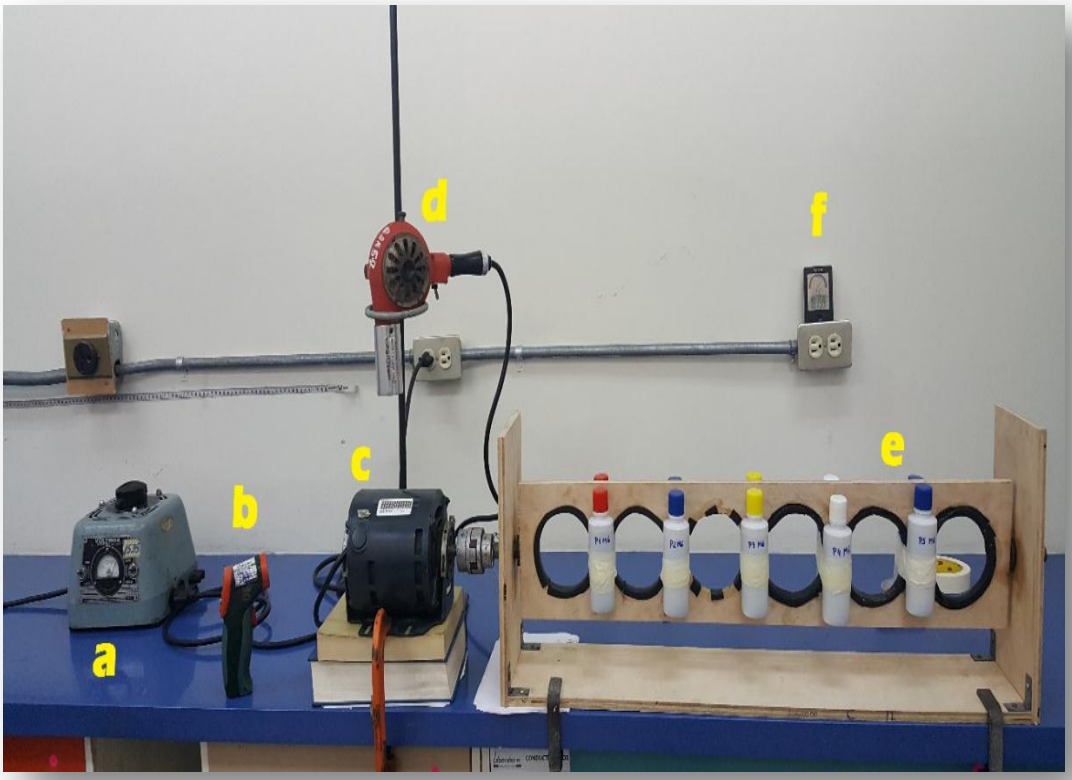


Figura 26. Sistema de agitación

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Figura 27. Pesado de las muestras

Figura 28. Ensayo de lixiviación

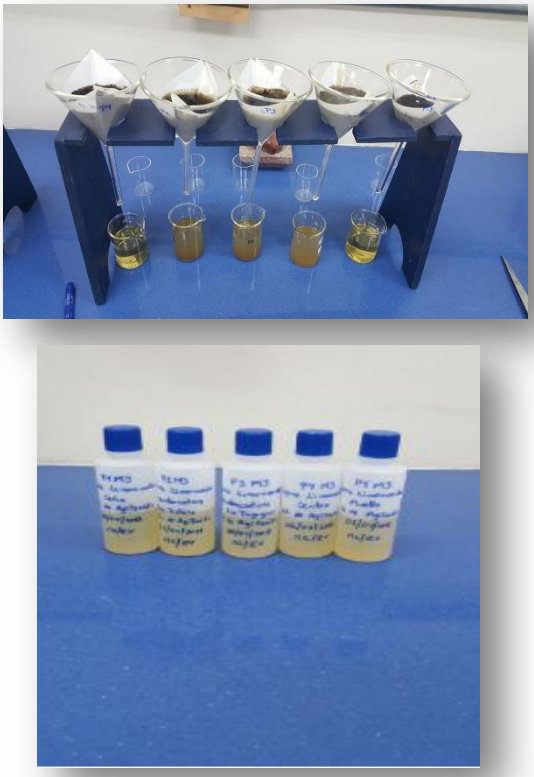


Figura 29. Filtración.

Figura 30. Análisis de metales por ICP-MS