

Utilización de Residuos de Café Tostado y Molido como Bioadsorbente para la Remoción de Arsénico (V) en Agua

ERIKA TINGO PROAÑO ^{a*} RAMIRO ACOSTA^a

^a Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador, Quito

*Correspondencia: erika_098@hotmail.com

Recibido: 29 marzo 2011 / Aceptado: 14 septiembre 2011

Resumen

La contaminación por arsénico causa serios problemas en la salud humana y el agua de bebida es una importante fuente de exposición. Este trabajo de investigación presenta una solución tentativa al problema de contaminación de agua con arsénico en los pozos del sector de Tumbaco que, por el alto costo que demanda su tratamiento, fueron cerrados y otros usados como agua de riego para canchas de fútbol, como es el caso del agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional". Se describe el estudio del efecto del pH y la dosis de residuos de café tostado y molido, previamente activado, en la adsorción de arsénico (V) en solución acuosa. Los valores óptimos para tratar 100 ml de agua con 43,21 $\mu\text{g As (V) / L}$, fueron pH 4,697 y dosificación de residuos de café 1,4067 g a 25°C y tiempo de contacto de 2 horas. Los residuos de café presentaron una eficiencia de remoción del 65,26 % y una capacidad de adsorción de 2 $\mu\text{g de arsénico (V) / g de residuos de café}$, al tratar el agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional".

Palabras clave: residuos de café, activación, remoción, arsénico (V), agua de pozo.

Wasted Roast and Ground Coffee as Bioadsorbent to Removal Arsenic (V) in Water

Abstract

Arsenic contamination causes serious problems in human health and drinking water is a major source of exposure. This research presents a tentative solution to the problem of arsenic contamination of water wells in the area of Tumbaco that were closed for the high cost its treatment, and others are used for irrigation water in soccer fields, like is in "Club Deportivo El Nacional". The study the effect of pH and amount of wasted roast and ground coffee, previously activated, in the adsorption of Arsenic (V) from aqueous solution is described. The optimal values using 100 ml of water 43,21 $\mu\text{g As (V) / L}$, of pH and dosage of coffee were 4.697 and 1.4067 g respectively at 25°C for a 2 hours period of contact time. Residues of coffee were used to remove Arsenic (V) from well water ("Club Deportivo El Nacional") showing a removal efficiency of 65.26% and an adsorption capacity of 2 $\mu\text{g Arsenic (V) / g wasted coffee}$.

Key words: wasted coffee, activation, removal, arsenic (V), well water.

1. Introducción

En el Ecuador el café se consume, generalmente, de varias formas, ya sea como café soluble, que se solubiliza por completo en agua caliente y como café pasado, aquel que se obtiene al hacer pasar agua hir-

viendo a través de un filtro que contiene en su interior café tostado y molido. Otra forma de consumir café es aquella que nos proporcionan las cafeterías como Juan Valdez, Sweet & Coffee, Coffee Tree, Café Libro

y Sutra, lugares en los que el café a consumirse se encuentra tan solo tostado y el momento que se realiza el pedido es molido, colocado en un filtro. Se extrae la bebida con agua o leche según sea el tipo de café que se desea beber. Una de las cafeterías antes mencionadas, genera alrededor de 520 kg de residuos de café por semana, los mismos que se eliminan colocándolos en fundas de basura y son recogidos por el servicio de recolección municipal.

Ecuador exportó 24 137 190,35 toneladas de café, de las cuales 15 562 toneladas métricas corresponden a exportaciones de café soluble o extractos de café, todo esto durante el periodo enero-noviembre de 2010 (1). Si se conoce que tan solo el 9,5% del peso del fruto seco es usado en la industrialización del café (2), el 90,5% queda en forma de desechos, siendo el 10% de los residuos de la industrialización del café, residuos de café tostado y molido. Entonces, en el año 2010 en el Ecuador se generaron 16 381,05 toneladas métricas de residuos de café tostado y molido.

Los residuos de café podrían ser reciclados, existen varios estudios sobre los usos que se les podría dar, lamentablemente, ninguno de ellos se han realizado en nuestro país. En Colombia se los utiliza para generar biocombustible y bioetanol, también, como biomasa para el compostaje (3), en Estados Unidos se han publicado artículos en los que se utilizan los residuos de café para transformarlo en un gel que puede remover metales (4), en Japón, los residuos de café son utilizados para remover metales como el cobre (II) y cadmio (II) con remociones superiores al 90% (5). Se podrían generar 340 millones de galones de biodiésel a partir de los residuos de café que se generan en todo el mundo (6).

El envenenamiento agudo con arsénico se produce con la ingesta de más de 100 mg del elemento; además, hay evidencias de que es, también, carcinogénico. Como el mercurio, el arsénico puede ser convertido por las bacterias en derivados metílicos más móviles y tóxicos. Así también, las condiciones geoquímicas que resultan en la contaminación del agua con arsénico están asociadas comúnmente con la presencia de hierro, azufre y materia orgánica en depósitos producidos por el agua. El hierro que se libera de las rocas erosionadas por el agua de río forma depósitos

de óxido de hierro en las superficies de las partículas de rocas. Este óxido de hierro acumula arsénico y lo concentra a partir del agua de río. Estas partículas son enterradas junto con la materia orgánica biodegradable en los sedimentos y el hierro (III) insoluble de los óxidos férricos se convierte en hierro (II) soluble por las condiciones reductoras anaerobias bajo las cuales se biodegrada a la materia orgánica. Esto finalmente libera el arsénico enlazado que puede entrar en el agua de los pozos (7).

2. Materiales y Métodos

2.1. Procedimiento para activar los residuos de café

Se secaron los residuos de café recolectado, por dos horas a 110°C, para evitar el crecimiento de microorganismos. Se colocaron los residuos en capuchones, con capacidad de alrededor de 60 g cada uno, se trataron, vía Soxhlet, con agua destilada a pH 7 como solvente, por 5 horas y se secaron en estufa con corriente de aire a 110°C por 24 horas, se repitió éste procedimiento por tres ocasiones. Los residuos de café tostado y molido tratado se almacenaron en un desecador. Ver tablas 1 y 2.

2.2. Procedimiento para analizar la química de los residuos de café

Se mezcló 1 mg de residuos de café con 100 mg de KBr (para espectroscopia), en un mortero de ágata. La muestra homogenizada y seca, se colocó en el portamuestra del espectroscopio infrarrojo con transformadas de Fourier (FT-IR), marca Perkin Elmer; modelo RX1 y se registró el espectro en la región de 4000 a 400 cm^{-1} , con cuatro barridos por minuto. Se repitió por tres ocasiones el procedimiento anterior para obtener un espectro de los residuos de café, de los residuos de café activados y de los residuos de café después del proceso de remoción del arsénico (V). Ver figuras 1, 2 y 3.

2.3. Contenido de cenizas de los residuos de café

El contenido de ceniza de los residuos de café se determinó de acuerdo al método estándar ASTM CC14. Se tomó alrededor de 1 g de muestra seca de residuos, se carbonizó a 500°C durante 24 horas, el porcentaje de residuo determinó el contenido de ceniza

de los desechos de café. Se determinó el contenido de cenizas de los residuos de café: sin tratamiento, después del tratamiento de activación y luego de la remoción de arsénico (V). Ver tabla 3.

2.4. Clase de café tostado y molido

Se colocaron 10 g de residuos de café, en un tamizador con tamices con luz de malla de 710 μm , 500 μm y 355 μm , por 10 minutos. En base a los porcentajes de residuos retenidos en cada uno de los tamices (ver tabla 4) se determinó la clase de café del que proceden los residuos usados en este trabajo de investigación. Ver tabla 5.

2.5. Ensayos del diseño experimental

Para determinar las mejores condiciones de extracción de arsénico en medio acuoso empleando desechos de café se utilizó un análisis de superficie de respuesta.

2.5.1. Muestra de agua previamente contaminada

Se tomó 1 mg de $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Fisher Scientific Company, LOT 791236), y se aforó a 5 L con agua destilada, se preservó la muestra a pH menor a 2 con HNO_3 libre de metales, basado en la sección 1060 Collection and Preservation of Samples, Tabla 1060 I (8). Esta agua se utilizó a lo largo del diseño experimental hasta optimizar el proceso. Ver tabla 6.

2.5.2. Muestra de agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional"

Se tomaron 500 mL de muestra representativa del agua de pozo y se preservó la muestra a pH menor a 2 (8).

2.5.3. Procedimiento general de los ensayos de remoción

De acuerdo al diseño experimental (ver Tabla 9) se ajustó el pH de la muestra de agua, con ácido nítrico 0,1N o con hidróxido de sodio 0,1N. En un erlenmeyer se colocó la cantidad de gramos de café requeridos, luego se añadió 100 mL de agua a un pH determinado. El erlenmeyer se colocó en un equipo de agitación mecánica con regulación de temperatura.

2.6. Cuantificación del arsénico

Se utilizó el Método Estándar APHA AWWA 3114B. Generación manual de hidruros / Método Espectrometría de Absorción Atómica. El equipo utilizado fue espectrofotómetro de absorción atómica con generación de hidruros, marca Perkin Elmer; Modelo: AA-NAYST 100.

2.7. Evaluación de la capacidad de adsorción de los residuos de café

La capacidad de adsorción (q) se define como la masa de sorbato adsorbida por unidad de masa de adsorbente. El cálculo de la capacidad de biosorción se realizó utilizando la ecuación [1] (9):

$$q = \frac{V(C_0 - C_f)}{m} \quad [1]$$

Donde: V: Volumen de la solución que contiene el sorbato (L), C_0 : Concentración inicial del sorbato (mg L⁻¹), C_f : Concentración en equilibrio del metal (sorbato) en solución (mg L⁻¹) y m: Masa del adsorbente seco agregado (g).

La eficiencia del proceso de biosorción se puede calcular por medio del % de remoción, con la ecuación [2]:

$$\% = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \times 100 \quad [2]$$

3. Resultados y Discusión

3.1. Activación de los residuos de café tostado y molido

La Tabla 1 indica los resultados obtenidos después del proceso de lavado y secado (activación) de los residuos de café.

Tabla 1. Masa de residuos de café tratados

Capuchón	W1 (g)	W2 (g)	W (g)
1	3,88	61,72	59,71
2	3,04	59,40	56,65

W_1 es la masa capuchón, W_2 representa la masa del capuchón más los residuos de café y W es la masa del capuchón más los residuos de café tostado y molido des-

pués de la activación. ΔW , la variación de masa de los residuos de café tostado y molido. En la Tabla 2 se aprecia que durante el proceso de activación se elimina la porción soluble de los residuos de café tostado y molido.

Tabla 2. Variación de la masa de residuos de café tratados

Capuchón	W2 (g)	W (g)	ΔW (g)
1	61,72	59,71	-2,01
2	59,40	56,65	-2,75

3.2. Análisis de la química de los residuos de café

En las figuras 1, 2 y 3 se indican los cambios químicos que sufrieron los residuos de café recolectados, activados y utilizados en el proceso de adsorción.

Abreviaturas: tensión (t), deformación (d)

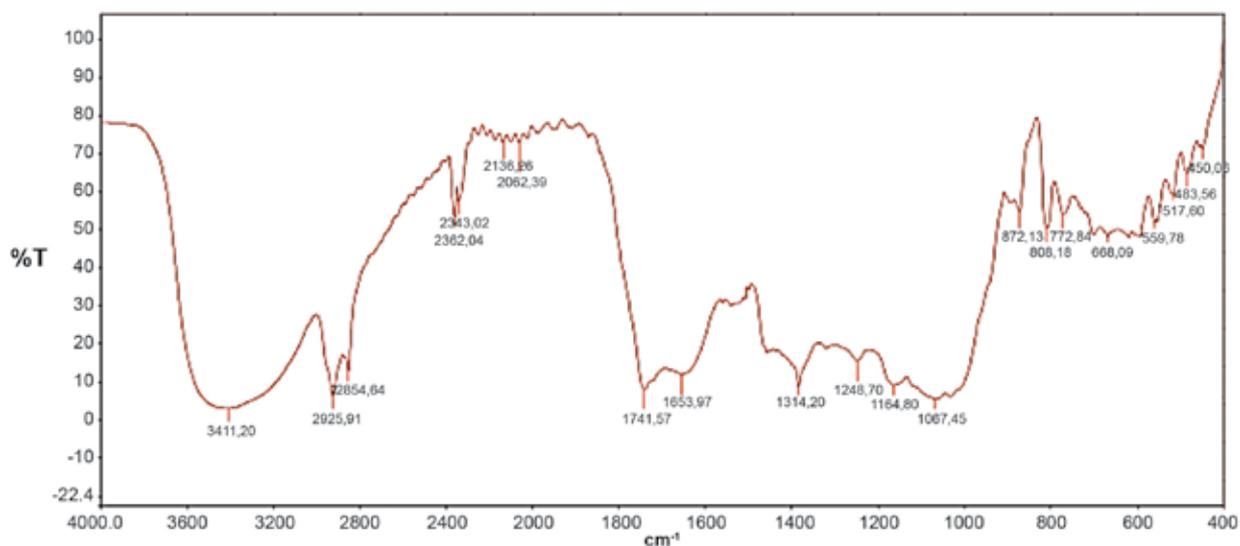


Figura 1. Espectro IR de los residuos de café

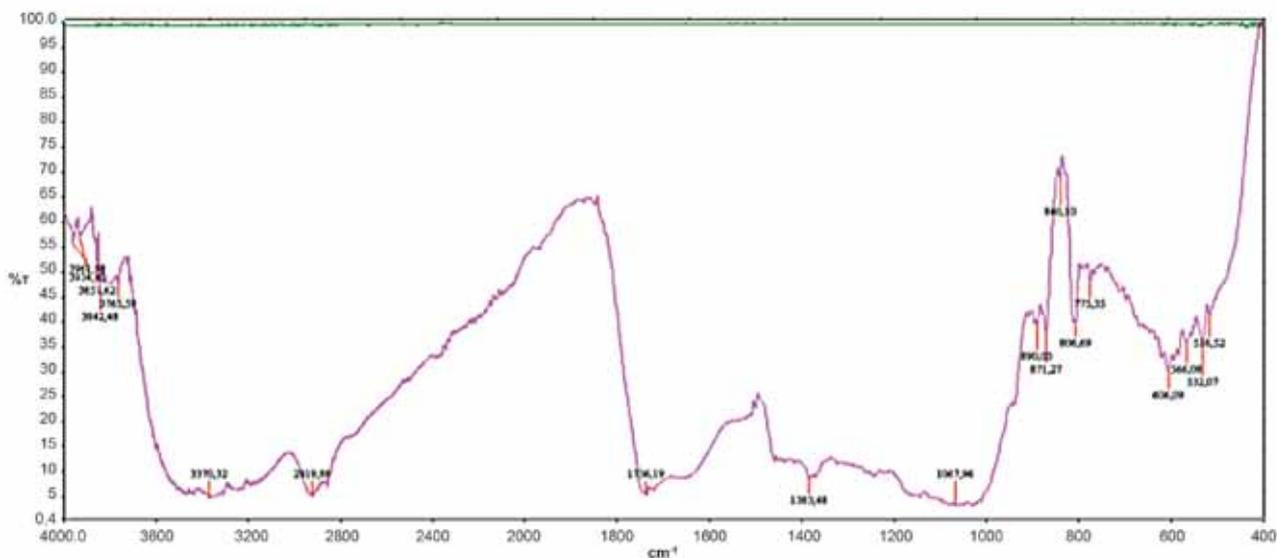


Figura 2. Espectro IR de los residuos de café activados

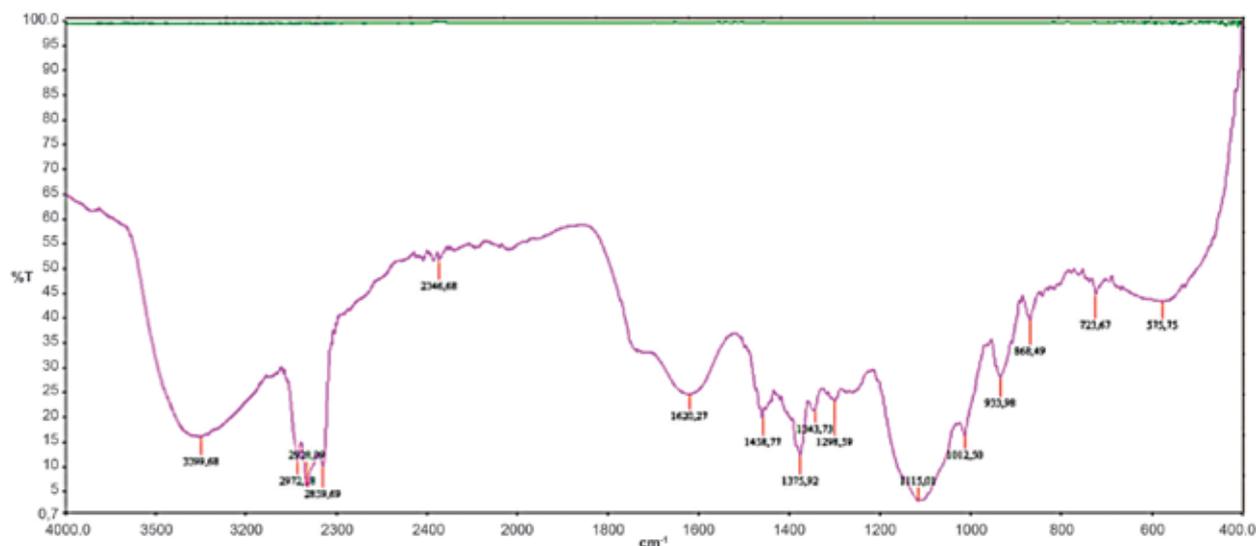


Figura 3. Espectro IR de los residuos de café después de la remoción de As (V)

a) Interpretación Figura 1:

Residuos de café: O–H alcoholes con puentes de hidrógeno (t), 3411.20 cm^{-1} . $\text{Csp}^3\text{-H}$ asimétricos (d), 2925.91 cm^{-1} . $\text{Csp}^3\text{-H}$ asimétricos (d), 2854.64 cm^{-1} . O=C=O asimétrico (d), 2343.02 cm^{-1} . –N=C=S isotiocianatos (d), 2136.26 cm^{-1} . C–C (d), 2062.39 cm^{-1} . –C=O (e) α , β insaturados, 1741.57 cm^{-1} . N–H primaria (d), 1653.97 cm^{-1} . C–CH₃ simétricos (d), 1384.20 cm^{-1} . $\text{Csp}^2\text{-C-N}$ (d), 1248.70 cm^{-1} . C–N (d), 1164.80 cm^{-1} . C–O fenol (t), 1067.45 cm^{-1} . C=C trans (d), 872.13 cm^{-1} . –C–Cl (d), 808.18 cm^{-1} . –C=S (d), 772.24 cm^{-1} . C–(CH₂)_n–C simétricos (d), 668.09 cm^{-1} . CH₂–Cl (d), 559.78– 517.60 cm^{-1} . Mg–O (d), 489.63 cm^{-1} . P–OH asimétrica (d), 450.09 cm^{-1} .

Observaciones: El pico que corresponde al número de onda 3411.20 cm^{-1} se sugiere que corresponde al enlace O–H de alcoholes con puentes de hidrógeno, pues este tipo de enlace presenta bandas entre 3650–3200 cm^{-1} (10). El café proporciona oligoelementos como el fósforo, magnesio, manganeso, zinc, sodio, calcio y hierro (11) mismos que después de la extracción pueden quedar en los residuos de café, es por ello que se sugiere la interpretación de los picos 489.63 cm^{-1} y 450.09 cm^{-1} como los debidos a los enlaces Mg–O y P–OH (12). Se sugiere la presencia de al menos un halógeno en los residuos de café [CH₂–Cl (d), 559.78 cm^{-1}], que por los datos obtenidos se piensa es el cloro, ya que éste se encuentra en varios picos del espectro infrarrojo, descartando la presencia de yodo y bromo, además, a los picos cuyo número de onda está comprendido entre 550–450 cm^{-1} , se sos-

pecha se deben a la presencia de magnesio y fósforo que son constituyentes del café.

b) Interpretación Figura 2:

Residuos de café activados: CH₃–C=O (d), 3961.58 cm^{-1} . OH carboxilo (d), 3934.40 cm^{-1} . N–H cuaternaria (d), 3842.48 cm^{-1} . OH fenol (d), 3765.59 cm^{-1} . –(CH₂)_n–OH (t), 3370.32 cm^{-1} . $\text{Csp}^3\text{-H}$ asimétricos (d), 2919.88 cm^{-1} . –C=O (d) α , β insaturados, 1736.19 cm^{-1} . C–CH₃ simétricos (d), 1383.48 cm^{-1} . C–O (t), 1067.96 cm^{-1} . C=C trans (d)*, 890.03 cm^{-1} . C=C trans (d), 871.27 cm^{-1} . –C–Cl (d), 840.10 cm^{-1} . –C–(CH₂)_n–C simétricos (d), 775.35 cm^{-1} . –CH₂–C–Cl (d), 606.09 cm^{-1} . CH₂–Cl (d), 566,08 cm^{-1} . (10).

Observaciones: En el enlace C=C (890.03 cm^{-1}), los carbonos pueden estar unidos o sustituidos por radicales distintos, esa puede ser la posible explicación de por qué se marcan de forma distinta. En las bandas 516.52 a 532.07 cm^{-1} se puede pensar en la presencia de otros halógenos distintos al cloro, sin embargo, en la bibliografía no se menciona a otros halógenos como constituyentes del café, es por ello que se sugiere que estos picos son sobretonos del enlace CH₂–Cl (d). Los enlaces encontrados cuyo número de onda ésta en el rango de: 3961.58 hasta 3765.59 cm^{-1} , pueden ser sobretonos del enlace N–H cuaternarios, o como en las arcillas (13) que cuando se hinchan por hidratación existe la presencia de varios picos cuyo número de onda se encuentra en el rango comprendido entre 3700 cm^{-1} y 3900 cm^{-1} que se debe a la presencia de grupos OH del

agua adsorbida. Los residuos de café pudieron adsorber agua en el proceso de activación.

c) Interpretación Figura 3:

Residuos de café después de la remoción de arsénico (V): $-(CH_2)_n-OH$ (t), 3399.48 cm^{-1} . Csp^3-H asimétricos (d), 2972.08 cm^{-1} . Csp^2-H cíclico asimétrico (d), 2928.09 cm^{-1} . Csp^3-H asimétricos (d), 2859.69 cm^{-1} . $O=C=O$ asimétrico (d), 2346.68 cm^{-1} . $N-H$ primaria (d) 1620.27 cm^{-1} . $C-CH_2$ asimétricos (d), 1458.77 cm^{-1} . $C-CH_3$ simétricos (d), 1375.92 cm^{-1} . $C=C-N$ (e), 1298.59 cm^{-1} . $C-N$ (e), 1115.08 cm^{-1} . $C-O$ (t), 1012.50 cm^{-1} . $C=C$ trans (d) 933.98 cm^{-1} . $C=C$ trans (d), 868.49 cm^{-1} . $C-(CH_2)_n-C$ simétricos (d), 723.67 cm^{-1} . CH_2-Cl (d), 575.72 cm^{-1} .

Observaciones: El estiramiento de las aminas primarias (3500-3400 cm^{-1}) se encuentra cubierto por el alcohol primario. Los picos cuyo número de onda es de: 868.49 y 933.98 cm^{-1} , pueden corresponder a sobretonos de $C-CH_2$ y de $C-Cl$ respectivamente. El pico cuyo número de onda es 575.72 cm^{-1} puede también corresponder a una alquilarilarsina y el de 933.98 puede corresponder a una tensión simétrica del enlace $As-O$ (14). Existe un pequeño pico en 3900 cm^{-1} , menos intenso que el del espectro anterior, que sugiere puede corresponder a un enlace $N-H$ cuaternaria. No se encuentran picos con números de onda menores a 500 cm^{-1} , lo que permite suponer que el magnesio y el fósforo ya no se encuentren en los residuos de café, ésta observación también se extiende para el espectro de los residuos de café activados.

3.3. Contenido de cenizas de los residuos de café

La Tabla 3 presenta el contenido de cenizas de los residuos de café recolectados, activados y utilizados en el proceso de adsorción. La activación no varía significativamente el contenido de cenizas.

Tabla 3. Contenido de cenizas

Muestra	Masa (g)	% Cenizas
Residuos de café	0,7104	2,04
Residuos de café activados	0,7352	1,99
Residuos de café después de la remoción de As (V)	0,7201	3,01

3.4. Clase de café tostado y molido

Se caracterizaron los residuos de café en base a su tamaño de partícula, ver Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Distribución de tamaño de partícula

Masa inicial de café (g)	Materia retenida (g) tamiz de 710 μm	Materia retenida (g) tamiz de 500 μm	Materia retenida (g) tamiz de 355 μm
10,0180	0,4524	0,9762	4,5162

Tabla 5. Clase de café tostado y molido

Clase de café tostado y molido	%Materia retenida tamiz de 710 μm	%Materia retenida tamiz de 500 μm	%Materia retenida tamiz de 355 μm
Extra fino	4,5	9,7	45,1

3.5. Cuantificación del arsénico

La Tabla 6 indica la concentración de arsénico en el agua previamente contaminada que se utilizó a lo largo del estudio. No se detectó presencia de arsénico en los residuos de café.

Tabla 6. Concentración inicial de arsénico

Co Arsénico en el café ($\mu g/L$)	Co As(V) en el agua contaminada ($\mu g/L$)
Menor al límite de detección	43,21

3.6. Evaluación del proceso de adsorción As (V) con residuos de café en el agua de pozo del Club Deportivo El Nacional

La tabla 7 indica la capacidad de adsorción de los residuos de café al tratar 100 mL de agua con una concentración inicial 43,12 μg As (V) /L.

Tabla 7. Capacidad de adsorción de los residuos de café. Datos por triplicado.

Residuos de café (g)	1,4068	1,4067	1,4068
% de Eficiencia del proceso	62,66	68,76	64,37
Capacidad de adsorción ($\mu g/g$)	1,92	2,11	1,97

Los residuos de café tienen una eficiencia de adsorción de arsénico (V) del 65,26% y una capacidad de adsorción de 2 µg As (V)/g de residuo de café seco. El agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional" disminuyó la concentración de arsénico de 43,12µg/L a 14,98µg/L.

3.7. Demanda de cloro

Este ensayo se basó en el método 2350 del Standard Methods (8). Se realizó para determinar la cantidad de cloro necesario para decolorar el agua tratada con los residuos de café que a pH 4 colorean el agua. 25 mL agua se decoloraron con 1,5 mL de cloro de concentración 57,45 mg Cl₂ / L.

3.8. Análisis estadístico

3.8.1. Variables significativas

La Tabla 9 presenta la combinación de los factores del diseño 2⁴ no replicado con dos niveles. La tabla 10 indica la estimación y distribución normal de los efectos, en base a la cual se graficó la figura 5.

Tabla 8. Diseño 2⁴ no replicado

Número de ensayo	Factor				Combinación de Tratamientos	%Remoción de Arsénico
	A	B	C	D		
1	-	-	-	-	(1)	29,04
2	+	-	-	-	a	45,13
3	-	+	-	-	b	45,24
4	+	+	-	-	ab	47,95
5	-	-	+	-	c	47,08
6	+	-	+	-	ac	34,76
7	-	+	+	-	bc	36,15
8	+	+	+	-	abc	36,39
9	-	-	-	+	d	33,57
10	+	-	-	+	ad	5,16
11	-	+	-	+	bd	12,56
12	+	+	-	+	abd	28,22
13	-	-	+	+	cd	21,25
14	+	-	+	+	acd	7,52
15	-	+	+	+	bcd	15,20
16	+	+	+	+	abcd	7,46

Donde: A es temperatura, B es tiempo de contacto, C es dosificación de residuos de café y D es pH de la solución; el signo + es el nivel alto y el signo - el nivel bajo. Para A= 50 y 25°C, B= 4 y 2 horas, C= 5 y 2.5 g y D= 8,2 y 2 de pH.

Tabla 9. Distribución normal de la estimación de los efectos

Orden (j)	Efecto	Estimación	(j-0,5)/15
15	ABD	6,36	0,9667
14	AB	6,16	0,9000
13	ACD	2,77	0,8333
12	BCD	2,52	0,7667
11	B	0,71	0,7000
10	ABC	-1,52	0,6333
9	BD	-1,72	0,5667
8	CD	-1,89	0,5000
7	A	-3,44	0,4333
6	BC	-4,56	0,3667
5	AC	-4,95	0,3000
4	AD	-5,12	0,2333
3	C	-5,13	0,1667
2	ABCD	-8,00	0,1000
1	D	-23,85	0,0333

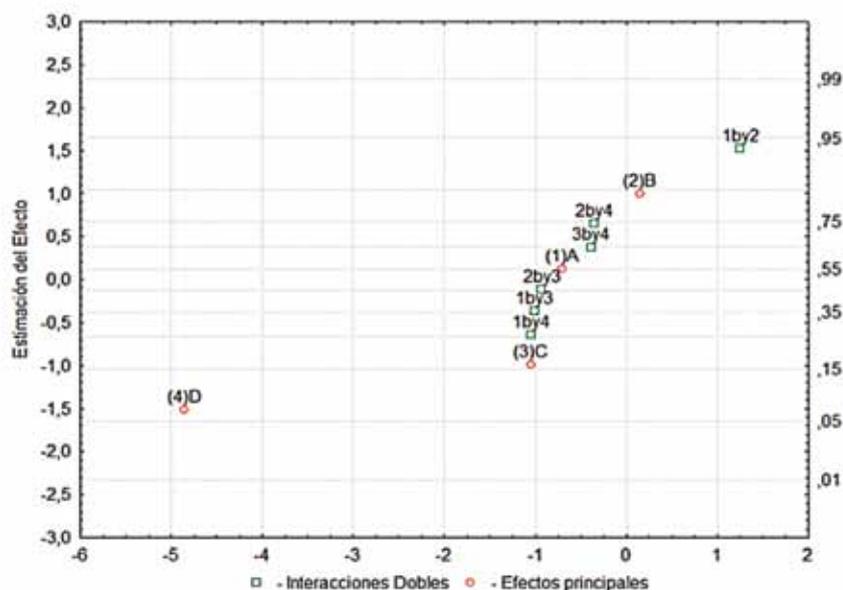


Figura 4. Estimación de los efectos del diseño 2^4 no replicado. Elaborado por Erika Tingo

De la Figura 5 se determinan como variables significativas, a las variable C y D por encontrarse muy alejados de la línea recta que forman los otros valores de la estimación de los efectos.

3.8.2. Proyección del diseño 2^4 a un diseño 2^2 con cuatro réplicas

Al ser 2 de las 4 variables estudiadas no significativas, el diseño 2^4 , propuesto en un inicio se transforma en un diseño 2^2 con cuatro réplicas, ver Tabla 11 (15).

Tabla 10. Diseño 2^2 con 4 réplicas

Notación Yates	C	D	% Remoción de Arsénico				Sumatoria
(1)	-	-	29,04	45,13	45,24	46,95	167,36
a	+	-	47,08	34,76	36,15	36,39	154,38
b	-	+	33,57	5,16	12,56	28,22	79,51
ab	+	+	21,25	7,52	15,20	7,46	51,43

3.8.3. Determinación de un máximo relativo

En el diseño 2^2 se adicionan tres puntos centrales, cuyos valores y resultados se indican en la Tabla 12. Dado que el valor de suma de cuadrados de la curvatura es distinto de cero y, además, es mucho mayor que el valor de F (ver tabla 13), se detecta que el diseño 2^2 con tres puntos centrales se encuentra en una zona de curvatura.

Tabla 11. Adición de 3 puntos centrales al diseño 2^2 con 4 réplicas

Notación Yates	C	D	% Remoción de Arsénico			Sumatoria	
(1)	-	-	29,04	45,13	45,24	46,95	167,36
a	+	-	47,08	34,76	36,15	36,39	154,38
b	-	+	33,57	5,16	12,56	28,22	79,51
ab	+	+	21,25	7,52	15,20	7,46	51,43
Puntos al centro	0	0	80,28	79,92	91,71		

Tabla 12. ANOVA del diseño 2^2 con 4 réplicas y 3 puntos centrales

Factor	SS	df	MS	F	p
Curvatura	7831,54	1	7831,539	102,2966	0,000000
C	105,37	1	105,370	1,3764	0,260297
D	2275,29	1	2275,290	29,7201	0,000085
CD	14,25	1	14,251	0,1861	0,672716
Error	1071,80	14	76,557	-	-
Total SS	11298,25	18	-	-	-

3.8.4. Superficie de respuesta

Para calcular las condiciones óptimas de extracción de arsénico, se utilizó el método estadístico de Superficie de Respuesta con un diseño compuesto central 2^2 con cuatro réplicas y tres puntos centrales. Con los datos de la Tabla 14 se construyeron las Figuras 6 y 7.

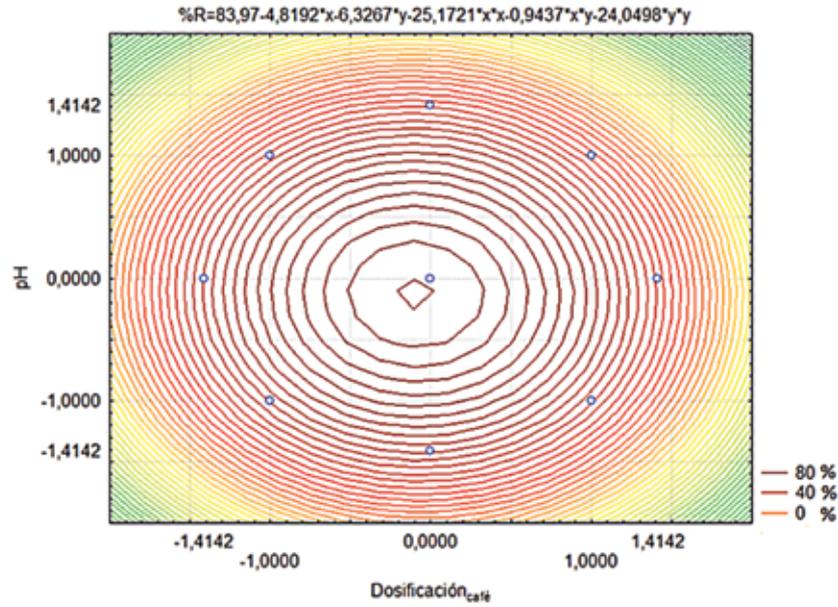


Figura 5. Superficie de respuesta, vista superior 2D, en unidades codificadas. Elaborado por Erika Tingo

Tabla 13. Diseño compuesto central 2² con 4 réplicas y 3 puntos al centro

Variables naturales		Variables codificadas		Respuesta
Residuos café (g)	pH	C	D	%Remoción As
0,5	2	-1	-1	29,04
0,5	2	-1	-1	43,13
0,5	2	-1	-1	45,24
0,5	2	-1	-1	47,95
0,5	8,2	-1	1	33,57
0,5	8,2	-1	1	5,16
0,5	8,2	-1	1	12,56
0,5	8,2	-1	1	28,22
2,5	2	1	-1	47,08
2,5	2	1	-1	34,76
2,5	2	1	-1	36,15
2,5	2	1	-1	36,39
2,5	8,2	1	1	21,25
2,5	8,2	1	1	7,52
2,5	8,2	1	1	15,20
2,5	8,2	1	1	7,46
1,5	5,1	0	0	80,28
1,5	5,1	0	0	79,92
1,5	5,1	0	0	91,71
2,9	5,1	1,414	0	15,83
2,9	5,1	1,414	0	6,03
0,1	5,1	-1,414	0	52,52
0,1	5,1	-1,414	0	57,09
1,5	9,5	0	1,414	23,59
1,5	9,5	0	1,414	14,43
1,5	0,7	0	-1,414	69,70
1,5	0,7	0	-1,414	67,03

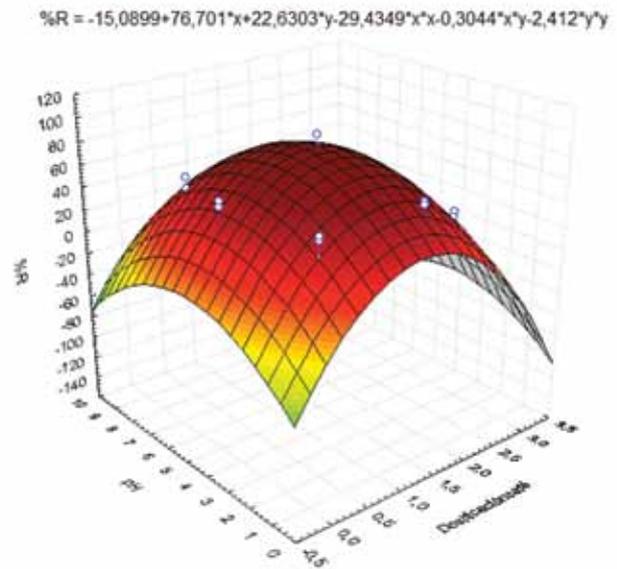


Figura 6. Superficie de respuesta vista 3D, en unidades naturales. Elaborado por Erika Tingo

La ecuación para la superficie de respuesta: % Remoción de arsénico (V) (%R) en función de dosificación de café (x) y de pH (y) es:

$$\%R=83,97-4,8192x-6,3267y-25,1721x^2-0,9437xy-24,0498y^2 \quad [3]$$

Para determinar los valores de las variables que maximizan el proceso de remoción se resuelven las ecuaciones [4] y [5]:

$$(d\%R)/dx = -4,8192 - 2(25,1721)x - 0,9437y \quad [4]$$

$$(d\%R)/dy = -6,3267 - 2(24,0498)y - 0,9437x \quad [5]$$

$$y = -0,1297$$

$$x = -0,0932$$

que en unidades naturales da:

$$\text{pH} = 4,6979$$

$$\text{Residuos}_{\text{café}} = 1,4067\text{g}$$

que son los valores que deben tener la variables para obtener un máximo de remoción de arsénico.

4. Conclusiones

- Los residuos de café tostado y molido recolectados fueron de producción nacional, variedad arábigo, clase de molido extra fino, con un porcentaje original de cenizas de 2,04%. El proceso de activación (lavado y secado) de los residuos mejoró la superficie de contacto ya que originalmente estaban en forma de pequeños aglomerados y pasaron a formar un polvo fino.
- Las condiciones óptimas, para las variables significativas, para la remoción de arsénico (V) usando el método estadístico de Superficie de Respuesta

fueron: pH = 4,679 y 1,4067 g para los residuos de café tostado y molido para tratar 100 mL de agua con 43,21 µg As (V) / L. Las variables no significativas se mantuvieron en sus niveles bajos de 25°C y 2 horas de tiempo de contacto con agitación mecánica.

- En el agua previamente contaminada se llegó a remover el arsénico hasta 91,71% (39,63 µg/L) con una capacidad de adsorción de los residuos de café de 2,6 µg As (V)/g de residuo de café seco. En el agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional" los residuos de café tuvieron una eficiencia de adsorción de arsénico (V) de 65,26% (28,14µg/L) y una capacidad de adsorción de 2 µg As (V)/g de residuo de café seco. El agua de pozo del "Club Deportivo El Nacional" disminuyó la concentración de arsénico de 43,12µg/L a 14,98µg/L. La diferencia de porcentaje de remoción puede ser debida a la presencia de otros elementos en el agua de pozo.
- Con carbón activado se puede remover arsénico, de una concentración 4629 veces más concentrado que la utilizada en esta investigación, con un 75,37% de eficiencia (16). Los residuos de café son de bajo costo y pueden remover arsénico (V) de soluciones muy diluidas con una eficiencia de adsorción del 91,71%.

Referencias

1. Banco Central de Ecuador. (s.f.). Recuperado el 21 de Enero de 2011, de <http://www.portal.bce.fin.ec>
2. Rodríguez, N. (1977). Manejo de los Residuos en la Industria Cafetera. En H. Calle, Subproductos del Café (pág. 84). Chinchiná: Cenicafé.
3. Farfán, F. (2002). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado el 28 de Diciembre de 2010, de Cenicafé, Centro Nacional de Investigaciones del Café: www.cenicafé.com
4. Minamisawa, M., Minamisawa, H., Yoshida, S., & Takai, N. (2005). Characterization of adsorption gels prepared from plant biomaterials. *Green Chemistry* 7, 595–601. Recuperado el 31 de Diciembre de 2010 de: www.rsc.org/greenchem.
5. Minamisawa, M., Nakajima, S., Mitsue, Y., Yoshida, S. Takai, N. (2002). Removal of Copper (II) and Cadmium (II) in Water by Use of Roasted Coffee Beans. *Nihon Kagaku Kaishi* 3, 459 - 461.
6. Kondamudi, N., Mohapatra, S. K., & Misra, M. (2008). Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56, 11757–11760.
7. Manahan, S. E. (2007). Introducción a la Química Ambiental. México D.F.: Reverté S.A.
8. Clesceri, L. S., & Greenberg A, T. R. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC: Port City Press, Baltimore, Maryland.

9. **Muñoz, M. C. (2007).** Remoción de metales pesados en aguas residuales Utilizando una macrófita acuática (eleocharis Acicularis) muerta. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
10. **Silverstein, R. M., Webster, F. X., & Kiemle, D. J. (2005).** Spectrometric Identification of Organic Compounds. New York: John Wiley & Sons, INC.
11. **Wikipedia. Café Ecuatoriano. (14 de Marzo de 2010).** Wikipedia La Enciclopedia Libre. Recuperado el 25 de Enero de 2011 de: <http://www.wikipedia.org>
12. **Caicedo, R. S. (2010).** Análisis de la estructura molecular de materiales poliméricos usando la técnica de Espectrometría Infrarroja. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
13. **Adams, M. (1995).** Fundamentos de Química de Suelos. Anauco, Anzóategui, Venezuela: Talleres de Anauco Ediciones C.A.
14. **Shagidurlin, R. R., & Pavlova, T. E. (1963).** Vibrational Spectra of Organic Arsenic Compounds. *Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2117-2124.
15. **Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2004).** Análisis y Diseño de Experimentos. México, D.F.: Mc Graw Hill.
16. **Lavado, C., Recuay, N., BendeZú, S., García, R., & Mu, Y. (2002).** Remoción de arsénico desde soluciones Acuosas por medio de Carbones Activos. *Boletín de la Sociedad Química del Perú*, LXVIII (3), 150-167.