

**Evaluación del uso de ortofosfato y
policloruro de aluminio para mejorar la
calidad del agua en Zamorano, Honduras**

Rodrigo Moscoso Balanza

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del uso de ortofosfato y policloruro de aluminio para mejorar la calidad del agua en Zamorano, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Rodrigo Moscoso Balanza

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2016

Evaluación del uso de ortofosfato y policloruro de aluminio para mejorar la calidad del agua en Zamorano, Honduras

Rodrigo Moscoso Balanza

Resumen: Las concentraciones de aluminio (Al) y hierro (Fe) en el agua de la microcuenca de Santa Inés y Uyuca son elevadas, lo cual deteriora la calidad del agua de consumo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. El objetivo del presente estudio fue el de determinar la eficiencia en la remoción de Al y Fe mediante la dosificación de policloruro de aluminio (PAC) y ácido fosfórico (H_3PO_4) en procesos simulados de coagulación, floculación, sedimentación y filtración de una planta de potabilización. Los análisis se llevaron a cabo con diferentes proporciones de ambas fuentes para establecer los comportamientos de los reactivos ante diferentes mezclas de agua. Mediante la aplicación de PAC se obtuvieron remociones de hasta 66% de Al y de hasta 85% con la adición de H_3PO_4 , sin embargo, las concentraciones finales no cumplen con la normativa vigente. Las concentraciones de hierro se lograron disminuir a valores dentro de la norma con la adición de PAC, por lo que no son necesarios procesos adicionales. La turbiedad y la concentración de aluminio en la fuente de Santa Inés demostraron una estrecha correlación (0.9385), lo cual indica que la fuente potencial de este metal es geológica. La fuente de Uyuca tiene turbiedades mucho más bajas y las concentraciones de metales son menores. Se recomienda realizar estudios con otros reactivos y mayores turbiedades.

Palabras clave: Ácido fosfórico, aluminio, coagulación, floculación, hierro, PAC.

Abstract: The concentrations of aluminum (Al) and iron (Fe) in the water of Santa Ines and Uyuca are high, which leads to deterioration of water quality consumption in the Pan-American Agricultural School, Zamorano. The objective of the study was conducted to determine the removal efficiency of Al and Fe by dosing of poly aluminum chloride (PAC) and phosphoric acid (H_3PO_4) in simulated processes of coagulation, flocculation, sedimentation and filtration in a water treatment plant. Analyses were performed with different proportions of both sources to establish behaviors of different mixtures of reagents to water. By applying PAC removal was up to 66% of Al, and up to 85% with the addition of H_3PO_4 were obtained, however, the final concentrations do not comply with current regulations. Iron concentrations were achieved fall to a value within the standard with the addition of PAC, which indicates that additional processes are not necessary. Turbidity and the concentration of aluminum in the source of Santa Inés showed a close relationship (0.9385), which indicates that the potential source of this metal is geological. Uyuca source has much lower turbidity and metal concentrations are lower. It is recommended to conduct studies with other reagents and increased turbidity.

Key words: Aluminium, coagulation, flocculation, iron, PAC, phosphoric acid.

CONTENIDO

Portadilla.....	ii
Página de firmas.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	vi
Símbolos y Abreviaturas.....	vii
Siglas.....	viii
1. INTRODUCCIÓN..	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
4. CONCLUSIONES.....	22
5. RECOMENDACIONES.....	24
6. LITERATURA CITADA	25
7. ANEXOS	29

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Pruebas de jarras realizadas para las diferentes proporciones y reactivos	8
2. Parámetros iniciales de las muestras.	10
3. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No.1.	11
4. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No .2.	11
5. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No.3.	12

Figuras	Página
1. Etapa del proceso de potabilización simulada en el estudio.....	6
2. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 1.....	14
3. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 2.....	15
4. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 3.....	16
5. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H_3PO_4 , muestreo No.1	17
6. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H_3PO_4 , muestreo No.2	18
7. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H_3PO_4 , muestreo No.3	19
8. Remoción de hierro por adición de PAC.....	20

Anexos	Página
1. Punto de muestreo en desarenador de Santa Inés.....	29
2. Equipo de jarras y filtros de arena utilizados en el estudio.....	30
3. Etiqueta con especificaciones del ácido fosfórico.....	30
4. Resultados correlación de pearson.....	30

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

%:	Porcentaje
°C:	Grados centígrados
µm:	Micras
µS:	Micro Siemens
Al:	Aluminio
Cm:	Centímetro
Eq:	Equivalente
Fe:	Hierro
H ₂ SO ₄ :	Ácido sulfúrico
HCl:	Ácido clorhídrico
H ₃ PO ₄ :	Ácido fosfórico
L:	Litro
Mg/L	Miligramo por litro
mL:	Mililitro
N:	Normalidad
NaOH:	Hidróxido de sodio
Na ₂ CO ₃ :	Carbonato de sodio
PAC:	Policloruro de aluminio
pH	Potencial de hidrógeno
R ² :	Coefficiente de determinación
SI:	Santa Inés
UNT:	Unidades Nefelométricas de Turbidez
UYA:	Uyuca Agua Amarilla
UYB:	Uyuca El Benque

SIGLAS

FAO: Food and Agriculture Organization
OMS: Organización Mundial para la Salud
OPS: Organización Panamericana para la Salud
CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización

1. INTRODUCCIÓN

El agua además de ser vital para el ser humano, es un componente indispensable para el desarrollo económico, social y medioambiental, lo cual la hace un objeto de estudio muy importante a nivel global. El agua se ve sumamente afectada por la dinámica y creciente población mundial, haciendo que la demanda de este recurso sea cada vez mayor. Además se ve afectada por el cambio climático que altera las fuentes de agua incrementando la vulnerabilidad de las poblaciones. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (2015), aproximadamente 780 millones de personas aún no cuentan con acceso a agua potable, saneamiento inocuo y sostenible, dato alarmante dada la necesidad de utilización de este recurso en las actividades diarias. Por otra parte, existen poblaciones que cuentan con acceso a agua, pero por falta de tratamientos adecuados se exponen a enfermedades hidrotransportadas como diarrea, cólera, disentería, fiebre tifoidea y poliomielitis. El agua potable contaminada provoca aproximadamente 502,000 muertes al año, y se estima que al menos 1,800 millones de personas consumen agua contaminada por materia fecal (Organización Mundial para la Salud [OMS], 2015).

Aún cuando se cuenta con una fuente permanente de agua, la aplicación de procesos de potabilización es importante para garantizar que el consumo de agua sea seguro para la salud de quienes la consumen. El agua potable es aquella que puede ser destinada a usos domésticos y de higiene personal sin representar un riesgo a la salud (OMS, s.f.). Para establecer un proceso adecuado de potabilización de agua es importante conocer la fuente y sus características, para así definir alternativas de tratamiento correctas. Se debe identificar aquellos parámetros de calidad que sobrepasen los niveles máximos permisibles por las normas técnicas de calidad de agua potable y que constituyan riesgos potenciales o que causen malestar en los consumidores (Organización Panamericana de Salud/Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [OPS/CEPIS], 2004).

El proceso de potabilización busca la eliminación de impurezas. Para que este proceso se cumpla se deben seguir una serie de pasos, los cuales pueden comenzar en la toma de captación de agua y posteriormente completarse en las plantas potabilizadoras antes de que el agua sea ingresada al sistema de distribución comunitario. Entre los principales parámetros removidos por este proceso se encuentran la turbiedad, material sedimentable y microorganismos. Todo material grande como piedras, arena y ramas, puede ser removido por desarenadores. Posteriormente, por métodos físico-químicos, el agua puede seguir su proceso de purificación. La turbiedad se remueve por coagulación, floculación y sedimentación gracias a la adición de compuestos químicos capaces de aglutinar las partículas en suspensión causando su precipitación para ser removidas. Posteriormente se

debe seguir con la desinfección, en la cual se adicionan compuestos clorados para destruir los microorganismos presentes, evitando riesgos para la salud del consumidor y garantizando agua potable de calidad (Servicios de Agua de Misiones S.A, s.f.). En caso de que se identifiquen compuestos indeseables, procesos adicionales deben implementarse. Algunos de los metales más comunes en cuerpos de agua son el aluminio (Al) y hierro (Fe).

El aluminio es uno de los elementos metálicos más abundantes en la corteza terrestre. Puede ser liberado al medio de manera natural, por erosión de suelos (forman parte estructural de arcillas), explosiones volcánicas y por causas antropogénicas. Este elemento posee un amplio rango de aplicaciones en diferentes industrias. A pesar de su funcionalidad también es fuente de riesgos potenciales a la salud por su consumo e incluso por su uso como floculante en el tratamiento de agua fresca y residual (sulfato y cloruro de aluminio). La enfermedad más asociada a este elemento es el Alzheimer, la cual se da cuando existe exposición constante a dicho elemento (Trejo, 2004). No existen estudios recientes concretos sobre afecciones por consumo de agua con altas concentraciones de aluminio. Existen comparaciones de tasas de ocurrencia de Alzheimer y consumo de agua, las cuales indican relación directa entre los niveles promedio de aluminio en el agua de consumo y la incidencia de dicha enfermedad (Rondeau, Commenges, Jacqmin-Gadda, y Dartigues, 2000). La biodisponibilidad de este metal en agua bebible depende del pH, ya que éste mientras más ácido mayor es la concentración de aluminio. Cuando el pH del agua se encuentra entre 6.0 y 8.0 las diferentes especies químicas de aluminio son altamente reactivas (Suay y Ballester, 2002).

Por otra parte, el hierro está comúnmente presente en agua de consumo por la corrosión de las tuberías para conducción de agua o por origen natural. Su presencia en agua genera un problema común de sistemas de distribución conocido como “agua con color” (Sarin et al., 2004). El hierro es inofensivo para la salud humana, incluso en bajas concentraciones genera beneficios en el transporte de oxígeno en la sangre; pero en altas concentraciones puede afectar las características del agua (sabor desagradable, color opaco y la tinción de textiles) por lo que los consumidores no la aceptan como agua apta para consumo (Colter y Mahler, 2006). Cuando el hierro entra en contacto con oxígeno disuelto en el agua, ocurre oxidación y hace que éste precipite en forma de hidróxido férrico, siempre y cuando el pH sea superior a 7.5 (OMS/CEPIS, 2004).

El pH, que está relacionado con las condiciones de suelo y agua, es el resultado de varios factores: el tipo de minerales presentes en el suelo, el grado de meteorización del material parental presente en el suelo, la descomposición de materia orgánica (humificación) y la interacción de los nutrientes retenidos o en solución, entre otros. Estos factores son comunes en suelos de regiones con altas precipitaciones, ricos en materia orgánica, y en suelos con material geológico rico en minerales (Buckman y Brady, 1966). Por otra parte, el pH afecta en la corrosión e incrustaciones en redes de distribución, lo cual no tiene efectos sobre la salud pero sí influye en procesos de coagulación y desinfección de agua de consumo al momento de tratar el agua cruda y en la solubilidad y especiación de los metales. El rango establecido para considerar el pH como adecuado en agua potable es de 6.5 – 8.5 (OMS/CEPIS, 2004).

La turbiedad es un parámetro de medición de la calidad de agua de gran importancia y aplicación a lo largo de procesos de potabilización y sistemas de distribución (Letterman, Johnson y Viswanathan, 2004). Es un parámetro de fácil medición y no involucra grandes gastos económicos, además de ser de fácil interpretación. El tratamiento de este parámetro es imprescindible debido a que gracias a éste se remueven los sólidos suspendidos del agua potable y residual. La remoción de turbiedad en plantas potabilizadoras consta de diferentes procesos: la coagulación, que reduce las cargas de las partículas; la floculación que es la agregación de partículas para formar flóculos; la sedimentación que es el proceso que permite el asentamiento de las partículas previamente coaguladas y floculadas gracias a la fuerza de gravedad, logrando que éstas ya no estén inmersas en el agua (American Water Works Association [AWWA], 1999); y la filtración que es el paso del agua por arena fina para la remoción final de partículas (Vargas, 2004). La floculación depende directamente de la temperatura y el pH del agua, por lo que se debe controlar dichos parámetros para mejorar eficiencias en el proceso (Trujillo et al., 2014).

Para llevar a cabo un mejor tratamiento del agua en Zamorano se planea establecer una planta potabilizadora de agua en colaboración con el Programa AguaClara de la Universidad de Cornell. AguaClara, como parte del programa multidisciplinario de dicha universidad, diseña plantas de tratamiento de agua comprometidas a la sustentabilidad ambiental, social y económica a largo plazo. Actualmente AguaClara cuenta con 18 plantas en alrededor de Honduras, las cuales proveen agua de alta calidad a las poblaciones abastecidas. Las plantas AguaClara tienen impactos ambientales porque no requieren de bombas ni electricidad para el tratamiento de aguas, y funcionan solamente con la fuerza de gravedad (Cornell University, s.f.).

Actualmente Zamorano cuenta con una fuente principal de agua conformada por varios manantiales de la Reserva Biológica Uyuca. Dada la demanda del recurso se considera necesario colectar agua adicional del río Santa Inés, cuya calidad se ve afectada por procesos de erosión y arrastre de sedimentos que hacen que su uso requiera diferentes tratamientos para su respectiva potabilización. Estudios anteriores de las dos fuentes demuestran que el agua de Zamorano requiere la implementación de un proceso completo de potabilización.

Colindres (2010), analizó diferentes parámetros de calidad del agua en Zamorano. En la evaluación de eficiencia de alcalinizantes comerciales (carbonato de calcio y bicarbonato de sodio), determinó que las dosificaciones en el tratamiento del agua eran muy inferiores a las necesarias para adecuar el pH a un valor mínimo de 6.5. En la evaluación de pH del agua en el interior de la institución se determinaron valores constantes máximos promedio de 4.0 y 3.9. Como resultado de este estudio se mejoró el proceso de alcalinización mediante la instalación de un nuevo sistema de alcalinización.

Enríquez (2012), realizó análisis de pH y elementos totales y disueltos del agua en Zamorano. Los resultados de los análisis de las fuentes de abastecimiento de agua mostraron que El Benque (donde se determinó un pH de 4.32) y Agua Amarilla (donde se obtuvieron pH aún más ácidos), poseen concentraciones de Al y Fe muy elevadas. Agua

Amarilla obtuvo los valores más altos en cuanto a aluminio, el cual se presentó en concentraciones cinco veces mayor que el valor máximo permisible; y El Benque presentó excedentes dos veces mayor que el máximo admisible para el mismo elemento. De la misma manera el hierro presente excedió los valores por hasta 50 veces más de lo permitido.

Martínez y De León (2013) realizaron caracterizaciones físico-químicas de agua cruda de las fuentes de abastecimiento de Uyuca y Santa Inés en época seca y lluviosa. Se encontró que en Uyuca, el valor pH promedio del agua es de 4.8, valor que se encuentra por debajo del límite permisible para agua potable de 6.5. La presencia de aluminio total excede hasta 15 veces el valor máximo de 0.2 mg/L. Mediante la aplicación de $Al_2(SO_4)_3$ (sulfato de aluminio) se removió turbiedad y color, pero el coagulante no fue eficiente en la remoción de metales. La mezcla de fuentes en proporción 50:50 (Santa Inés y Uyuca) tiene efectos favorables en el pH de la fuente Uyuca y en la turbiedad y el color de la fuente Santa Inés. Además, realizaron pruebas de aireación para la remoción de aluminio, las cuales resultaron ineficientes.

El consumo de agua con características por encima de la norma y la presencia de ciertos metales representan un gran riesgo para la salud humana. Según afirma Beltramini et al. (2003), los metales se caracterizan por tener un efecto de bio-acumulación en el organismo. En concentraciones por encima del límite recomendado pueden repercutir en la calidad del agua y en posibles enfermedades, por lo que Zamorano requiere optimizar los procesos de potabilización del agua para consumo e incorporar nuevos tratamientos para reducir las concentraciones de metales en el agua de consumo.

El estudio se elaboró con el fin de evaluar si los procesos propuestos para la planta de potabilización serán eficientes y adecuados para mejorar la calidad del agua de las fuentes de Uyuca y Santa Inés. Como objetivos específicos se establecieron:

- Cuantificar la turbiedad y las concentraciones de aluminio y hierro de las fuentes de abastecimiento de agua potable de Zamorano de manera independiente como línea de base para determinar el tratamiento.
- Caracterizar el comportamiento del agua en diferentes proporciones de la mezcla.
- Determinar las dosis adecuadas de PAC para tratar la turbiedad de ambas fuentes en diferentes proporciones de mezcla y escenarios de turbiedad.
- Evaluar la eficiencia de la remoción de aluminio y hierro por la adición de PAC y ácido fosfórico en diferentes proporciones de mezcla de las fuentes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en la Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano entre los meses de mayo a septiembre del 2016. Se consideraron puntos de muestreo de dos fuentes de abastecimiento: Uyuca y Santa Inés. Las muestras del agua de Uyuca fueron colectadas de las llaves de entrada a los tanques de almacenamiento de agua cruda, ubicados en la comunidad El Jicarito. Las muestras de Santa Inés fueron colectadas en la represa de captación en el punto de salida del desarenador.

El agua de Uyuca actualmente es utilizada para consumo humano y está conformada por dos grupos de manantiales: El Benque, que conforma el 90% del caudal de la mezcla de agua potable, y Agua Amarilla que corresponde al restante 10% de la mezcla. El agua de Santa Inés es utilizada únicamente para riego en Zamorano a la fecha. Se colectaron volúmenes de 12 litros de El Benque y Santa Inés y 2 litros de Agua Amarilla en cada muestreo. Las muestras fueron colectadas cada dos semanas para obtener variabilidad en las turbiedades iniciales.

El estudio se llevó a cabo simulando etapas específicas del tratamiento de la planta potabilizadora, las cuales replican las condiciones y procesos que se llevarán a cabo cuando la misma esté en funcionamiento. El diseño plantea la utilización del agua de ambas fuentes de abastecimiento en mezclas de diferentes proporciones. Los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración deberán ser capaces de acondicionar las diferentes mezclas de agua para que estas tengan la calidad requerida para ser aptas para consumo (Figura 1).

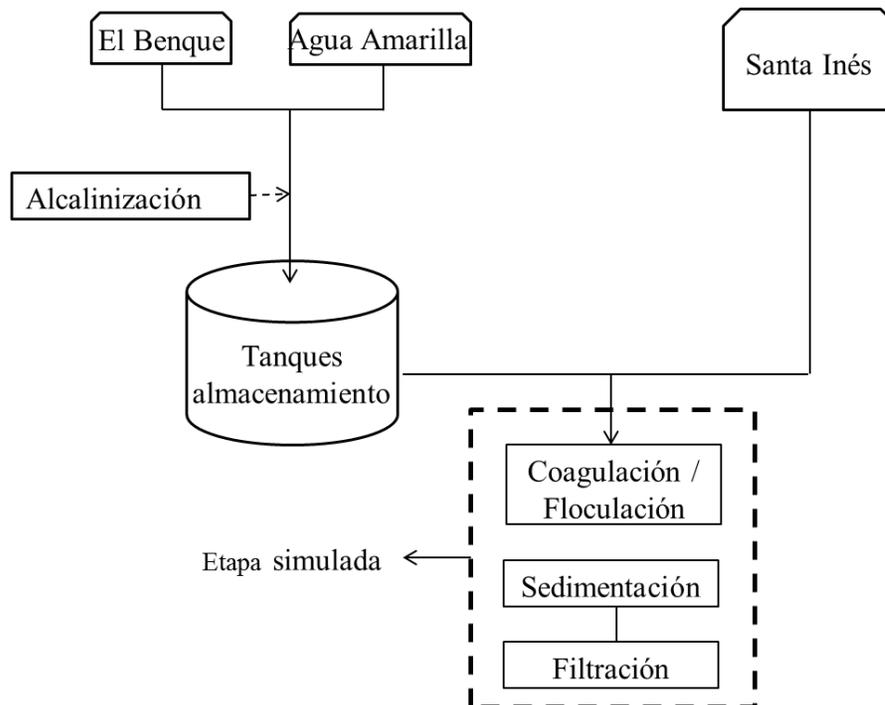


Figura 1. Etapa del proceso de potabilización simulada en el estudio.

Prueba de jarras. Se realizó con el fin de tratar la turbiedad y las concentraciones de metales (Al y Fe) en diferentes proporciones de mezcla de agua para ver si las concentraciones de estos elementos son diferentes, si el efecto de remoción varía y si la eficiencia de los reactivos es la misma. Las proporciones establecidas fueron:

- Uyuca al 100% (conformada por 90% El Benque; 10% Agua Amarilla).
- Uyuca 50%/Santa Inés 50%.
- Uyuca 75%/ Santa Inés 25%.

Para llevar a cabo las pruebas de jarras se utilizaron dos reactivos: Policloruro de aluminio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) y ácido fosfórico (H_3PO_4). El policloruro de aluminio (PAC): es un coagulante prepolimerizado de sales metálicas el cual desde la década de los 80 ha sido utilizado dada su alta eficiencia y su mejora en las características del agua. En términos generales, dicho coagulante, reduce el potencial de cargas eléctricas de los coloides que se repelen, haciendo que las especies catiónicas se adsorban en las partículas negativas, neutralizando cargas y permitiendo así que se formen micro partículas. Estas micro partículas chocan entre sí formando estructuras más grandes (flocs) (Matilainen, Vepsäläinen y Sillanpää, 2010). Estudios determinan que el PAC posee más ventajas que otros coagulantes convencionales (sulfatos de aluminio, sales de hierro, sulfato férrico) debido a que su aplicación resulta en mayor eficiencia en purificación, más eficacia en la separación, trabaja de la misma manera en rangos más amplios de pH y el aluminio (Al) residual es menor (Torra, Valero, Bisbal y Tous, 1998).

Los ortofosfatos son compuestos encontrados de manera inorgánica en la naturaleza, se presentan en agua natural por medio de procesos de erosión de material roca fosfórica y sedimentos (Sánchez de Fuentes, 2001). Los ortofosfatos son sales inorgánicas formadas por la sustitución parcial o total del hidrógeno por metales. Los ortofosfatos han sido utilizados en adición a un coagulante para reducir la residualidad del aluminio en el agua debido a que forma complejos con diferentes metales por medio de reacciones complejométricas (Frommell, 2004). El ácido fosfórico (H_3PO_4), un tipo de ortofosfato, es un ácido que constituye un grupo de compuestos de gran importancia industrial. Posee una densidad relativa de 1.83 y tiene un punto de fusión de 42.35 °C. Está comúnmente presentado en forma líquida (QuimiNet, 2006).

La prueba de jarras se dividió en dos etapas: la primera etapa consistió en la determinación de la dosis adecuada de coagulante para cada muestreo y para cada mezcla dado que las turbiedades fueron fluctuantes entre cada muestreo debido a eventos de precipitación. Se registraron los parámetros básicos (pH, temperatura y conductividad eléctrica) antes y después de la prueba. En esta primera etapa se determinó la eficiencia del reactivo PAC en la remoción de turbiedad, aluminio y hierro. La segunda etapa de la prueba consistió en suministrar dosis de ácido fosfórico (H_3PO_4) de 0, 2, 4 y 6 mg/L, para determinar si la adición de dicho ácido mejora la eficiencia en la reducción del aluminio. La eficiencia de remoción para cada parámetro y reactivo se midió con la Ecuación 1:

$$\%Eficiencia = \left(\frac{\text{Valor inicial} - \text{Valor final}}{\text{Valor final}} \right) \times 10 \quad [1]$$

Luego de la adición de los reactivos que correspondieron a cada etapa de la prueba de jarras, se procedió a dejar el agua en reposo durante aproximadamente 30 minutos, para así dar paso a la sedimentación de las partículas. Una vez hecho esto, el agua fue filtrada con filtros de arena fina para garantizar que el agua salga lo más clarificada posible.

Cuadro 1. Pruebas de jarras realizadas para las diferentes proporciones y reactivos.

No. Muestreo	Fecha	Proporción (%)	No. Pruebas de jarras (PAC)	No. Pruebas jarras (H ₃ PO ₄)	Total
1	27/06/2016	100	1	1	8
		75/25	2*	1	
		50/50	2*	1	
2	11/07/2016	100	1	1	7
		75/25	1	1	
		50/50	2*	1	
3	25/07/2016	100	1	1	6
		75/25	1	1	
		50/50	1	1	

*: Pruebas de jarra repetidas para encontrar dosis adecuada.

Para mantener condiciones de pH adecuadas se agregó carbonato de sodio, conocido comercialmente como soda ASH (Na₂CO₃) para neutralizar el ácido fosfórico adicionado a la muestra. Las pruebas se realizaron alrededor de un pH de 6.8 debido y consecuentemente el ácido fosfórico se disoció a di-hidrógeno de fosfato (H₂PO₄⁻). Se tomó en cuenta la constante de disociación (pKa) para el sistema de fosfatos que gobiernan las transiciones entre sus especies: pKa₁=2.15, pKa₂=7.20, pKa₃=12.32 (González, s.f.) y posteriormente se estimó la dosis equivalente necesaria de soda ASH (Ecuación 2):

$$D_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = D_{\text{H}_3\text{PO}_4} \left(\frac{1 \text{ mol H}_3\text{PO}_4}{98 \text{ g H}_3\text{PO}_4} \right) \left(\frac{1 \text{ eq}}{1 \text{ mol H}_3\text{PO}_4} \right) \left(\frac{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3}{2 \text{ eq}} \right) \left(\frac{106 \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3} \right) \quad [2]$$

Una vez terminada la prueba de jarras se vertió el agua cuidadosamente a través de filtros de arena para remover cualquier partícula no deseada, además los filtros ayudan a retener cualquier remanente de hierro disuelto. El volumen de muestra captado fue de 100 mL para cada alícuota. El mismo volumen fue preservado con la adición de 0.1 mL H₂SO₄ 6N para que no existan cambios ni alteraciones en las muestras.

pH. El método que se utilizó para la medición de pH de las muestras fue el HACH® 8156. El equipo requerido para dicho método es un potenciómetro, el cual posee un sensor y electrodo que hace lectura de pH.

Turbiedad. Para el análisis de turbiedad se utilizó el método Nefelométrico mediante el equipo turbidímetro (Standard Methods, 2005). El método compara la intensidad dispersada de luz de una muestra en condiciones definidas, con la intensidad dispersada de luz por una suspensión bajo las mismas condiciones. La relación entre la intensidad de la luz dispersada y la turbiedad es directa (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 1984).

Digestión. Posterior a la prueba de jarras, las muestras fueron digestadas con ácido clorhídrico (HCl) y calor para romper las sustancias en componentes que puedan ser analizados. El método empleado para digerir las muestras fue el HACH Digesdahl® para la determinación de metales en agua (HACH®, 1999).

Aluminio. Para el análisis de aluminio se utilizó el método HACH® 8012. En este método se añadió el contenido de diferentes reactivos a las muestras ya anteriormente digestada, además se reguló el pH de 3.5 – 4.0 con la adición de NaOH 1N y haciendo se hizo lectura del mismo con papel pH para que así el aluminio pueda ser medido por el colorímetro. Los reactivos utilizados fueron ácido ascórbico, AluVer3 y el Bleaching para la muestra blanco. La presencia de un color rojizo-naranja en la muestra se observó en presencia de aluminio.

Hierro. El método que se empleó para el análisis de hierro fue el HACH® TPTZ 8112. En este método se añadió el contenido de un sobre Ferrover a la muestra de agua previamente digerida y con pH de 3.5 – 4.0 con la adición de NaOH 1N y haciendo lectura del mismo con papel pH para así poder ser analizada en el colorímetro. Un color naranja pálido se observó en presencia de hierro (HACH®, 1999).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante cada muestreo se midió pH, turbiedad, conductividad eléctrica y temperatura de cada fuente independiente, para conocer las condiciones del agua y así poder determinar si existe relación entre las concentraciones de metales y algún parámetro en específico. Esto se hizo para inferir la posible causa de la concentración de Al y Fe en el agua de ambas fuentes de abastecimiento.

Cuadro 2. Parámetros iniciales de las muestras.

No. Muestreo	Fuente	pH	Turbiedad (UNT)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	UYB	4.80	0.40	66.4	21.3
	UYA	4.01	1.20	84.5	21.5
	SI	7.10	61.40	50.6	23.0
2	UYB	4.67	0.78	83.7	22.9
	UYA	4.09	0.94	118.5	22.9
	SI	6.83	68.20	44.1	25.0
3	UYB	4.90	2.29	63.6	23.0
	UYA	4.27	1.11	112.8	21.0
	SI	7.68	76.20	59.0	19.8

Se aplicó el coagulante PAC para la remoción de materia suspendida y así poder reducir la turbiedad a los valores permitidos por la norma (menos de 5 UNT). En todos los ensayos se logró obtener una turbiedad por debajo de este valor. Dado que las fuentes poseen pH ácidos, y que trabajar en rangos de pH neutros es parte de la metodología, se tuvo que ajustar el pH de algunas muestras para que así las condiciones sean lo más uniformes posibles entre cada análisis.

La dosis de PAC suministrada a las tres proporciones redujo la turbiedad en el agua. Las turbiedades variaron según la proporción de la mezcla, por lo que las dosis también tuvieron que ser ajustadas a cada turbiedad. La proporción 100% Uyuca no presenta problemas de turbiedad, aun así, la adición de reactivo favoreció a esta condición. Por otra parte se puede ver que conforme la proporción de Santa Inés es mayor, la turbiedad es más alta. Los valores finales obtenidos una vez adicionado el reactivo se encontraron debajo de los límites máximos permisibles.

Cuadro 3. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No.1.

Proporción (%)	pH inicial	pH ajustado	Turbiedad inicial (UNT)	Dosis PAC (mg/L)	Turbiedad final (UNT)
100	4.8	6.6	0.2	1	0.2
				2	0.0
				3	0.3
				4	0.2
75/25	4.6	6.6	15.0	4	12.0
				8	5.7
				12	2.4
50/50	6.1	7.3	26.0	14	2.1
				7	28.0
				10	28.4
				13	13.5
				15	2.6

Para la segunda toma de muestra (Cuadro 4) Uyuca no requirió de adición de reactivo PAC debido a que no presentó turbiedad. Sin embargo, las proporciones restantes presentaron valores muy por encima del límite máximo permisible. El resultado por la adición de reactivo fue positivo debido a que las dosis aplicadas redujeron los valores a menos de cinco unidades nefelométricas de turbiedad (5 UNT), las cuales fueron muy similares a las dosis utilizadas en los otros muestreos (Cuadro 3 y 5).

Cuadro 4. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No. 2.

Proporción (%)	pH inicial	pH ajustado	Turbiedad inicial (UNT)	Dosis PAC (mg/L)	Turbiedad final (UNT)
100	5.0	6.8	0.0	-	0.0
				-	0.0
				-	0.0
				-	0.0
75/25	5.6	7.4	18.9	4	9.8
				8	14.4
				16	4.0
50/50	6.3	6.3	36.4	20	14.2
				3	27.8
				4	28.4
				15	4.5
				6	29.3

El muestreo tres es el que mayores turbiedades presentó (Cuadro 5). La proporción 100% tuvo un valor más elevado, pero aún se mantuvo dentro de la norma. A pesar de esto se le adicionó una dosis de 2 mg/L, lo cual mejoró este valor acercándolo a cero. La proporción 75/25 redujo la turbiedad con la adición de PAC, la cual a su vez fue similar a los otros muestreos. Para la proporción 50/50 se presentó una turbiedad muy alta, por lo mismo la dosis requerida fue mayor para poder reducir el nivel de turbiedad a menos de 5 UNT.

Cuadro 5. Resultados de dosis de PAC y remoción de turbiedad, muestreo No.3.

Proporción (%)	pH inicial	pH ajustado	Turbiedad inicial (UNT)	Dosis PAC (mg/L)	Turbiedad final (UNT)
100	5.7	6.2	1.7	1	1
				2	0.9
				3	1.2
				4	1.1
75/25	5.5	6.7	23.1	4	9.4
				8	6.4
				12	5.5
				16	4.9
50/50	6.1	6.6	41.1	5	12.1
				15	7.1
				20	4.1
				25	2.8

Se pudieron establecer los rangos de dosis de coagulante PAC adecuados para diferentes rangos de turbiedad inicial que el agua contenga. Las turbiedades de la proporción 75/25 rondan entre 15-25 UNT, para lo que la dosis de 14-16 mg/L de PAC nos permitió lograr una turbiedad debajo de la norma.

Las turbiedades de la proporción 50/50 varían, esto debido a que Santa Inés es susceptible a cambios en turbiedad por arrastre de sedimentos debido a eventos de precipitación. Para turbiedades 25- 37 UNT la dosis de 15 mg/L fue eficiente, sin embargo, cuando la turbiedad fue mayor a 40 UNT la dosis adecuada fue de 25 mg/L de PAC.

La fuente de Uyuca posee valores de turbiedad bajos o nulos, por lo que no es necesario aplicar dosis de PAC. En caso de ser necesario, como lo es el caso del tercer muestreo, la dosis necesaria es de 2 mg/L.

En caso de que en futuras investigaciones se obtengan aguas crudas con turbiedades mayores al rango obtenido en este estudio las dosis de coagulante pueden variar. Cuando ésta aumenta, la probabilidad de colisión entre las partículas es elevada y la coagulación se dará a cabo con facilidad usando dosis menores. De manera opuesta, si se presentan

turbiedades menores la coagulación se dificulta y la dosis de coagulante puede ser igual o mayor que en turbiedades altas (Cárdenas, 2000).

A diferencia de coagulantes convencionales se puede ver que la eficiencia de remoción de turbiedad con la utilización de coagulante inorgánico polimerizado como lo es el PAC es alta. Asimismo, el PAC cumple su función aún en rangos de pH más amplios como los del presente estudio que se encuentran entre 6.2 – 7.4. Dado los valores de pH ácidos de las fuentes de agua, sobre todo Uyuca, el uso de coagulantes convencionales, como el sulfato de aluminio, clorhidrato de aluminio o polisulfatos, podrían generar problemas debido a que la regulación del pH significaría un trabajo adicional y el riesgo de que el nivel de acidez no sea el necesario para que el coagulante funcione apropiadamente es mayor. Esto podría causar que el aluminio presente en el coagulante se solubilice, estabilizando cargas de las partículas en el agua y generando riesgos a la salud y en la apariencia del agua por aglomeración de material particulado (Cogollo, 2010).

Por otra parte, los metales presentaron diferentes comportamientos según las mezclas de proporciones de ambas fuentes. A pesar de que la Organización Mundial para la Salud (OMS) no establece estándares de aluminio, la Norma Técnica para la Calidad del Agua Potable Hondureña recomienda concentraciones por debajo de 0.2 mg/L en agua potable. Las concentraciones de aluminio en la mayoría de las proporciones se obtuvieron remociones significativas pero no suficientes con la aplicación de PAC dado que ninguna dosis logró bajar la concentración por debajo del límite. En los diferentes ensayos se tuvieron eficiencias de remoción de aluminio entre 24 – 66% con la utilización de PAC.

Los resultados obtenidos por la adición de ácido fosfórico durante la mezcla rápida en la prueba de jarras muestran eficiencias de 45 – 85% de remoción, siendo estas mayores pero aún insuficientes dado que en ningún caso se logró tener concentraciones por debajo del límite en los diferentes muestreos.

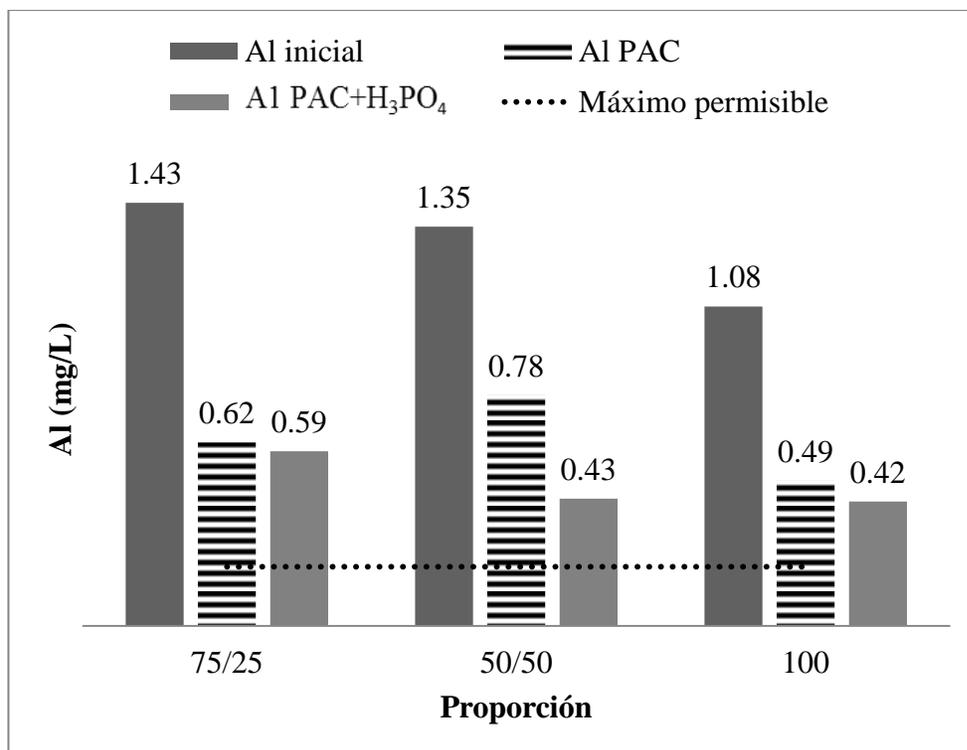


Figura 2. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 1.

La dosis PAC redujo eficientemente la concentración de aluminio en las tres proporciones analizadas. Sin embargo, la dosis de ácido fosfórico redujo aún más esta concentración. Se puede ver que los valores aún no se encuentran por debajo de los permisibles, pero las condiciones del agua son mejores con la adición del ácido (Figura 2, 3 y 4). Para el caso del segundo muestreo (Figura 3) la dosis de ácido fosfórico redujo los valores de aluminio más que en los otros muestreos. Los valores se acercan más a la norma para las proporciones mezcladas con agua de Santa Inés, y para el caso 100% Uyuca se ve que la remoción con ácido fosfórico es mayor. Esto se puede deber a que existen márgenes de error tanto en la lectura del colorímetro (por factores de dilución) como en la precisión de las dosis entre muestreos.

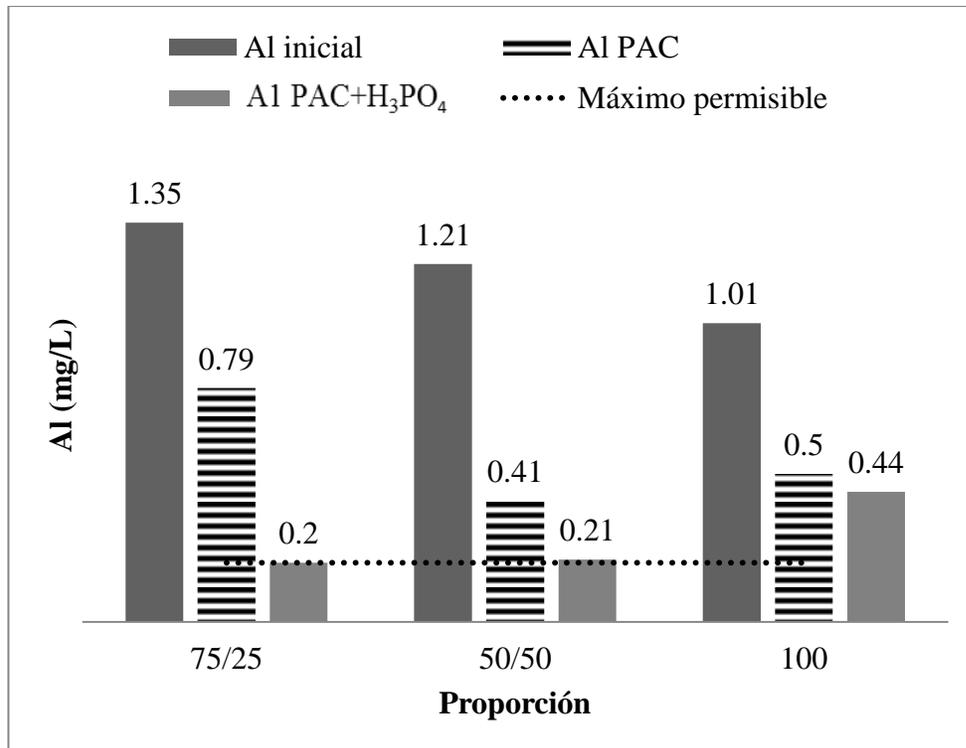


Figura 3. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 2.

El tercer muestreo presentó el mismo comportamiento en la concentración de aluminio (Figura 4). En los tres muestreos la proporción 50/50 presentaron valores más cercanos a la norma. Es el caso en el que se repiten buenas condiciones después de adicionar los reactivos, presentó un buen comportamiento frente a las diferentes dosis.

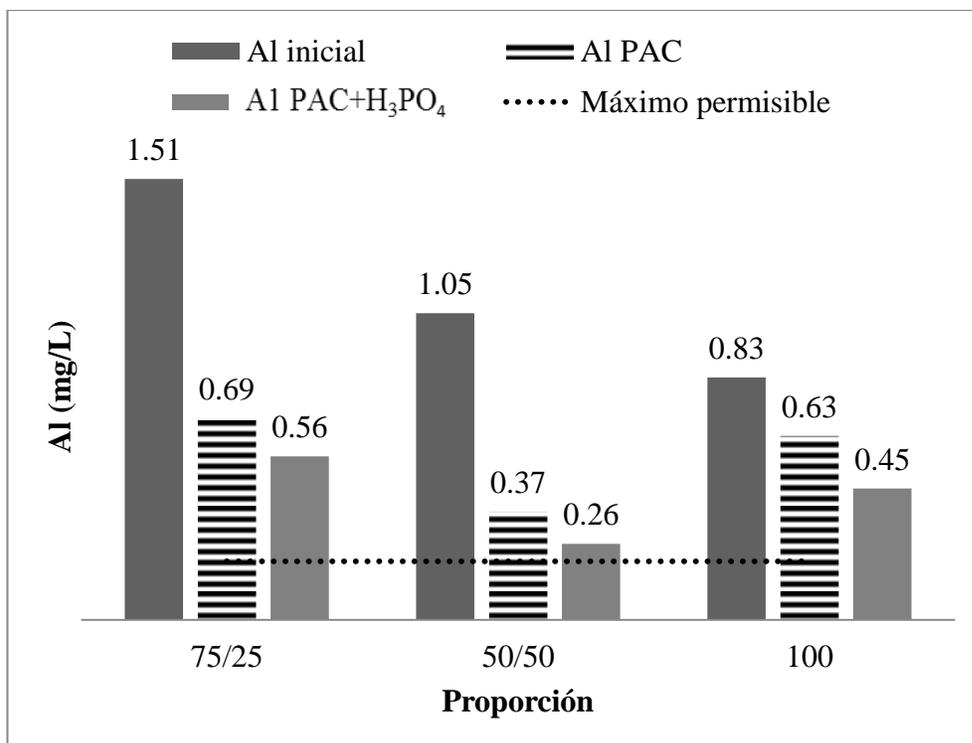


Figura 4. Comparación en la eficiencia de remoción por los dos reactivos utilizados, muestreo No. 3.

Bosivert et al. (1997) realizó un estudio similar relacionado a los ortofosfatos. En él demuestra que la adición de dicho compuesto antes de la adición de coagulante PAC resulta en formaciones menores de flóculos en comparación con la adición posterior al coagulante. Concluye que la adición de fosfatos post coagulante es adecuada para evitar formaciones escasas de flóculos y que el resto del tratamiento no se vea afectado.

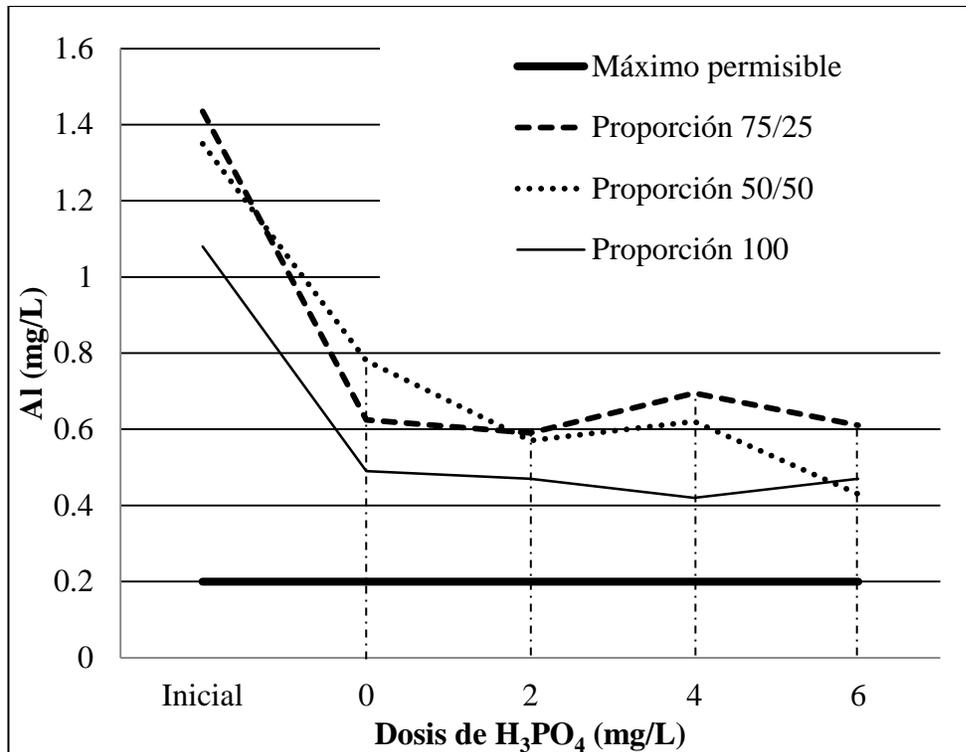


Figura 5. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H₃PO₄, muestreo No.1.

Por otra parte, otro estudio realizado para determinar la eficiencia del ortofosfato para remover el aluminio en agua por Frommell (2004), determinó que la menor concentración de aluminio residual se dio a pH 7.5 – 8. Concluye que la capacidad de los ortofosfatos para reducir el aluminio incrementan conforme el pH también incrementa, lo cual se puede deber probablemente a la relación que existe entre la reducción de la carga positiva de la superficie de las partículas de aluminio sólido conforme el pH se alcaliniza. De la misma manera utilizó filtros de membrana de celulosa 0.45 μm, lo cual una vez más nos indica que los filtros de arena pueden no ser la mejor opción para tratar aluminio.

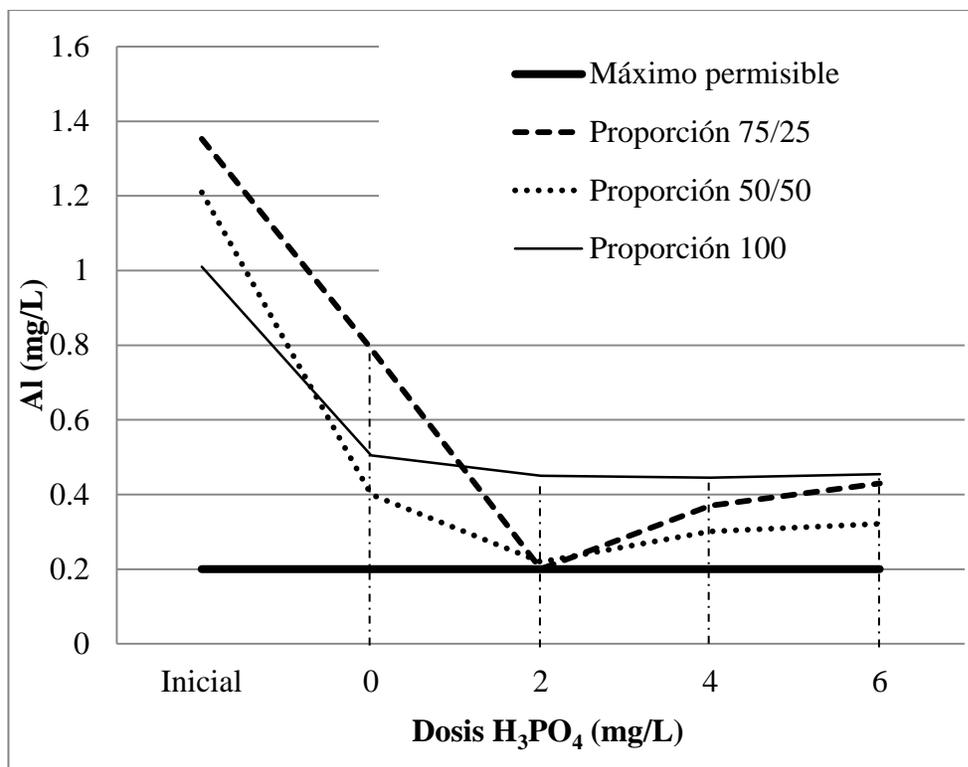


Figura 6. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H₃PO₄, muestreo No.2.

Estudios de la eficiencia de remoción de aluminio ortofosfatos hechos por Agarwal (2016) determinaron que la concentración del aluminio varía según el pH. Los resultados obtenidos muestran que la mínima y máxima concentración se encontraron en pH 5.5 – 6.5 respectivamente, y que la remoción más eficiente de aluminio por aplicación de ortofosfato se dio en las muestras con pH ajustado a 5.5. Dicho factor pudo haber afectado la capacidad de remoción del ortofosfato en el presente estudio debido a que se trabajó en un rango de pH de 6.2 – 7.4, lo que pudo no haber sido la condición más favorable. Además, en este estudio el reactivo ortofosfato se agregó en diferentes estaciones del tratamiento, durante la mezcla rápida y un minuto antes o después de la adición del coagulante PAC, y a diferencia del estudio se utilizaron filtros de membrana de celulosa 0.45 μ m. El tiempo en el cual el ortofosfato se adicionó no afectó los resultados dado que no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre la concentración de aluminio ni turbiedad en los tres diferentes tiempos, por lo que en el presente estudio la aplicación de ortofosfato después del coagulante en cada repetición fue adecuada. Las concentraciones finales de aluminio obtenidas en el presente estudio pudieron verse afectadas por el tipo de filtro utilizado. La membrana de celulosa tiene mayor capacidad de filtrar partículas más pequeñas, en lo cual los filtros de arena utilizados en este estudio podrían fallar o tener intrusión, contaminando nuevamente la muestra final. Los resultados por el mismo estudio variaron entre tipo de ortofosfato utilizado, ya que además del ortofosfato común utilizó ortofosfato de sodio, el cual tuvo mejores eficiencias en la remoción de aluminio. Éste reactivo podría ser utilizado para ver si existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción.

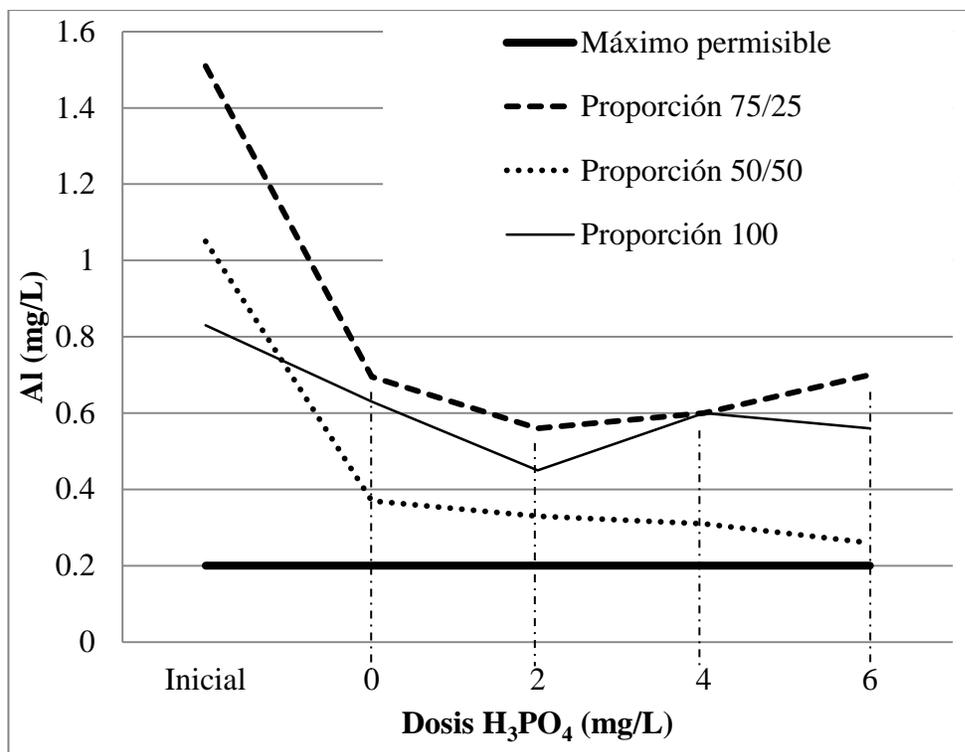


Figura 7. Concentraciones de aluminio con diferentes dosis de H₃PO₄, muestreo No.3.

Es en este punto que se encuentran ciertas controversias. Por una parte estudios de Agarwal (2016) no encuentran una diferencia significativa en la adición antes, durante o después del coagulante, mientras que Bosivert et al. (1997) establecieron una diferencia en la formación de flóculos y una mejor remoción cuando el ortofosfato es aplicado después del coagulante. Además, Agarwal (2016) demostró mejores eficiencias de remoción del ortofosfato a pH más ácidos, mientras que Frommell (2004) demostró que a medida que el pH es más básico, la eficiencia del ortofosfato es mayor.

Las concentraciones de aluminio en las fuentes de Uyuca y Santa Inés son muy elevadas, y es por esto que se requieren diferentes procesos para poder remover dicho metal a niveles dentro de la norma. Srinivasan (1999) indica que altas concentraciones de aluminio en agua tratada puede conducir a elevaciones en turbiedad, puede reducir eficiencias de desinfección y se podría precipitar en forma de Al(OH)₃ (hidróxido de aluminio) en los sistemas de distribución. Para poder inferir o determinar el factor que cause las altas concentraciones se relacionaron diferentes parámetros con la presencia de aluminio. Estos parámetros fueron el pH, la conductividad y la turbiedad.

No existió relación alguna con conductividad ($R = 0.4033$), por lo que no influye directamente a la presencia de aluminio en el agua. Por otra parte, la turbiedad tuvo una relación con el aluminio, lo cual resultó en un coeficiente de correlación de pearson (R) de 0.969. Este coeficiente de correlación significa que el cambio en la turbiedad explica el 96.9% de los cambios experimentados en la concentración de aluminio, es decir representa una mayor relación entre las variables y el modelo generado explica su

comportamiento frente a ambas variables. La estrecha relación entre el parámetro turbiedad y la concentración de aluminio nos indica que la posible fuente de este metal sea geológica. Esto debido a que si existe una relación del aluminio con la turbiedad es porque se encuentra como sedimento o material particulado, y es por eso que es posible remover el aluminio por procesos de coagulación y floculación, lo cual agregaría las partículas existentes en el agua para ser removidas. Caso contrario, si la relación no existiera, nos indicaría que el aluminio se encuentra disuelto en el agua e independientemente de la turbiedad el aluminio seguiría presente y el proceso de coagulación y floculación no removerían este metal, por lo que habría que optar por otros métodos.

El hierro es otro metal que se encuentra por encima de los valores máximos permitidos por la norma en las fuentes de abastecimiento de agua de Zamorano. Para esto se realizaron, de la misma manera, pruebas de jarras con la aplicación de reactivo PAC para agregar las partículas de hierro y poder removerlas mediante filtración.

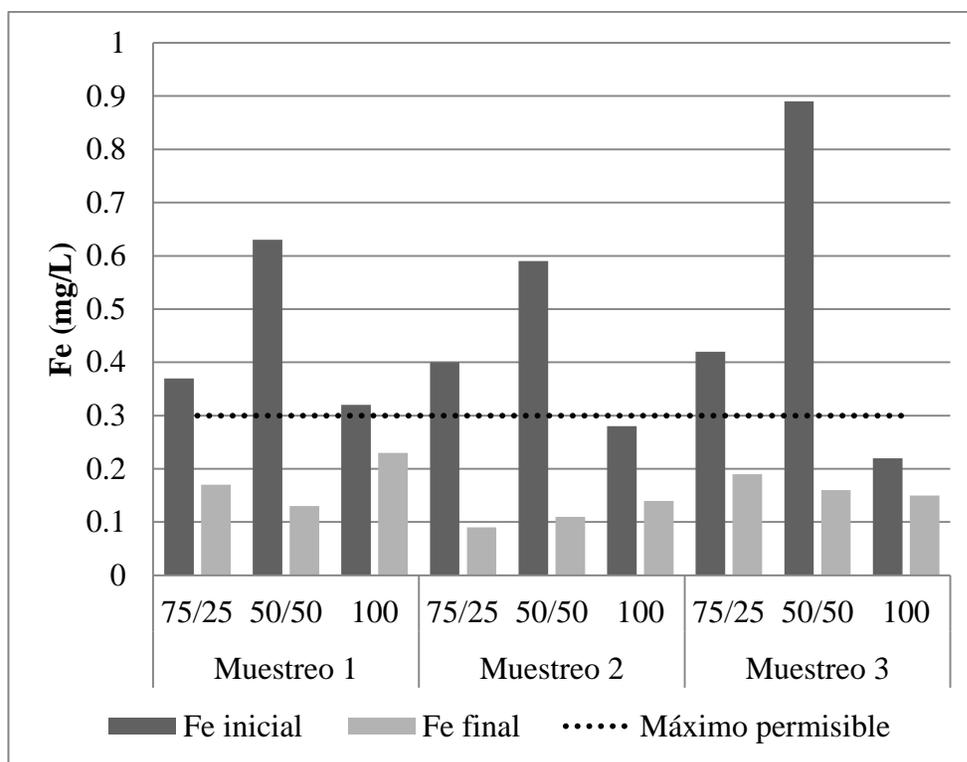


Figura 8. Remoción de hierro por adición de PAC.

La aplicación de PAC permitió la remoción de hierro en las dosis adecuadas. Se obtuvieron eficiencias de remoción hasta en un 81%, lo cual es muy eficiente sobre todo para la fuente Santa Inés debido a sus altas concentraciones, lo cual no es un problema muy significativo para Yuca.

Dado que en la planta potabilizadora se contará con sistemas de filtrado por arena, en el presente estudio se filtraron las muestras después de agregar el PAC durante la mezcla rápida en las pruebas de jarras. El filtrado por arena es uno de los métodos más antiguos y eficaces para remover partículas suspendidas y contaminantes, y estudios realizados demuestran eficiencias de remoción de hierro hasta en un 90% (Demir, 2016). Estudios muestran que la presencia de oxígeno disuelto en el agua afecta al hierro presente en el agua. Se determinaron mayores concentraciones de este metal en aguas estancadas que en aguas que fluyen continuamente (Sarin, 2003). A pesar de que no se han realizado gran número de estudios con respecto a la eficiencia de reactivo PAC en la remoción de hierro, los resultados pueden llevarnos a inferir que el agua proveniente de ambas fuentes, la cual se encuentra fluyendo constantemente, está contaminada con hierro por causas geológicas.

4. CONCLUSIONES

- Las condiciones de turbiedad, aluminio y hierro en las fuentes de abastecimiento de Zamorano varían entre fuentes y entre temporadas. Las fuentes de Uyuca poseen turbiedades bajas, en particular los manantiales de El Benque. Por el contrario, en la fuente de Santa Inés, se encontraron turbiedades de hasta de 75 UNT durante el período de estudio, lo cual indica que es imprescindible contar con un tratamiento para esta fuente. Las concentraciones de aluminio tanto en la fuente de Uyuca como en la de Santa Inés superan la normativa y requieren tratamiento. Uyuca excede hasta en cinco veces el valor permitido por la norma, mientras que Santa Inés la excede hasta 15 veces.
- En las diferentes proporciones de mezcla establecidas en el presente estudio se pudieron determinar mejorías en todas las condiciones. Conforme la proporción de agua de Uyuca incrementa en las diferentes mezclas, la turbiedad, aluminio y hierro disminuyen. A pesar de esto, los valores para los tres parámetros aún fueron elevados por lo que se requiere tratamiento.
- Las diferentes proporciones establecidas demostraron comportamientos similares en cada muestreo, asimismo, las dosis de coagulante PAC fueron similares y se obtuvieron remociones de turbiedad adecuadas para cada mezcla.
- Los resultados de las pruebas de jarras y las dosis de coagulante PAC en agua cruda son sólo aplicables para los rangos de turbiedad obtenidos de tres muestreos realizados, entre 0 – 41.1 UNT. Es una consideración razonable debido a que la dosis de coagulante aplicada en aguas con turbiedades fuera de los rangos presentes en este estudio variarían.
- La adición en conjunto de PAC con ácido fosfórico (H_3PO_4) tuvo mejores eficiencias en la remoción de aluminio que la aplicación de PAC por sí sola. Sin embargo, las condiciones brindadas pudieron no ser las más óptimas, por lo que pudieron afectar la eficiencia del ácido fosfórico.
- El diseño de la planta potabilizadora debe estar sujeto a cambios en el diseño de sus procesos. El agua proveniente de la fuente Uyuca, la cual es actualmente consumida en la EAP, sufre acondicionamiento de pH antes de entrar al sistema de distribución. Este aspecto debe ser reconsiderado debido a que, en caso de que la remoción de aluminio requiera pH ácidos, se debe tratar el aluminio en el agua sin

afectar su pH ya que por naturaleza el agua es ácida, y luego de ser tratado en la planta el mismo debe ser regulado para entrar al sistema de distribución.

- Debido a la estrecha relación turbiedad – aluminio, se determinó que la presencia de dicho metal en el agua de ambas fuentes está en forma de materia suspendida por sedimentos y materiales geológicos, por lo que no se encuentra disuelto y si puede ser removido por procesos de coagulación y floculación.
- La adición de PAC remueve eficientemente el hierro presente en ambas fuentes. Las concentraciones logradas en las diferentes proporciones se encuentran por debajo de la norma. Esto no debería significar un problema en el diseño de la planta potabilizadora.

5. RECOMENDACIONES

- La posibilidad de que ciertas partículas de aluminio se introduzcan en los filtros de arena es motivo a considerar, debido a que otros estudios utilizaron filtros de membrana de celulosa 0.45 μm obtuvieron mayores remociones. En condiciones reales de la planta potabilizadora contará con filtros de arena, pero podrían realizarse estudios comparativos entre los dos tipos de filtros (membrana y arena) para determinar la eficiencia de los filtros de arena.
- Elaborar una evaluación más profunda de costos de operación una vez se establezca el diseño de la planta, ya que si éste se realiza sin el diseño sería erróneo basarse en costos unitarios de los reactivos requeridos. Se deben considerar costos globales de tratamientos, dosis de coagulante, acondicionadores de pH, producción de lodos, el agua requerida para el lavado de filtros y la frecuencia de operación.
- Debido a que existe literatura que demuestra diferentes eficiencias entre ortofosfatos, realizar pruebas con dos tipos de reactivo ortofosfato diferentes, es decir, el ácido fosfórico (utilizado en el presente estudio) con el ortofosfato de potasio y el ortofosfato de sodio para determinar cuál aplicaría mejor a la remoción de aluminio.
- Realizar análisis de sulfatos en las fuentes debido a que, según literatura, estos compuestos forman complejos con el aluminio en aguas ácidas, como la de Uyuca, y su presencia podría influenciar en las concentraciones fuera de la norma.
- Ya que se encontró controversia en cuanto al tiempo de adición de ortofosfato, se recomienda realizar un estudio con la adición de ortofosfato en diferentes puntos del tratamiento (antes, durante y después de la adición de coagulante) para ver el comportamiento de determinar si existe diferencias significativas.
- Realizar más réplicas y en diferentes épocas para así poder determinar un mejor comportamiento de las diferentes proporciones y poder establecer las dosis necesarias como protocolos de tratamiento.

6. LITERATURA CITADA

- Agarwal, S., Tyagi, I., Gupta, V. K., Dehghani, M. H. y Ghanbari, R. (2016). Investigating the residual aluminum elimination from conventional and enhanced coagulation by phosphate compounds in wastewater treatment process. *Journal of Molecular Liquids*, 221, 673-684. ELSEVIER Base de datos.
- Andía-Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua. Coagulación y Floculación. SEDAPAL.
- American Public Health Association. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington. 1265 pp.
- Beltramini-Trevilato, T. M., Segura-Muñoz, S. I., Takayanagui, A. M. M., Hering, S. E. y Cupo, P. (2003). Metales pesados en agua de bebederos de presión. *ALAN*, 53.
- Bosivert, J. P., Cong To, T., Berrak, A. y Jolicoeur, C. (1997). Phosphate adsorption in flocculation processes of aluminium sulphate and poly-aluminium-silicate-sulphate. *Water Research*, 31(8): 1939- 1946.
- Buckman, H. O. y Brady, N. C. (1966). Naturaleza y propiedades de los suelos. Barcelona, España: Montaner y Simón S.A.
- Christensen, J. (2015). Plan del estudio de Tratabilidad para planta potabilizadora. Honduras. Cornell University. Comunicación personal.
- Colindres-Mejía, A. L. (2010). Evaluación del sistema de potabilización en la Escuela Agrícola Panamericana. Tesis de pregrado. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 42 P.
- Colter, A. y Mahler, R. L. (2006). Iron in drinking water. Visitado el 20 de noviembre de 2015. Recuperado: <http://www.cals.uidaho.edu/edComm/PDF/PNW/PNW589.pdf>
- Hafeman, D., Factor-Litvak, P., Cheng, Z., Van Geen, A., y Ahsan, H. (2007). Association between Manganese Exposure through Drinking Water and Infant Mortality in Bangladesh. *Environmental Health Perspectives*, 115(7), 1107–1112. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/4619518>

- De León, B. y Betzy, Y. (2013). Determinación de los requerimientos de la potabilización para un sistema de agua en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Tesis Ing. Agr. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 22 P.
- Enríquez-Balcázar, L. G. (2012). Evacuación de la presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable de Zamorano. Tesis de pregrado. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 30 P.
- Food and Agriculture Organization. (2015). Los 14 temas de apoyo al desarrollo sostenible. Agua. Consultado el 11 noviembre de 2015. Recuperado en: <http://www.fao.org/post-2015-mdg/14-themes/water/es/>
- Frommell, D., Feld, C., Snoeyink, V., Melcher, B., y Feizoulof, C. (2004). Aluminum residual control using orthophosphate. *Journal American Water Works Association*, 96(9), 99-109. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/41311900>
- Fundación Nacional de Salud (FUNASA). (2013). Manual Práctico de Análisis de Agua. Fundación Nacional de Salud, Brasilia. 150 P.
- González Mañas, J. J. (S.f.). Curso de Biomoléculas. Universidad del país Vasco. Recuperado en: <http://www.ehu.es/biomoleculas/buffers/buffer1.htm>
- Hunter, C., Perkins, J., Tranter, J. y Hardwick, P. (2000). Fecal Bacteria in the Waters of an Upland Area in Derbyshire, England: The Influence of Agricultural Land Use. *Journal of Environmental Quality*, 29(4), 1253.
- Institute of Medicine (US). (2001). Panel on Micronutrients. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington (DC): *National Academies Press*. Recuperado de :http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK222310/pdf/Bookshelf_NBK222310.pdf
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1984). Agua potable. Determinación de la turbiedad, método nefelométrico. Recuperado en: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0971.1984.pdf>
- Cogollo Flórez, J. M. (2010). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *Dyna*, 165, 18-27. Revisado el 01 septiembre de 2016 de Universidad Nacional de Colombia Base de datos.
- Letterman, R. D., Johnson, C. E., & Viswanathan, S. (2004). Low-level turbidity measurements: A comparison of instruments. *Journal / American Water Works Association*, 96(8).
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. y Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid*

and Interface Science, 159, 189-197. Recuperado el 17 de Agosto de 2016, De ELSEVIER Base de datos.

Manav-Demir, N. (2016). Experimental Study of Factors that Affect Iron and Manganese Removal in Slow Sand Filters and Identification of Responsible Microbial Species. *Environ. Stud.*, 25, 1453-1465. Recuperado el 30 de Agosto de 2016, De ELSEVIER Base de datos.

Organización Mundial para la Salud/ Centro Panamericano de Ingería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (1995). Análisis de metales en agua potable y residual por espectrofotometría de absorción atómica. Programa de Control de Calidad y Desarrollo de Laboratorios. Lima-Perú. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/analisis.pdf>

Organización Mundial para la Salud/ Centro Panamericano de Ingería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Recuperado de: <http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/620/1/BVCI0000570.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. Recuperado el 30 de mayo de 2016 en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gd_wq3_es_full_lowres.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2015). Agua. Nota descriptiva N°391. Recuperado el 30 de mayo de 2016 en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

Organización Mundial de la Salud. (S.f.). Agua, Saneamiento y Salud (ASS). Recuperado el 30 de mayo de 2016 en: http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/

QuimiNet. (2006). Aplicaciones del ácido fosfórico. Recuperado en: <https://www.quiminet.com/articulos/aplicaciones-del-acido-fosforico-8718.htm>

República de Honduras, Ministerio de Salud. Norma técnica para la calidad del Agua Potable. Acuerdo No. 084 del 31 de julio de 1995. Consultada 23 julio de 2015. Recuperado en: <http://www.salud.gob.hn/transparencia/archivos/regulacion/leyes/NORMA%20TECNICA%20CALIDAD%20AGUA%20POTABLE%20%20Honduras.pdf>

Romero, M. S.f. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Universidad Rafael Landivar. Boletín electrónico. No. 08. Recuperado en: <http://www.ozonoalbacete.es/wp-content/uploads/2011/08/estudio-agua-ozono.pdf>

Rondeau, V., Commenges, D., Jacqmin-Gadda, H. y Dartigues, J. F. (2000). Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: an

- 8-year follow-up study. *Am J Epidemiol*, 152(1), 59-66. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2215380/>
- Sarin, P., Snoeyink, V.L., Bebee, J., Jim, K.K., Beckett, M.A., Kriven, W.M. y Clement, J.A. (2004). Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen. *Water Research*, 38, 1259-1269.
- Servicios de Aguas de Misiones (SAMSA). (S.f.). Proceso de potabilización del agua. Recuperado en: http://www.samsa.com.ar/explotacion/proceso_agua_potable.pdf
- Srinivasan, P.T., Vlraraghavan, T. y Subramanlan, K.S. (1999). Aluminium in drinking water: An overview. *Water S.A.*, 25 (1). Recuperado en: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SRINIVASAN%201999%20Aluminium%20in%20Drinking%20Water%20-%20An%20Overview.pdf
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA. AWWA. WEF. 21th edition 2005, Part. 2130-B: Nephelometric Method.
- Suay Llopis, L. y Ballester Díez, F. (2002). Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Rev. Esp., Salud Pública*, 76 (6). Recuperado en: http://scielo.isciii.es/s/cielo.php?pid=S113557272002000600002&script=sci_arttext&tlng=e
- Torra, A., Valero, F., Bisbal, J. L. y Tous, J. F. (1998). Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales: Su comportamiento como coagulante dentro del ámbito de la química del aluminio. *Tecnología del agua*, Junio 1998. Recuperado el 17 de agosto de 2016, de: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/policloruro_aluminio.pdf
- Torres-Molinares, C. (2006). Procedimiento para la medición del potencial de hidrógeno (pH). Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas. Recuperado en: <http://www.utp.ac.pa/documentos/2011/pdf/PCUTP-CIHH-LSA-103-2006.pdf>
- Trejo-Vázquez, R. y Hernández Montoya, V. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Conciencia tecnológica*, 25. Recuperado en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402508>
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S. y Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista ION*, 27(1), 17-34. Recuperado el 7 de Julio de 2016, de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120100X2014000100003&lng=en&tlng=es
- Woolf, A., Wright, R., Amarasiriwardena, C. y Bellinger, D. (2002). A child with chronic manganese exposure from drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 110 (6), 613-616.

7. ANEXOS

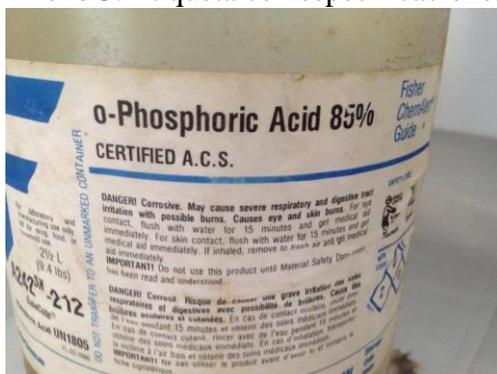
Anexo 1. Punto de muestreo en desarenador de Santa Inés



Anexo 2. Equipo de jarras y filtros de arena utilizados en el estudio.



Anexo 3. Etiqueta con especificaciones del ácido fosfórico.



Anexo 4. Resultados correlación de Pearson.

Variable		Aluminio	Tubierdad
Aluminio	Correlación de Pearson	1	.969**
	Sig. (bilateral)		.001
	N	6	6
Tubierdad	Correlación de Pearson	.969**	1
	Sig. (bilateral)	.001	
	N	6	6