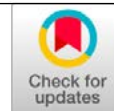


EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE CAL PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL CAFÉ

Laura Vanessa Quintero Yepes *, Nelson Rodríguez Valencia *

Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia, N. (2020). Evaluación de tres tipos de cal para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. *Revista Cenicafé*, 71(2), 105-117. <https://doi.org/10.38141/10778/71208>



Con el fin de encontrar una alternativa de tratamiento primario de las aguas residuales del café para optimizar el funcionamiento de los sistemas biológicos y el acondicionamiento del agua para tratamientos posteriores con productos químicos, se evaluaron procesos de neutralización y precipitación. Al agua residual se adicionaron tres tipos de cal (agrícola, dolomita y apagada), seleccionando aquella con la que se obtuvieran los menores valores de absorbancia y pH en los rangos requeridos para el tratamiento secundario. Para la cal seleccionada se evaluó la eficiencia en la remoción de carga orgánica, en términos de demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). Para las evaluaciones se utilizaron cinco dosis de cal y dos concentraciones de DQO (12.500 y 25.000 mg L⁻¹) del agua residual. Se encontró que la cal apagada (hidróxido de calcio) fue la más apropiada para realizar el tratamiento primario a las aguas residuales del café, con los menores valores de absorbancia (entre 0,392 y 1,089), así como valores de pH en el agua pretratada entre 5,6 y 12,0. Adicionalmente, con la cal apagada se lograron porcentajes de remoción en la carga orgánica contaminante, expresada como DQO, cercanos al 50% y de SST superiores al 75%. Las mejores dosis para el tratamiento primario con cal apagada, a las condiciones evaluadas, fueron: 2,60 g de cal por litro de agua residual con DQO de 12.500 mg L⁻¹ y 4,63 g de cal por litro de agua residual con DQO de 25.000 mg L⁻¹.

Palabras Clave: Tratamiento químico, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, contaminación hídrica, hidróxido de calcio.

EVALUATION OF THREE TYPES OF LIMES FOR THE PRIMARY TREATMENT OF COFFEE WASTEWATER

In order to find an alternative for the primary treatment of coffee wastewater to optimize the functioning of biological systems and the conditioning of water for subsequent treatments with chemical products, neutralization and precipitation processes were evaluated. Three types of lime (agricultural, dolomite and slaked) were added to the residual water, selecting the one with which the lowest absorbance and pH values were obtained in the ranges required for secondary treatment. For the selected lime, the efficiency in the removal of organic load was evaluated in terms of chemical oxygen demand (COD) and TSS. For the evaluations, five doses of lime and 2 concentrations of COD (12,500 and 25,000 mg L⁻¹) of wastewater were used. Slaked lime (calcium hydroxide) was found to be the most appropriate for primary treatment of coffee wastewater, with the lowest absorbance values (between 0.392 and 1.089), as well as pH values in pretreated water between 5.6 and 12.0. Additionally, with slaked lime, removal percentages were achieved in the organic pollutant load, expressed as COD, close to 50% and TSS higher than 75%. The optimal doses for the primary treatment with slaked lime, under the evaluated conditions, were 2.60 g of lime per liter of wastewater with COD of 12,500 mg L⁻¹ and 4.63 g of lime per liter of wastewater with COD of 25,000 mg L⁻¹.

Keywords: Chemical treatments, Chemical Oxygen Demand, total suspended solids, water pollution, calcium hydroxide.

* Asistente de Investigación (<https://orcid.org/0000-0002-9982-7790>) e Investigador Científico III (<https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>), respectivamente. Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé.

Las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del café son biodegradables, con altos contenidos de materia orgánica, concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) superiores a 15.000 mg L⁻¹ cuando se adopta el beneficio ecológico (consumo de agua menor a 10 L kg⁻¹ de café pergamino seco [cps]) y bajos valores de pH (Rodríguez et al., 2015). En Cenicafé se han desarrollado sistemas biológicos anaerobios para el tratamiento de las aguas residuales del café, los cuales permiten cumplir con la normativa ambiental vigente y disminuir los impactos negativos ocasionados por la disposición final de los vertimientos. Sin embargo, estos sistemas biológicos tienen como desventaja unos altos tiempos de retención hidráulica (aproximadamente de una semana), además, requieren de monitoreo por parte del usuario de la tecnología para evitar que se presenten sobrecargas orgánicas, ya que la recuperación del sistema de tratamiento puede tardar varios meses, lo que se convierte en un inconveniente en el momento de adoptar la tecnología por parte del caficultor (Rodríguez, 2009). Una forma de optimizar el funcionamiento de estos sistemas es realizando un tratamiento primario que permita remover parte de los sólidos y de la materia orgánica presente en el agua residual.

El tratamiento químico utilizando sales de hierro y aluminio, es otra alternativa para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, dado que permite transformar los compuestos que están en forma de sólidos disueltos y coloidales en compuestos estables y eliminarlos por sedimentación; sin embargo, el bajo pH del agua residual (valores en el rango de 3,0 a 4,0) requiere de un tratamiento primario que permita acondicionar el pH del agua al rango de acción de los coagulantes. Estos rangos de acción dependen del tipo de coagulante a utilizar, así: para el sulfato de aluminio el pH del agua residual debe estar

en el rango entre 6,0 a 9,0; para el cloruro de aluminio entre 5,0 a 10,0; para el sulfato férrico el pH debe ser mayor a 9,0; para el sulfato ferroso debe estar en el rango entre 5,0 a 11,0 y para el cloruro de hierro el pH debe ser mayor a 8,0 (Murillo Castaño, 2011; Llano et al., 2014 & Lorenzo-Acosta, 2006).

En los tratamientos primarios la remoción de la contaminación orgánica normalmente se realiza por operaciones físicas como la sedimentación y en algunos casos por procesos químicos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). En el tratamiento primario puede removerse entre el 40% y el 55% de los sólidos en suspensión, y entre el 25% y el 35% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Para ello se emplean, entre otros, sedimentadores como tanques sépticos, tanques Imhoff, tanques de sedimentación simple, clarificadores, tanques de flotación y tanques de precipitación química (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

En la literatura se reporta que compuestos como el óxido de calcio, el hidróxido de calcio, el carbonato de calcio, entre otras fuentes de calcio, son útiles para realizar tratamiento primario a las aguas residuales dado que permiten acondicionar el pH, regular la alcalinidad, reducir la presencia de sólidos y de carga orgánica (Cordero, 1977; Lardé, 1995; Orozco, 1973 & Sevillano, 2017).

Dentro de los aspectos relevantes de estos estudios se encuentra, el uso de cal apagada (hidróxido de calcio) para el tratamiento de aguas residuales del café con concentraciones de sólidos totales en un rango entre 7.100 a 18.500 mg L⁻¹, encontrando dosis óptimas entre 0,4% y 0,6% p/v y remociones del 39,7% en la DBO₅ (Lardé, 1995). De igual forma, Sevillano (2017) evaluaron el uso del hidróxido de calcio en el tratamiento de las aguas residuales ácidas procedentes de la

explotación minera, encontrando como dosis óptima de hidróxido de calcio 10 g L^{-1} con remociones del 52,82% de plomo, 99,96% de sólidos suspendidos y 99,42% sólidos disueltos.

Vanerkar et al. (2013) evaluaron el uso de cal en la remoción de parámetros fisicoquímicos en aguas residuales provenientes de procesamiento de alimentos, las evaluaciones consistieron en el uso de cal sola y en mezcla con coagulantes químicos, los resultados obtenidos muestran que la cal sola actúa de forma eficiente, la dosis óptima de cal encontrada fue de 200 mg L^{-1} con remociones superiores al 40% en sólidos suspendidos y demanda química de oxígeno.

Nacheva et al. (1998) evaluaron tres reactivos precipitantes: hidróxido de calcio, hidróxido de sodio y carbonato de sodio en aguas residuales provenientes del proceso de curtido de pieles, encontrando que con el uso de reactores intermitentes o en continuo, puede lograrse una remoción del cromo trivalente mayor al 99,7% en dosis de 2,2 a $3,3 \text{ g g}^{-1}$. Además de la remoción de cromo, en el tratamiento del agua residual mediante precipitación y sedimentación, lograron remover alrededor del 50% de la DQO con los tres agentes precipitantes, y una remoción del 80% de los sólidos suspendidos totales (SST) con los hidróxidos y del 45% con el carbonato de sodio.

Teniendo en cuenta las referencias citadas y la necesidad de encontrar un tratamiento aplicable a las aguas residuales del café que permita optimizar los sistemas existentes, en esta investigación se evaluó como alternativa para el tratamiento primario de las aguas residuales del café provenientes del lavado en el tanque tina, una combinación de dos procesos físico-químicos, a saber: 1. Neutralización, que consiste en una reacción entre un ácido y una base, este proceso es utilizado para el

condicionamiento del pH del agua residual y así poder realizar tratamientos posteriores o un vertimiento que cumpla con la normativa ambiental vigente; 2. Precipitación, que es un proceso de separación de sustancias por sedimentación, mediante la adición de productos químicos que reaccionan con las sustancias contaminantes presentes en el agua, para formar compuestos insolubles en ella y con densidades mayores.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el laboratorio de aguas de la Disciplina de Poscosecha, en Cenicafé sede La Granja, ubicada en el municipio de Manizales (Caldas), a una altitud 1.310 m y con una temperatura media anual de $21,0^{\circ}\text{C}$.

Para llevar a cabo los procesos de neutralización y precipitación, como tratamiento primario de las aguas residuales del beneficio del café, se evaluó la adición de tres tipos de cal al agua residual, seleccionando aquella con la que se obtuvieran los menores valores de absorbancia (variable de respuesta en este tipo de procesos) y un pH en los rangos requeridos para un tratamiento secundario. De igual forma, para la cal seleccionada se evaluó la eficiencia en la remoción de carga orgánica, en términos de DQO y SST, parámetros utilizados por la autoridad ambiental para realizar el cobro de la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta de las fuentes de agua superficial para realizar el vertido (Decreto 2667, 2012).

Las evaluaciones se realizaron mediante el uso del test de jarras, que es la metodología utilizada a escala de laboratorio, cuando se van a realizar pruebas de eficiencia de productos químicos y determinación de dosis adecuadas tanto para potabilización del agua como para el tratamiento de aguas residuales (Cordero, 1977; Lardé, 1995; Orozco, 1973 & Sevillano,

2017). Para llevar a cabo este proceso se aplicó la cal en 500 mL de agua residual del café (unidad experimental) y se realizó una agitación a 120 rpm durante 5 minutos, seguidamente se agitó a 60 rpm durante 25 minutos y, finalmente, se dejó sedimentar a temperatura ambiente por 24 horas, de acuerdo al procedimiento establecido en la Norma Técnica Colombiana [NTC 3903] (ICONTEC, 2010). Después de este proceso, a una muestra de 25 mL se determinó la absorbancia por espectrofotometría a 525 nm (Resolución 631) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), se seleccionó la absorbancia dado que es la variable recomendada para encontrar las mejores dosis cuando se utiliza la prueba del test de jarras (Iannacone & Molano-Linares, 2018; Olivero-Verbel et al., 2017;). De igual forma, se determinó como variable complementaria la turbidez; este proceso se repitió para las tres cales evaluadas, a cinco dosis diferentes. Por cada dosis evaluada y para cada cal se tuvieron diez repeticiones.

Las cales evaluadas fueron: cal apagada, cal agrícola y cal dolomita, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo a estudios previos en otros tipos de agua y a la facilidad de

adquisición en los comercios locales. Se evaluaron inicialmente cinco dosis para cada una de las tres cales (1.000, 2.000, 3.000, 4.000 y 5.000 mg L⁻¹), para la selección de las concentraciones se tomó como referencia un estudio previo realizado en aguas residuales del café (Lardé, 1995) y observaciones preliminares realizadas en el laboratorio de aguas de Cenicafé.

El efecto de las cales se evaluó en agua residual del café con una concentración de DQO de 12.500 mg L⁻¹ (concentración mínima del agua residual proveniente del beneficio ecológico). En esta primera etapa el objetivo fue comparar el efecto de las tres cales para posteriormente seleccionar la más adecuada y así acotar los rangos de las dosis a evaluar. La selección de la cal apropiada para realizar el tratamiento primario del agua se realizó con base en las variables absorbancia y pH. En la Figura 1 se ilustra el aspecto del agua residual después de agregar las tres cales evaluadas y separar el sobrenadante.

Después de seleccionar la cal con la cual se obtuvieron los menores valores de absorbancia y un pH adecuado para un tratamiento posterior, se evaluaron diez dosis del producto en dos



Figura 1. Muestras de agua residual después del proceso de tratamiento con las tres cales evaluadas. **a.** Cal apagada. **b.** Cal agrícola. **c.** Cal agrícola.

tipos de agua residual: con DQO de 12.500 mg L⁻¹ (concentración mínima del agua residual proveniente del beneficio ecológico) y con DQO de 25.000 mg L⁻¹ (concentración máxima del agua residual proveniente del beneficio ecológico del café en tanques de fermentación). La selección de las dosis a evaluar se realizó de acuerdo a los mejores valores encontrados en la primera etapa y a estudios previos (Lardé, 1995). Para este evaluación se realizó el mismo procedimiento (test de jarras) descrito anteriormente para las tres cales, la unidad experimental fueron 500 mL de agua residual y se realizaron cinco repeticiones por cada dosis. En la Figura 2 se ilustra el procedimiento utilizado. Una vez terminado el proceso se determinaron la absorbancia, el pH y la turbidez a cada una de las muestras de agua tratada.

La selección de las mejores dosis de cal se realizó tomando como referencia los menores valores de la variable de respuesta (absorbancia) los cuales se contrastaron con los datos de turbidez. De igual forma, se validó esta selección realizando una regresión con los datos obtenidos, seleccionando la mejor función de ajuste (polinómica, exponencial,

logarítmica) teniendo como factor de selección la función con un coeficiente de determinación (R²) más cercano a uno. Una vez encontrada la función de ajuste para ambas concentraciones de DQO (12.500 y 25.000 mg L⁻¹), se procedió a encontrar la mejor dosis, para ello se utilizó la función SOLVER de Microsoft Excel (versión 2013) y así encontrar, en la ecuación obtenida, la dosis que generara el valor mínimo de absorbancia.

Al agua residual tratada con la mejor dosis encontrada y una dosis por encima y otra por debajo de la misma, se le realizó una caracterización fisicoquímica en los parámetros DQO y SST, con el fin de determinar los porcentajes de remoción obtenidos con el tratamiento primario. La DQO se determinó por el método de reflujo cerrado, método colorimétrico desarrollado por la HACH y aprobado por la *Environmental Protection Agency* [U.S.EPA] (HACH Company, 1988) y los sólidos suspendidos (SST) por el método gravimétrico (American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA] & Water Pollution Control Facility [WPCF], 1992).

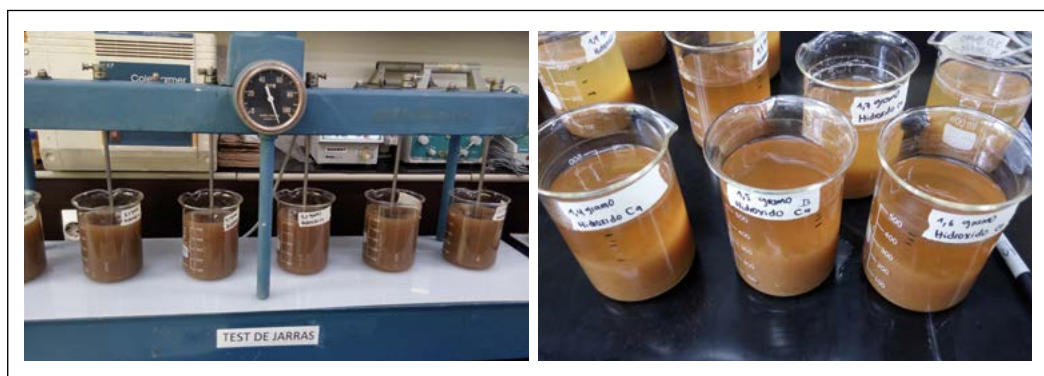


Figura 2. Test de jarras en el tratamiento primario del agua residual del café. **a.** Agitación de la muestra de agua residual y cal. **b.** Sedimentación del material coagulado, a las 24 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 3 y 4 se presenta el comportamiento promedio de las variables absorbancia y pH (incluyendo los intervalos de confianza del 95%, para las cinco repeticiones) en las evaluaciones realizadas con las tres cales: cal apagada, cal dolomita y cal agrícola, a cinco dosis diferentes en aguas residuales del café a una concentración de 12.500 mg L⁻¹ como DQO.

De acuerdo a lo encontrado en esta primera etapa, los menores valores de absorbancia (entre 0,392 y 1,089) se encontraron cuando se utilizó cal apagada (Figura 3). Adicionalmente, en

caso de que se vaya a realizar un tratamiento secundario al agua residual del café utilizando productos químicos (procesos de coagulación-floculación), con la adición de la cal apagada se obtienen valores de pH en los rangos de acción de los coagulantes químicos (entre 5,58 y 11,95) (Figura 4).

En cuanto a las otras dos cales evaluadas: el agua residual tratada con la cal dolomita presentó valores de absorbancia altos (entre 1,572 y 1,761) y valores de pH entre 3,85 y 4,67. Por su parte con el uso de cal agrícola los valores de absorbancia en el agua tratada, fueron menores a los de la cal dolomita (entre 0,891 y 1,413) pero superiores a los obtenidos

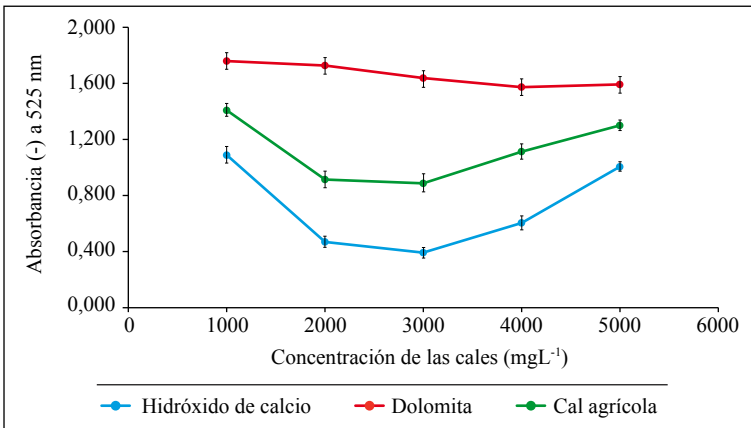


Figura 3. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con las tres cales evaluadas. Las barras de error corresponden al intervalo de confianza.

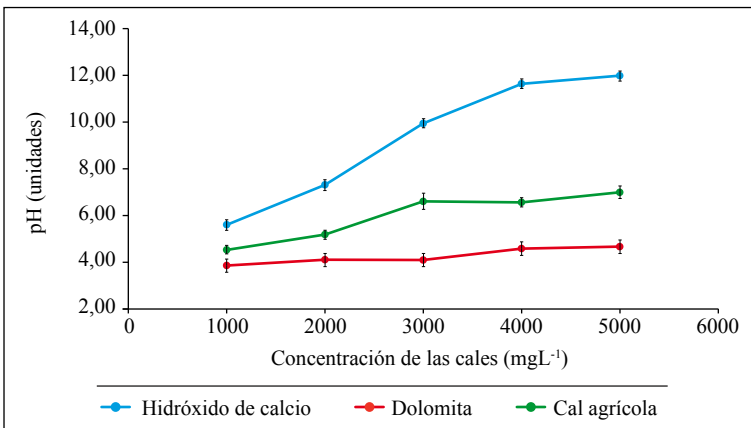


Figura 4. Comportamiento del pH del agua residual tratada con las tres cales evaluadas. Las barras de error corresponden al intervalo de confianza.

con cal apagada y el pH presentó valores entre 4,54 y 6,99. Con el fin de realizar una selección acertada del tipo de cal, los valores absorbancia se compararon con los valores de turbidez (Tabla 1) para corroborar que los valores de absorbancia mínimos correspondieran a los menores valores de turbidez.

Realizando esta comparación se corrobora que la cal más apropiada para el tratamiento primario de las aguas residual del café es el hidróxido de calcio o cal apagada, la cual debe tener un contenido mínimo del 52% de Ca expresado como CaO, en contraste con una cal agrícola cuyo contenido de CaO es de 39,2% (NTC 5424) (ICONTEC, 2006).

La selección de cal apagada como un producto de utilidad en el tratamiento de las aguas residuales del café se ajusta a lo encontrado en otras investigaciones (Lardé, 1995; Nacheva et al., 1998; Sevillano, 2017 & Vanerkar et al., 2013), con otro tipo de aguas residuales, en las cuales se menciona que el hidróxido de calcio es una base que reacciona contra la acidez y los metales elevando el pH. Adicionalmente, es un coagulante económico que tiene la capacidad de precipitar metales y sólidos que se encuentran disueltos facilitando su remoción; por lo cual, es utilizado en diversos tratamientos químicos (Tejada, 2017).

En la Figura 5 se presenta el comportamiento de la variable absorbancia, en la evaluación de la cal apagada para el tratamiento primario del agua residual del beneficio de café, con una DQO de 12.500 mgL⁻¹. De igual forma, se presenta el ajuste realizado y la ecuación obtenida para encontrar la mejor dosis. En este ajuste se incluyeron los datos encontrados en la primera etapa para concentraciones de cal apagada de 1.000 y 5.000 mg L⁻¹ y así ampliar el número de datos en la curva. En la Tabla 2 se presentan los resultados de las variables pH y turbidez en la evaluación realizada.

De acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 5 y Tabla 2), los menores valores de absorbancia (0,269 a 0,374) y turbidez (328 a 427) se presentaron para las dosis de cal apagada, los cuales se encuentran en el rango entre 2.600 a 3.000 mg L⁻¹, adicionalmente a estas dosis se alcanzaron valores de pH que se encuentran en el rango de acción de algunos de los coagulantes químicos (9,84 a 10,04).

Con el ajuste de los datos obtenidos a una regresión polinómica de grado 3 y resolviendo la ecuación para encontrar el valor mínimo de absorbancia se encontró que la mejor dosis de cal, para las condiciones evaluadas, es de 2.605 mg L⁻¹, valor que se encuentra en el rango seleccionado, inicialmente, teniendo en

Tabla 1. Valores de turbidez del agua residual tratada con las tres cales evaluadas.

Dosis (mg L ⁻¹)	Cal apagada		Cal dolomita		Cal agrícola	
	Turbidez (NTU)	Desviación estándar	Turbidez (NTU)	Desviación estándar	Turbidez (NTU)	Desviación estándar
1.000	997	16,5	1.065	19,0	1.039	16,6
2.000	507	11,0	1.035	14,3	776	22,6
3.000	498	10,7	950	17,7	747	33,5
4.000	677	12,5	985	8,4	825	8,4
5.000	977	10,6	991	13,6	959	10,5

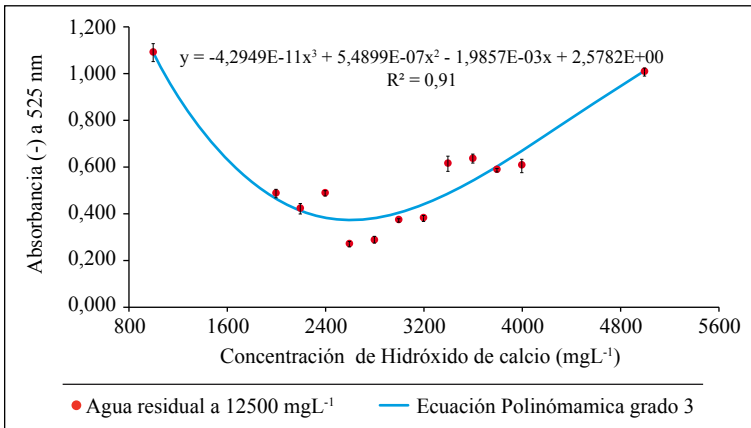


Figura 5. Comportamiento de la absorbancia en el agua residual del café a 12.500 ppm después del tratamiento con hidróxido de calcio.

Tabla 2. Valores de pH y turbidez del agua residual del café con 12.500 mg L⁻¹, como DQO, después del tratamiento con hidróxido de calcio.

Dosis de cal apagada (mg L ⁻¹)	pH		Turbidez	
	Valor (und)	Desviación estándar	Valor (NTU)	Desviación estándar
2.000	7,60	0,06	548	17,4
2.200	8,99	0,02	484	24,1
2.400	9,54	0,06	575	16,7
2.600	9,84	0,09	328	12,9
2.800	9,89	0,04	334	18,6
3.000	10,04	0,05	427	8,9
3.200	10,13	0,11	441	11,3
3.400	11,01	0,05	701	29,9
3.600	11,41	0,24	719	13,1
3.800	11,70	0,04	673	25,4

cuenta los menores valores de absorbancia y turbidez.

Al agua residual tratada con las dosis de cal apagada en el mejor rango, se le determinó la carga orgánica (medida como DQO) y los SST, con el fin de evaluar su porcentaje de

remoción. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos.

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el tratamiento primario con cal apagada permitió disminuir la concentración de DQO de las aguas residuales del café en

valores medios entre 48,4% y 49,0% y en cuanto a los SST se obtuvieron valores de remoción entre 76,2% y 78,1%.

En la Figura 6 se observa el aspecto de agua residual después de realizar el tratamiento primario.

En la Figura 7 se presenta el comportamiento de la variable absorbancia en la evaluación

realizada con agua residual a una concentración de DQO de 25.000 mg L⁻¹, ajustando el rango de evaluación de dosis de cal entre 2.200 y 7.200 mg L⁻¹. De igual forma se presenta el ajuste realizado y la ecuación obtenida para encontrar la mejor dosis.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las variables pH y turbidez en la evaluación realizada.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua residual del café con 12.500 mg L⁻¹ de DQO después del tratamiento primario con hidróxido de calcio.

Dosis de cal apagada (mg L ⁻¹)	DQO inicial 12.500 mg L ⁻¹		SST inicial 1.200 mg L ⁻¹	
	DQO final (mg L ⁻¹)	Remoción (%)	SST final (mg L ⁻¹)	Remoción (%)
2.400	6.444	48,4	285	76,2
2.600	6.370	49,0	267	77,7
2.800	6.397	48,8	263	78,1



Figura 6. Aspecto del agua residual después del tratamiento primario con cal apagada.

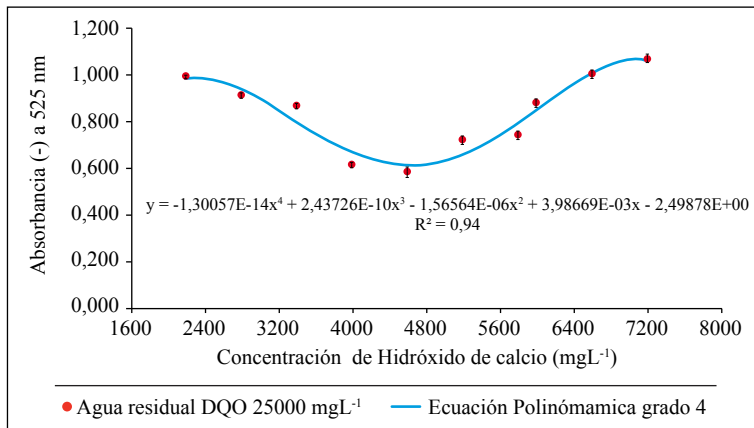


Figura 7. Comportamiento de la absorbancia en el agua residual del café a 25.000 ppm DQO después del tratamiento con hidróxido de calcio.

Tabla 4. Valores de pH y turbidez del agua residual del café con 25.000 mg L⁻¹ como DQO después del tratamiento con hidróxido de calcio.

Dosis de cal apagada (mg L ⁻¹)	pH		Turbidez	
	Valor (und)	Desviación estándar	Valor (NTU)	Desviación estándar
2.200	5,82	0,11	1.113	25,2
2.800	6,03	0,01	1.120	18,6
3.400	7,16	0,04	1.053	13,1
4.000	7,98	0,05	773	8,7
4.600	8,09	0,01	734	28,6
5.200	8,87	0,04	910	10,7
5.800	9,06	0,05	942	11,5
6.000	10,29	0,05	1.068	27,9
6.600	10,94	0,03	1.151	16,3
7.200	11,13	0,07	1.228	17,8

De acuerdo con los resultados obtenidos, los menores valores de absorbancia (0,588 a 0,613) y turbidez (734 a 773) se presentaron para dosis de cal apagada que se encuentran en el rango entre 4.000 a 4.600 mg L⁻¹, adicionalmente a estas dosis se alcanzaron valores de pH que se encuentran en el rango de acción de algunos de los coagulantes químicos (7,89 a 8,09).

Con el ajuste de los datos obtenidos a una regresión polinómica de grado 4 y resolviendo la ecuación para encontrar el valor mínimo de absorbancia, se encontró que la mejor dosis de cal para las condiciones evaluadas es de 4.631 mg L⁻¹, valor que se encuentra un poco por encima del rango seleccionado inicialmente, teniendo en cuenta los menores valores de absorbancia y turbidez.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la mejor dosis de cal apagada para aguas residuales del café con valores de DQO de 12.500 mg L⁻¹ fue de 2,60 g L⁻¹ y para aguas residuales del café con una DQO de 25.000 mg L⁻¹ de 4,63 g L⁻¹. Lardé (1995) reporta para aguas residuales del café con concentraciones de sólidos totales en un rango entre 7.100 a 18.500 mg L⁻¹ dosis óptimas entre 0,4% y 0,6% p/v (4,0 a 6,0 g L⁻¹). Los datos obtenidos en esta investigación se encuentran dentro de este rango para aguas residuales a 25.000 mg L⁻¹ como DQO, sin embargo, para aguas residuales con 12.500 mg L⁻¹ como DQO, la

dosis encontrada fue la mitad de la mínima sugerida en ese estudio. Comparando los datos obtenidos con estudios realizados en otro tipo de aguas, en el caso de las aguas provenientes de minería, las dosis requeridas de 10 g L⁻¹ (Sevillano, 2017), están por encima del valor encontrado para aguas residuales del café.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua residual del café después de realizar el tratamiento con cal apagada, en el rango en el cual se presentaron los menores valores de absorbancia y turbidez.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica del agua residual del café con 25.000 mg L⁻¹ como DQO después del tratamiento primario con hidróxido de calcio.

Dosis de cal apagada (mg L ⁻¹)	DQO inicial 25.000 mg L ⁻¹		SST inicial 2.700 mg L ⁻¹	
	DQO final (mg L ⁻¹)	Remoción (%)	SST final (mg L ⁻¹)	Remoción (%)
4.000	12.874	48,5	674	75,0
4.600	13.046	47,8	564	79,1
5.200	15.800	36,8	511	81,1

De acuerdo con las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas al agua residual después del tratamiento primario con cal apagada se alcanzaron valores promedio de remoción de carga orgánica en términos de DQO entre 36,8% y 48,5% y de SST entre 75,0% y 81,1%.

Con el uso de hidróxido de calcio como tratamiento primario para las aguas residuales del café se logra acondicionar el agua residual a las condiciones requeridas para un tratamiento secundario. Adicionalmente, se obtienen porcentajes de remoción en la carga orgánica, expresada como DQO, cercanos al 50% y en los SST superiores al 75%. Como se menciona

en otros estudios, el hidróxido de calcio es útil para el tratamiento de aguas residuales con alta acidez, sin embargo debido a que la cal apagada es hidrófoba, para que se dé una buena mezcla con el agua es necesario un dispositivo de agitación (Galindos et al., 2017). Una de las ventajas que tiene el hidróxido de calcio respecto a otro tipo de productos es su capacidad de precipitar metales pesados tales como cadmio, plomo, zinc, aunado a las propiedades de absorción de otros contaminantes (Tejada, 2017).

En este estudio puede concluirse que la cal apagada o hidróxido de calcio resultó ser el producto más adecuado para realizar un

tratamiento primario a las aguas residuales del café, ya que con este producto se obtienen los menores valores de absorbancia y de turbidez, y se logra acondicionar el pH del agua a valores en los cuales puede realizarse un tratamiento posterior con productos químicos. Adicionalmente, con este tratamiento se alcanzan porcentajes de remoción en la carga orgánica expresada como DQO cercanos al 50% y en los SST superiores al 75%.

Bajo las condiciones evaluadas en este estudio, la mejor dosis de cal apagada para

aguas residuales del café con valores de DQO de 12.500 mg L⁻¹ fue de 2,60 g L⁻¹ y para aguas residuales del café con una DQO de 25.000 mg L⁻¹ de 4,63 g L⁻¹.

El uso de hidróxido de calcio como alternativa para el tratamiento primario de las aguas residuales del café permite optimizar el funcionamiento de los sistemas biológicos que actualmente se encuentran contruidos, y abre la posibilidad al uso de otro tipo de tratamiento como lo son los tratamientos químicos con sales de hierro y aluminio.

LITERATURA CITADA

- American Public Health Association., American Water Works Association., & Water Pollution Control Facility. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos.
- Cordero, O. (1977, mayo). Tratamiento de los residuos del café. Método: precipitación química y sedimentación acelerada. En IV Congreso de Ingenieros de los Comités de Cafeteros. Neiva, Colombia.
- Hach Company. (1988). *DR/2000 Spectrophotometer. Procedures Manual*.
- Iannacone, J., & Molano-Linares, J. D. (2018). Tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-floculación utilizando almidón de *Solanum Tuberosum* L. 'papa' como alternativa al manejo convencional. *Biotempo*, 15(1), 83–112. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v15i1.1699>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *NTC 5424:2006 Productos químicos básicos para la industria agrícola. Enmiendas inorgánicas*. <https://tienda.icontec.org/gp-productos-quimicos-basicos-para-la-industria-agricola-enmiendas-inorganicas-ntc5424-2006.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *NTC 3903:2010 Procedimiento para el ensayo de coagulación-floculación en un recipiente con agua o método de jarras*. <https://tienda.icontec.org/gp-procedimiento-para-el-ensayo-de-coagulacion-floculacion-en-un-recipiente-con-agua-o-metodo-de-jarras-ntc3903-2010.html>
- Lardé, G. (1995 , octubre 23-27). Efecto coagulante del hidróxido cálcico en aguas residuales del café. En Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café Procafé & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, *XVII Simposio de Caficultura Latinoamericana* [Memorias]. IICA. San Salvador, El Salvador.
- Llano, B. A., Cardona, J. F., Ocampo, D., & Ríos, L. A. (2014). Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. *Información Tecnológica*, 25(3), 73–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300010>
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(2), 10–17. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Decreto Número 2667 de 2012 Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Decreto2667.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 del 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18911>
- Murillo Castaño, D. M. (2011). *Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada* [Tesis de Doctorado]. Universidad Tecnológica de Pereira. <http://hdl.handle.net/11059/2081>
- Nacheva, P. M., Armenta, S. L., Vigueros, L. C., & Camperos, E. R. (1998). *Tratamiento de efluentes del proceso de curtido al cromo*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales, Paseo Cuauhnáhuac (8532).
- Olivero-Verbel, R., Florez-Vergara, A., Vega-Fellizola, L., & Villegas de Aguas, G. (2017). Evaluación de una mezcla para coagulantes naturales, *Opuntia ficus* y *Moringa oleifera* en clarificación de aguas. *Producción + Limpia*, 12(2), 71–79 p. <http://dx.doi.org/10.22507/pml.v12n2a6>
- Orozco, R. A. (1973, junio 4–9). Purificación de aguas residuales del beneficio del café mediante tratamiento químico. En Association for Science and Information on Coffee. VIASIC International Conference on Coffee Science, Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, N., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., Ramírez, C. A. (2015). *Beneficio de café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/659>
- Rodríguez, N. (2009). *Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas* [Tesis doctoral no publicada]. Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/4342>
- Sevillano, R. L. (2017). *Eficiencia del hidróxido de calcio en el tratamiento de las aguas ácidas de una relavera de Pasco, a nivel laboratorio* [Tesis Pregrado]. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/6897>
- Tejada, R. (2017). *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa minera Santiago-B* [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4695>
- Vanerkar, A. P., Satyanarayan, S., & Satyanarayan, S. (2013). Treatment of food processing industry wastewater by a coagulation/flocculation process. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2 (3), 63–72.