

# POTENCIAL ZETA ( $\zeta$ ) COMO CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN DE DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

## ZETA POTENTIAL ( $\zeta$ ) AS A CRITERION FOR OPTIMIZATION OF COAGULANT DOSAGE IN A DRINKING WATER TREATMENT PLANT

BIBIANA BETANCUR C.

*Ing. Química, Esp. Ing. Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. betancourc@unal.edu.co*

DAVID M. JIMÉNEZ G.

*Ing. Químico, Grupo de Investigación Aguas y Aguas de Pereira, Línea Agua Potable, dmjimenez@aguasyaguas.com.co*

BALMES G. LINARES

*Químico Industrial, Grupo de Investigación Aguas y Aguas de Pereira, Línea Agua Potable, blinares@aguasyaguas.com.co*

Recibido para revisar Enero 20 de 2011, aceptado Junio 28 de 2012, versión final Julio 23 de 2012

**RESUMEN:** La calidad del agua cruda del Río Otún que abastece la planta de tratamiento de agua potable de Aguas y Aguas de Pereira puede presentar fluctuaciones en cortos periodos de tiempo. Por esta razón se requiere un instrumento que permita tomar decisiones rápidas para modificar la dosis de coagulante a utilizar en el tratamiento con base en un criterio cuantificable y preciso como el potencial zeta ( $\zeta$ ). En este estudio se determinó que para un intervalo de  $\zeta$  desde -2.28 mV a +1.2 mV del agua coagulada se obtienen valores bajos de turbiedad y color del agua sedimentada. Es posible alcanzar un óptimo desempeño del proceso de floculación y sedimentación efectuando mediciones de  $\zeta$  en el agua coagulada como indicador de desestabilización de las partículas.  $\zeta$  presenta una correlación positiva con la dosis de coagulante aplicada, modificando la dosis de coagulante es posible alcanzar valores de  $\zeta$  cercanos a cero.

**PALABRAS CLAVE:** Potencial zeta, coagulación, agua sedimentada, turbiedad, tratamiento convencional

**ABSTRACT:** The quality of raw water of Otun River that supplies the water treatment plant has fluctuations in short periods of time. Thus a tool is required to make quick decisions to modify the coagulant dose used in treatment, based in a measurable and precise criterion as zeta potential ( $\zeta$ ).

In this study was determined that the range of values of  $\zeta$  [-2.28 mV – 1.2 mV] of coagulated water, lower values of settled water turbidity and color are obtained. It was observed that is possible to achieve a better performance of flocculation and settling processes measuring  $\zeta$  of coagulated water as an indicator of particle's destabilization.  $\zeta$  presents a positive correlation with coagulant dose, therefore modifying coagulant dosage is possible to obtain  $\zeta$  close to zero.

**KEY WORDS:** Zeta potential, coagulation, settled water, turbidity, conventional treatment

### 1. INTRODUCCIÓN

La remoción de contaminantes es el propósito principal del tratamiento de aguas naturales para consumo humano, teniendo en cuenta que la calidad del agua tratada debe cumplir todas las reglamentaciones actuales para agua potable [1]. La turbiedad visible en el agua fue la fuerza impulsora de los primeros tratamientos de agua, ya que esto se asociaba con un sabor y apariencia desagradables [2]. Además la materia orgánica disuelta en el agua puede incrementar la movilidad de contaminantes. Cuando se aplica cloración para desinfección en el tratamiento convencional, el cloro

reacciona con la materia orgánica natural (NOM) para formar coproductos de desinfección perjudiciales para la salud humana [3].

La coagulación química es el paso más importante para determinar la eficiencia de remoción en los procesos de coagulación/floculación/clarificación del agua y sus costos asociados. También afecta la eficiencia de remoción de las unidades de filtración y tiene impactos indirectos en la eficiencia de los procesos de desinfección. Por tanto, es importante que estos procesos de remoción en el tratamiento de agua potable se optimicen y controlen para alcanzar un

desempeño consistente y confiable del tratamiento [4]. La coagulación de NOM es un proceso relacionado con las cargas superficiales de las partículas suspendidas, por ende, la adición de productos químicos reduce la carga superficial negativa de la partícula suspendida, de manera que esta se desestabiliza y se promueve la aglomeración y posterior formación de agregado [5]

En ambientes acuosos, las partículas tienen una superficie activa y reaccionan con especies metálicas y compuestos orgánicos generando rápidas reacciones con los diferentes componentes de las aguas naturales.  $\zeta$  es un parámetro electrostático importante de las partículas suspendidas en un medio acuoso como un índice de medida que evalúa la estabilidad de las dispersiones coloidales suspendidas en el agua con respecto a la agregación de partículas y el posterior entendimiento de las operaciones físicas como floculación, flotación y sedimentación de estas suspensiones [6].

$\zeta$  se define como el potencial en el plano de cizalla en la doble capa eléctrica. Se utiliza frecuentemente en discusiones de estabilidad de coloides y su valor es considerado útil en relación con la doble capa eléctrica [7]. La doble capa es dividida en una parte compacta adyacente a la superficie y una parte difusa. En la parte difusa los iones son móviles y obedecen a leyes de mecánica estadística, los contraiones son atraídos a través de la superficie y los coiones son repelidos [8]. Existe evidencia que muestra que el modelo de doble capa eléctrica aunque es simplificado en muchos aspectos, es suficiente para abarcar las características esenciales de la realidad [9].  $\zeta$  está ubicado cerca al plano de corte, en el límite de la capa difusa y representa la ubicación efectiva de la interface sólido líquido [10].

La deposición y agregación de partículas coloidales se encuentra en muchos procesos naturales e industriales. Este fenómeno está influenciado por dos factores, el primero, transporte de partículas a grandes distancias y el segundo, interacciones partícula-partícula o partícula-sustrato en partículas cercanas. El paso de transporte es responsable del movimiento de la partícula de manera tal que pueden ocurrir colisiones, y el paso de unión está gobernado por las interacciones entre las superficies. La diversidad de estos efectos en los procesos de agregación y deposición es una indicación de la complejidad del fenómeno [11].

Los fenómenos electrocinéticos se utilizan para obtener información acerca del estado eléctrico de la interface sólido-líquido. En particular  $\zeta$  es un concepto trascendental para relacionar las cantidades medibles a nivel macroscópico con parámetros microscópicos que caracterizan el estado de los coloides [12].

Existe un gran número de técnicas para medir  $\zeta$ , una de ellas es la electroforesis. Este método determina el potencial ubicando partículas finas en un campo eléctrico y midiendo su movilidad utilizando un microscopio. La movilidad se relaciona con el  $\zeta$  utilizando la ecuación Smoluchowski [13].

Otras técnicas de medición de  $\zeta$  como las electroacústicas son herramientas útiles para medir el potencial en suspensiones acuosas concentradas, el cual utiliza ondas de sonido para la generación de diferencias de potencial macroscópicas en la suspensión [14].

Investigadores han demostrado que no es simplemente la variación de la concentración de NOM, sino el cambio en la composición y carácter de la NOM el cual crea una demanda de coagulante superior [5]. Para tener un criterio de decisión específico de dosificación de coagulante que responda a estas demandas, se propone la determinación de un rango de valores de  $\zeta$  de las partículas suspendidas en el agua después de la coagulación, que se asocie con un óptimo desempeño del proceso de coagulación, floculación y sedimentación de los sólidos suspendidos del agua.

Algunos investigadores han demostrado un enlace entre  $\zeta$  y un óptimo desempeño de la coagulación y floculación, alcanzando residuales del coagulante bajos y estables en el agua tratada cuando se minimiza  $\zeta$ . Además se ha evidenciado un definido cambio en las propiedades de los agregados con cambios en la relación de dosificación y  $\zeta$  de los flóculos resultantes [5]. Los coagulantes a base de aluminio generan preocupaciones al respecto de residuos de metales en el agua de abastecimiento público, por ello la WHO sugiere una concentración de 0.2 mg/l máximo de aluminio [15].

En la actualidad el criterio de decisión para modificación en la dosificación del coagulante es netamente cualitativo aplicando el índice de Willcomb que evalúa el tamaño y consistencia de los flóculos [16]. A causa

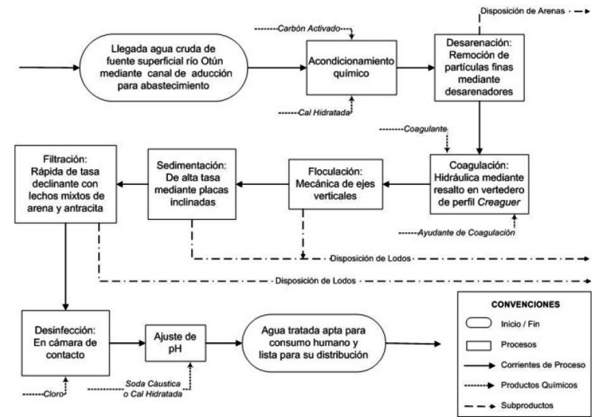
de las condiciones climáticas, actividades antrópicas y fenómenos naturales que ocurren en el cuerpo de agua de donde nace el río, las características del agua cruda del Río Otún que abastece la planta de tratamiento de Aguas y Aguas de Pereira pueden presentar fluctuaciones en cortos periodos de tiempo, por tanto se requiere un instrumento que permita tomar decisiones rápidas para modificar la dosis de coagulante a utilizar en el tratamiento [17]. Este estudio se desarrolla con el fin de obtener valores de  $\zeta$  del agua inmediatamente después de la adición de coagulante, asociados con un óptimo desempeño de la floculación y sedimentación, y valores bajos de turbiedad y color del agua tratada.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Planta de tratamiento

La planta de tratamiento de estudio de Aguas y Aguas de Pereira utiliza un proceso convencional de potabilización que incluye las etapas de coagulación con alúmina, floculación, sedimentación y filtración de acuerdo con el esquema mostrado en la figura 1. El coagulante se aplica en el resalto hidráulico generado por el paso del agua a través de un vertedero de caída libre, el cual genera un gradiente de mezcla de aproximadamente  $1000 \text{ s}^{-1}$ . La floculación y sedimentación están ubicadas en cuatro líneas paralelas de tratamiento y cada una de ellas tiene una capacidad real de 200 L/s. La floculación es de tipo mecánica de eje vertical y la sedimentación es de alta tasa con placas planas paralelas. El agua sedimentada se filtra en unidades de lecho mixto y tasa declinante escalonada. En la planta de tratamiento de estudio, para mejorar la eficiencia de coagulación se adiciona policloruro de aluminio (PAC) para el cual en estudios previos se ha comprobado que se obtienen mayores porcentajes de remoción de turbiedad que los logrados con sulfato de aluminio tipo B, además se reduce la concentración de aluminio residual en el agua tratada [18].

Se utilizó para el desarrollo de las pruebas, el agua cruda previo a la adición de coagulante, luego de su paso por unidades de adición de carbón activado y ajuste de pH en un rango de 8-8.5 con cal hidratada con posterior remoción de partículas finas en unidad de desarenación.



**Figura 1.** Esquema de planta de tratamiento Aguas y Aguas de Pereira

### 2.2. Equipos

Para el experimento de simulación de coagulación, floculación y sedimentación se utilizó equipo Jartester Phipps & Bird provisto de seis jarras rectangulares de acrílico con capacidad nominal de dos litros.

Las mediciones de turbiedad se realizaron con turbidímetro HACH 2100 AN (Requim, Pereira, Colombia) y color con colorímetro HACH DR 2800 (Requim, Pereira, Colombia). La determinación de  $\zeta$  se efectúa tomando 100 ml de muestra de cada jarra luego del primer minuto de agitación a 400 rpm, la medición se realiza en equipo Zeta Meter 3.0+ fabricado por ZETA-METER INC., Staunton, USA.

### 2.3. Reactivos

El sulfato de aluminio y policloruro de aluminio utilizados en estos ensayos fueron comprados a Química Integrada S.A, Aipe, Huila, Colombia.

Previo a cada experimento se realizó verificación de la medición de  $\zeta$  con solución coloidal de 10 g/l Min-U-Sil (Importechnical Ltda., Medellín, Colombia) y 10 g/l cloruro de sodio. Para efectuar la verificación de medición de Zeta Meter 3.0+, se determina el  $\zeta$  de una solución al 10% en volumen de la preparada previamente. El  $\zeta$  de esta solución debe estar en el rango  $-56 \pm 3 \text{ mV}$ .

### 2.4. Procedimiento

Se adicionaba a cada jarra dos litros de muestra y se dosificó policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de

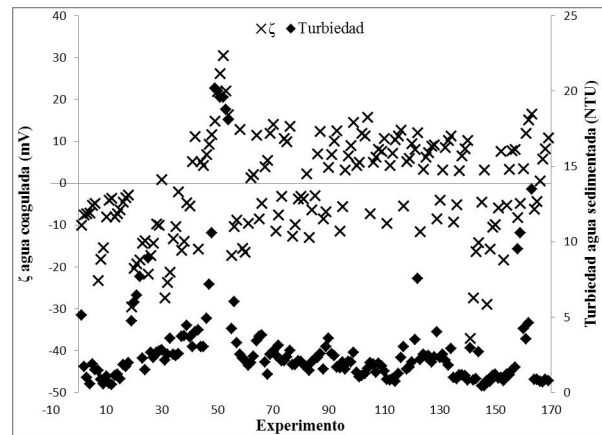
aluminio líquido (SAL) con un contenido de alúmina de 7.8%. Las dosis de SAL se aplicaron en el rango 20-60 ppm, y de PAC en el rango 5-15 ppm. La muestra se agitaba durante 1 minuto a 400 rpm, 7 minutos a 40 rpm, 7 minutos a 22 rpm, y 7 minutos a 12 rpm respectivamente. Posteriormente se dejaban las jarras en reposo durante 15 minutos, se tomaban 20 ml de muestra de cada recipiente y se realizaba la medición de turbiedad y color.

En Colombia la precipitación se caracteriza por presentar una alta variabilidad espaciotemporal y se desconoce existencia de cambios por tendencias y estacionalidad [19] con consecuentes cambios frecuentes en la turbiedad y color del agua de la cuenca que abastece la planta de tratamiento. Por esta razón se realizaron 30 experimentos, cada uno con seis dosis diferentes de SAL dentro del rango de estudio para un total de 180 mediciones. Los ensayos fueron llevados a cabo durante un período de seis meses comprendidos entre las fechas de Septiembre de 2009 y Marzo de 2010, los ensayos fueron realizados con diferentes tipos de aguas naturales que ingresaban al sistema de tratamiento, comprendiendo valores de turbiedad entre 2.31 NTU y 211 NTU, y color aparente entre 26 UPt-Co y 1670 UPt-Co con muestras tomadas en diferentes horarios que abarcaban mañana, tarde y noche. Las aguas crudas presentaron valores de  $\zeta$  entre -13.6 mV y -36.9 mV, estando dentro del rango sugerido que usualmente generan las partículas presentes en este tipo de aguas de -10 mV a -40 mV [20].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se presentan valores de  $\zeta$  de agua coagulada asociados con los valores mínimos de parámetros de turbiedad y color del agua sedimentada resultantes en cada experimento. Se observa un valor promedio encontrado de  $\zeta$  óptimo de -0.5 mV. Realizando inferencia estadística sobre la media de  $\zeta$  óptimo con nivel de significancia del 5% el valor de  $\zeta$  óptimo es 0 mV ( $p = 0.7638$ ) como se ha verificado en la literatura [21], con un intervalo de confianza del 95% para la media de [-2.28 mV - 1.2 mV]. Esto indica que a medida que el valor de  $\zeta$  del agua coagulada se acerca a 0 mV se obtienen turbiedad y color más bajos para el agua tratada. Por tanto la dosis de SAL aplicada en planta debe ser tal que permita obtener un valor de  $\zeta$  del agua coagulada dentro del intervalo de confianza

obtenido, si  $\zeta$  tiene valores inferiores a los de este intervalo la dosis de coagulante debe incrementarse y viceversa.



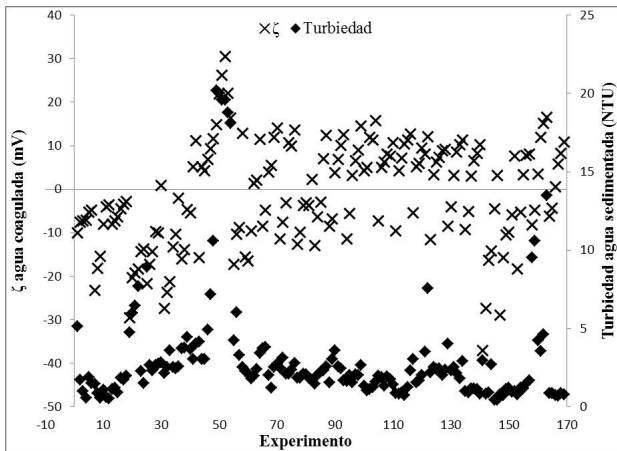
**Figura 2.** Valores de  $\zeta$  asociados con turbiedad y color mínimos del agua sedimentada obtenidos en cada experimento

La figura 3 relaciona  $\zeta$  del agua coagulada con la turbiedad residual obtenida del agua sedimentada para cada ensayo, en ella se puede observar cómo se alcanzan valores cercanos y en muchos casos inferiores a 2 NTU, teniendo valores de  $\zeta$  dentro de los límites del intervalo de confianza obtenido.

En la figura 3 se observa que pocos valores de  $\zeta$  de agua coagulada son próximos a cero o nulos, y que ellos están asociados con valores altos de turbiedad, por esta razón es de mayor importancia para la presente investigación considerar una óptima clarificación a partir de valores de  $\zeta$  del agua coagulada dentro del intervalo de confianza obtenido. Esto indica que controlando las dosis de coagulante de forma tal que se obtengan valores de  $\zeta$  del agua coagulada dentro de este rango encontrado, las fuerzas de atracción de las partículas contenidas en el agua natural incrementan su magnitud superando las fuerzas de repulsión y logrando un adecuado proceso de aglomeración, por consecuencia se da una mejor formación de flóculos y un buen proceso de clarificación que resulta en menores turbiedades del agua tratada.

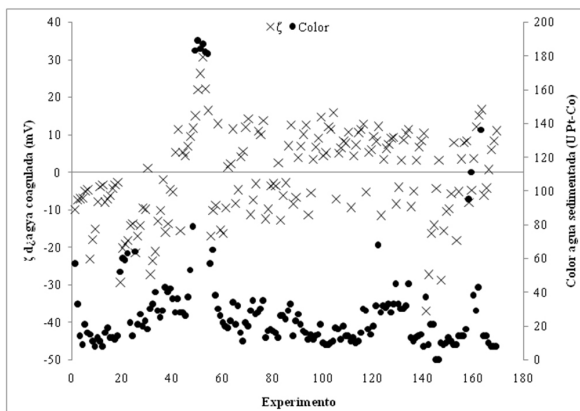
En la figura 3 se puede observar también que se tienen turbiedades con valores mayores a 18 NTU correspondientes a valores de  $\zeta$  por encima de +20 mV, que evidencian un restablecimiento de cargas de

las partículas debido a un exceso en la dosis de coagulante, como se corrobora también en la figura 5, donde se muestra que las dosis utilizadas en estos casos fueron las mayores y que debido al rango de turbiedad del agua cruda utilizada (no mayor a 211 NTU), resultaron ser muy altas, con valores de 45 ppm a 50 ppm de sulfato de aluminio. Las dosis mostradas en la figura 5 hacen referencia a sulfato de aluminio con un contenido de alúmina de 15%.



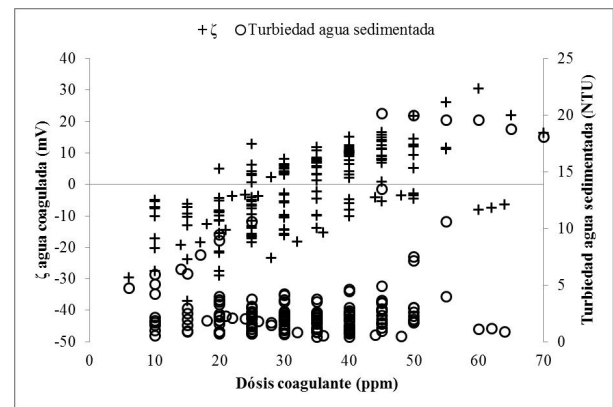
**Figura 3.**  $\zeta$  del agua coagulada y turbiedad del agua sedimentada para cada ensayo

Al igual que la turbiedad, bajos valores de color en el agua sedimentada están asociados con valores de  $\zeta$  del agua coagulada dentro del intervalo de confianza como se observa en la figura 4. De igual manera los valores más elevados de color que se encontraron durante la realización de los experimentos están asociados a valores de  $\zeta$  mayores de 20mV, lo cual se asocia a una resuspensión de los coloides a causa de un exceso en la dosificación de coagulante.



**Figura 4.**  $\zeta$  del agua coagulada y color del agua sedimentada para cada ensayo

Estudios previos establecen que  $\zeta$  depende de las partículas y el tipo de iones que componen la solución electrolítica en la cual se encuentran suspendidos los coloides [22]. Debido a esto, se espera que a mayor concentración de iones positivos en la solución electrolítica, los valores de  $\zeta$  de los coloides suspendidos tiendan a ser más positivos. Este fenómeno puede observarse en la figura 5, donde a medida que aumenta la dosis de sulfato de aluminio como coagulante se tiene como consecuencia un incremento en la cantidad de iones aluminio trivalente en la solución y esto se asocia con una tendencia de los valores de  $\zeta$  del agua coagulada a ser más positivos. A medida que los valores de potencial se alejan del cero y toman valores superiores a 10mV, se presentan valores de turbiedad del agua sedimentada por encima de 15 NTU y se relaciona directamente con un exceso en la dosificación de coagulante.



**Figura 5.** Turbiedad de agua sedimentada y  $\zeta$  del agua coagulada para cada dosis de coagulante aplicado.

En la figura 5 se observa una correlación positiva entre  $\zeta$  del agua coagulada y la dosis de sulfato de aluminio aplicada como coagulante, por tanto es posible, mediante modificación de la dosis de coagulante y teniendo en cuenta la calidad de agua cruda a tratar, obtener un  $\zeta$  de agua coagulada con valores cercanos a cero dentro del intervalo de confianza obtenido.

#### 4. CONCLUSIONES

Es posible alcanzar un óptimo desempeño del proceso de floculación y sedimentación efectuando mediciones de  $\zeta$  en el agua luego de la aplicación de coagulante, como indicador de la efectividad de desestabilización de las partículas.  $\zeta$  presenta una correlación positiva

con la dosis de coagulante aplicada, por tanto es posible que mediante la modificación de la cantidad de alúmina aplicada en tratamiento se alcancen valores de  $\zeta$  cercanos a cero, los cuales permiten obtener turbiedad y color más bajos en el agua sedimentada. Optimizando la cantidad de coagulante requerido en el proceso es factible disminuir costos asociados al tratamiento, ya que se evitan dosificaciones excesivas de coagulante asociadas a incrementos en el costo del tratamiento.

La determinación de  $\zeta$  del agua coagulada debe hacerse en conjunto con mediciones continuas de la turbiedad de agua sedimentada, de manera tal que este proceso sea útil como herramienta en la determinación de la dosis óptima de coagulante, para mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir los costos asociados con la utilización de insumos químicos en el tratamiento del agua.

El monitoreo de los valores de  $\zeta$  del agua coagulada es útil para optimizar los procesos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento de agua potable, ya que permite tomar decisiones rápidas en el tratamiento al respecto de cambios por causas climáticas o antrópicas en la calidad de agua cruda que ingresa al tratamiento basados en un valor que puede ser medido con precisión.

## REFERENCIAS

- [1] AWWA. Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria. Madrid: American Water Works Association, 2002.
- [2] U. S. EPA. The History of Drinking Water Treatment. Available: <http://www.epa.gov/safewater/sdwa25sdwa.html> [citado 14 de Diciembre 2010].
- [3] Jaramillo, M., Filtración ribereña: una tecnología eficiente y económica para el tratamiento de agua potable, DYNA, 171(79), pp. 148-157, 2012.
- [4] WHO. Guidelines for drinking water: Incorporating first addendum. Washington, DC: World Health Organization, 2006.
- [5] Sharp, E.L., Parsons, S.A. and Jefferson, B., The impact of seasonal variations in DOC arising from a moorland peat catchment on coagulation with iron and aluminium salts, Environmental pollution, 140, pp. 436-443, 2006.
- [6] Kim, J.Y. and Sansalone, J.J., Zeta potential of clay-size particles in urban rainfall-runoff during hydrologic transport, Journal of Hydrology, 356, pp. 163-173, 2008.
- [7] Furusawa, K. and Uchiyama, K., Collaborative studies of zeta-potential measurements and electrophoretic measurements using reference sample, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 140, pp. 217-226, 1998.
- [8] Ennis, J. and Anderson, J., Boundary effects on electrophoretic motion of spherical particles for thick double layers and low zeta potential, Journal of colloid and interface science, 185, pp. 497-514, 1997.
- [9] Attard, P., Antelmi, D. and Larson, I., Comparison of the zeta potential with the diffuse layer potential from charge titration, Langmuir, 16, pp. 1542-1552, 2000.
- [10] James, M., Hunter, R. J. and O'Brien, R. W., Effect of particle size distribution and aggregation on electroacoustic measurements of potential, Langmuir, 8, pp. 420-423, 1992.
- [11] Shrotri, S. and Somasundaran, P., Particle deposition and aggregation, measurement, modeling and simulation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 125, pp. 93-94, 1997.
- [12] El-Gholabzouri, O., Cabrerizo, M. A. and Hidalgo-Álvarez, R., Comparative electrophoretic mobility and streaming current study for  $\zeta$ -potential determination, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 159, pp. 449-457, 1999.
- [13] Sze, A., Erickson, D., Ren, L. and Li, D., Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current-time relationship in electroosmotic flow, Journal of colloid and interface science, 261, pp. 402-410, 2003.
- [14] Greenwood, R., "Review of the measurement of zeta potentials in concentrated aqueous suspensions using electroacoustics, Advances in Colloid and Interface Science, 106, pp. 55-81, 2003.
- [15] WHO, "Guidelines for drinking-water quality," Washington, DC: World Health Organization, 1998.
- [16] Cepeda, Z. and Cepeda, E., Application of generalized linear models to data analysis in drinking water treatment, Revista Colombiana de Estadística, 28, pp. 233-242, 2005.

- [17] CARDER-UAESPNN. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Otún, Pereira, Risaralda: Corporación Autónoma Regional del Risaralda, 2008.
- [18] Cogollo, J.M., Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio, DYNA, 78, pp. 18-27, 2010.
- [19] Puertas, O., Carvajal, Y. and Quintero, M., Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, DYNA, 78, pp. 112-120, 2011.
- [20] Shaw, D. J., Introduction to colloid and surface chemistry. Butterworths, London, 1966.
- [21] Morfesis, A., Jacobson, A. M., Frollini, R., Helgeson, M., Billica, J. et al., Role of zeta ( $\zeta$ ) potential in the optimization of water treatment facility operations, Industrial & Engineering Chemistry Research, 48, pp. 2305-2308, 2009.
- [22] Kim, J., Anderson, J. L., Garoff, S. AND Sides, P. J., Effects of zeta potential and electrolyte on particle interactions on an electrode under ac polarization, Langmuir, 18, pp. 5387-5391, 2002.