

CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS DE TRATABILIDAD DEL AGUA DE NIXTAMALIZACIÓN MEDIANTE PROCESOS FISICOQUÍMICOS, CON FINES DE REUSO.

Rivera Huerta María de Lourdes¹, Piña Soberanis Martín², Montellano Palacios Leticia³,
Almazán García Fabián⁴, Gómez Rojas Areli⁵

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso, Jiutepec, Mor. C.P. 62550.
(777)329.36.62

lriviera@tlaloc.imta.mx¹, mpina@tlaloc.imta.mx², letimont@tlaloc.imta.mx³, fabian-almazán@hotmail.com⁴,
arlette_gra@hotmail.com⁵

Resumen

Para satisfacer la demanda actual de tortillas en México se requiere procesar anualmente alrededor de 3.5 millones de toneladas de maíz, el proceso incluye la nixtamalización que es la cocción del grano en medio alcalino. El residuo de este proceso es el líquido de cocción que representa alrededor de 2.33 millones de toneladas al año y que en la gran mayoría de los casos es vertida al drenaje sin tratamiento previo. La caracterización fisicoquímica realizada a este líquido muestra altas concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos, materia orgánica en su gran mayoría disuelta además de dureza y alcalinidad altas. Los industriales del maíz se muestran interesados en encontrar una alternativa para aprovechar el agua reusándola en el mismo proceso, para ello se requiere remover la totalidad o parte de los contaminantes que contiene. En este estudio se realizaron pruebas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración para evaluar el potencial de este proceso para el tratamiento del nejayote, los resultados demostraron que no es suficiente para obtener agua reusable en el proceso de producción de los molinos ya que sólo puede remover eficientemente los sólidos suspendidos mientras que la materia orgánica disuelta permanece en el líquido; sin embargo podría ser la primera etapa de un tren de tratamiento para lograr su reúso.

Palabras clave: nejayote, reúso de agua, coagulación, residuos de nixtamalización

Introducción

Uno de los alimentos básicos en México es el maíz, principalmente consumido en forma de tortillas, datos del Consejo Empresarial de la Industria del Maíz revelan que en el país se producen anualmente entre 7.5 y 8.0 millones de toneladas de éstas en molinos de nixtamal; para lo que es necesario procesar 3.5 millones de toneladas de maíz.

La nixtamalización es parte de este proceso y se refiere a la cocción alcalina de los granos de maíz, mediante la cual se mejoran las características nutricionales, fisicoquímicas y sensoriales de las tortillas. Para la nixtamalización se emplean dos partes de una solución acuosa de cal al 1% por cada porción de maíz. Después de un tiempo de reposo de por lo menos dos horas, los granos cocidos se muelen y el producto conocido como masa se emplea para la elaboración de las tortillas. En la modalidad industrial, la masa se seca y muele para producir harina, (Reyes-Vidal, et al., 2012, Valderrama-Bravo, et al., 2013). Aproximadamente un 30 % del agua empleada en la cocción es absorbida por el maíz, el líquido restante, llamado nejayote, es el subproducto de la nixtamalización, El nejayote se caracteriza por contener altos valores de pH, temperatura y materia orgánica proveniente del propio maíz (Pulido, et al., 1987).

Este líquido forma parte de los desechos de los molinos que de forma generalizada se descarga como agua residual sin tratamiento previo. Además de las implicaciones de contaminación que tiene, es también agua que en los molinos

podiera aprovecharse reusándola para el proceso ya sea eliminando parte de sus constituyentes o llevándola nuevamente a sus condiciones de potabilidad.

El objetivo de este estudio fue la caracterización de esta agua para identificar el tipo de constituyentes de la misma que la hacen no potable; así como evaluar la potencialidad de un tren de tratamiento fisicoquímico conformado por coagulación, floculación, sedimentación y filtración para retirar sus contaminantes. La intención de probar un tratamiento de este tipo radica en que estos requieren poco espacio, condición que representa una ventaja debido a que esas son las condiciones que generalmente se presentan en la mayoría de las instalaciones de los molinos.



Fotografía 1. Granos de maíz en la solución de cocción, nejayote.

Metodología

Caracterización

Con objeto de tener información de las características del agua de nixtamalización se colectaron muestras de nejayote de un molino ubicado en Jiutepec, Morelos. Y se analizaron todos los parámetros de calidad que establece la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*, excepto las características organolépticas y radiactividad. Para conformar una muestra representativa se realizó una muestra compuesta del líquido que fluía del dren de la tina de reposo, tomando muestras a diferentes tiempos

Pruebas de tratabilidad

Para el desarrollo de las pruebas de tratabilidad se utilizaron diferentes coagulantes y floculantes. Los ensayos se realizaron en un equipo de prueba de jarras con seis agitadores mecánicos tipo paleta, accionados por un mismo motor, por lo que se puede realizar la prueba simultáneamente con seis condiciones diferentes de dosis del coagulante o floculante.

El tratamiento consiste de tres etapas: coagulación, floculación y sedimentación que se realizan en el mismo recipiente, simulando un proceso en lote. En la Tabla 1 se muestran las etapas de la prueba y las condiciones de operación que se emplearon.

Tabla 1. Etapas de prueba y condiciones de operación

Etapa de proceso	Tiempo	Velocidad
Mezcla rápida (Coagulación)	15 s	300 rpm
Mezcla lenta en tres etapas (Floculación)		
Etapa 1	6 min	80 rpm
Etapa 2	6 min	60 rpm
Etapa 3	6 min	40 rpm
Sedimentación	20 min	

En principio este tipo de tratamiento es aplicable para separar del agua los contaminantes particulados, y puede tener un ligero efecto sobre los contaminantes disueltos. La efectividad de este proceso de tratamiento depende de las características físicas y químicas del agua a tratar, de los parámetros de operación del sistema como tiempo y velocidad de agitación, tiempo de sedimentación y de la naturaleza de los productos químicos empleados.

Todas las pruebas realizadas en este estudio fueron llevadas al cabo a valores de temperatura entre 27 y 29 °C.

Debido a que en este proceso de tratamiento el pH del agua es un factor determinante que afecta el desempeño de los coagulantes y floculantes se realizaron pruebas ajustando el pH del agua para encontrar el valor en el que se obtuvieran los mejores resultados de remoción. Para disminuir el pH del agua se adicionaba la cantidad necesaria de una disolución de ácido clorhídrico 5 N. Para bajar el pH del agua a un valor de 7.0 se requiere adicionar alta cantidad de ácido que impacta en la calidad del agua por el incremento de los sólidos disueltos, así

como en el costo del tratamiento; por lo anterior se determinó encontrar para cada producto, o combinación de productos químicos, el pH más alto en el que el desempeño de los coagulantes y floculantes fuera aceptable.

Los parámetros de calidad del agua que se tomaron en consideración para evaluar la eficiencia de cada uno de los productos probados fueron los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y de la Demanda Química de Oxígeno, DQO.

Como etapa final del estudio se realizó una prueba con la mejor condición de dosis y pH encontrados en la etapa previa, el agua obtenida de la etapa de sedimentación se filtró por un lecho de arena. Una porción del agua sedimentada se filtró a través de una membrana de 0.1 µm para simular un proceso de microfiltración.

Métodos analíticos

En la Tabla 2 se describe el equipo y los métodos analíticos empleados para la determinación de los parámetros de calidad del agua en las pruebas de tratabilidad.

Tabla 2. Equipos y métodos analíticos empleados en las pruebas de tratabilidad

Parámetro	Equipo / método
Turbiedad	Turbidímetro marca Hach, modelo 2 100 P, rango 0 - 1 000 NTU
Color	Espectrofotómetro marca Hach Drel/2 800, método APHA, longitud de onda 455 nm, rango 0 – 500 UPtCo
pH	Potenciómetro marca Orion, modelo 420 A, rango de 0-14 unidades
Conductividad	Conductímetro marca Orion, modelo 130
Sólidos disueltos totales	
Temperatura	
Alcalinidad	Titulación digital, método 8 203 Total y fenolftaleína límite de cuantificación de 10 a 4 000 mg/L
Dureza total	Titulación digital, límite de cuantificación de 10 a 4 000 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	Digestor y espectrofotómetro marca Hach
Sólidos suspendidos totales	Espectrofotómetro marca Hach Drel/2800, Método 8006 y Método gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001

Resultados

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos de los análisis de los parámetros de calidad de la muestra de nejayote y se comparan con los límites permisibles para agua potable.

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

Tabla 3. Características del nejayote respecto a la Modificación del año 2000 a la NOM 127SSA1-1994

PARAMETRO	UNIDADES	NOM-127-SSA1-1994	NEJAYOTE
CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS			
Coliformes fecales	NMP/100m L	Ausencia	<3
Coliformes totales	NMP/100m L	Ausencia	<3
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLEPTICAS			
Color verdadero	U Pt/Co	20	2 500
Olor	No. Umbral	Agradable	N.d.
Sabor	No. Umbral	Agradable	N.d.
Turbiedad	UTN	5	360
METALES			
Aluminio	mg/L	0.2	0.1899
Arsénico	mg/L	0.025	0.0013
Bario	mg/L	0.7	<0.50
Cadmio	mg/L	0.005	0.0030
Cobre	mg/L	2	0.099
Cromo	mg/L	0.05	<0.005
Hierro	mg/L	0.3	0.422
Manganeso	mg/L	0.15	0.066
Mercurio	mg/L	0.001	<0.0010
Plomo	mg/L	0.01	<0.005
Sodio	mg/L	200	8.497
Zinc	mg/L	5	0.107
COMPUESTOS ORGÁNICOS			
Fenoles totales	mg/L	0.3	4.43
TRIHALOMETANOS TOTALES Y BTEX			
Trihalometanos tot.	mg/L	0.2	<0.0007138
Benceno	µg/L	10	<0.608
Etilbenceno	µg/L	300	<0.6216
Tolueno	µg/L	700	<0.451
Xileno	µg/L	500	<0.52
PLAGUICIDAS Y HERBICIDAS			
Aldrin	µg/L	0.03	<0.02
Dieldrin	µg/L	0.03	<0.01
Clordano	µg/L	0.2	<0.02
DDT	µg/L	1	<0.40
Gama-bch (lindano)	µg/L	2	<0.030
Hexaclorobenceno	µg/L	1	<0.040

Heptacloro y su epóxido	µg/L	0.03	<0.03 <0.020
Metoxicloro	µg/L	20	<0.80
2,4-d	µg/L	30	<0.6582
FISICOQUIMICOS			
Cianuros totales	mg/L	0.07	< 0.02
Cloro libre residual	mg/L	0.2-1.5	0.19
Cloruros	mg/L	250	151
Dureza total	mg/L CaCO ₃	500	3 350
Fluoruros	mg/L	1.5	0.848
Nitratos (nitrógeno de)	mg/L	10	0.493
Nitritos (nitrógeno de)	mg/L	1	< 0.0213
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.5	1.76
pH	U pH	6.5-8.5	10.42
Sólidos disueltos Tot	mg/L	1 000	23 213
Sulfatos	mg/L	400	32.6
SAAM	mg/L	0.5	< 0.130

Tabla 4. Parámetros adicionales

PARAMETRO	UNIDADES	NEJAYOTE
Temperatura	°C	35
Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	10 698
Sólidos suspendidos totales Método espectrofotométrico	mg/L	5 100
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	31 668

Por otro lado, los análisis del agua con la que se abastece el molino fueron: pH=8.2, turbiedad = 0.43 UTN, sólidos disueltos totales= 219 mg/L, color verdadero = 0, alcalinidad y dureza total 83 y 50 mg/L como CaCO₃; por lo que se puede confirmar que el total de los contaminantes encontrados en el nejayote proviene de la cocción del maíz.

Con base en estos datos, se estableció que el tratamiento debía tener como meta la remoción de la materia orgánica; del calcio que provoca alta dureza en el agua; de los sólidos suspendidos totales; fenoles y nitrógeno amoniacal. El color del agua es provocado por la materia orgánica, los sólidos suspendidos totales y la turbidez están relacionados entre sí e indican materia particulada. El pH alto indica presencia de hidróxidos que son adicionados al agua mediante la cal, Ca(OH)₂.

Por otro lado, en la Tabla 5 se muestra un resumen de los mejores resultados obtenidos en las pruebas con los diferentes productos empleados, también se mencionan las condiciones de prueba con las que se obtuvieron dichos resultados.

Discusión

De forma general los productos coagulantes y floculantes no tuvieron un buen desempeño en la condición de pH en la que se encuentra el nejayote.

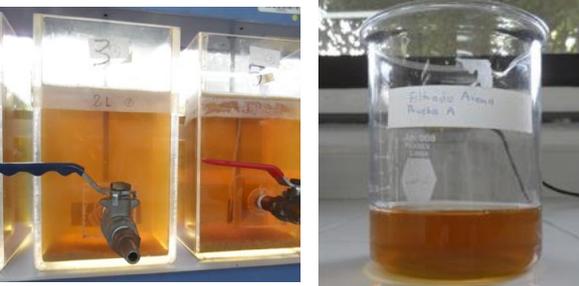
El sulfato de aluminio sólo o trabajando a la par con floculantes, tuvieron un muy pobre desempeño, aun ajustando el valor del pH entre 5.0 y 8.0, con este coagulante se consiguió una remoción máxima del 52% de los sólidos suspendidos totales y como máximo el 8% de reducción de la DQO.

Con respecto a los polímeros sintéticos empleados, la disminución del pH del nejayote a valores de 10 o menos, mejora la funcionalidad de los productos para la remoción de los sólidos suspendidos. El pH en el que mejor respuesta se obtuvo depende del tipo de productos coagulantes o floculantes empleados.

A partir de los resultados obtenidos no es posible determinar si el carácter iónico de los polielectrolitos empleados es un factor importante para lograr la separación de los coloides del nejayote.

De todas las pruebas realizadas los mejores resultados se obtuvieron con una poliácridamida catiónica empleada como coagulante, previo ajuste del pH del nejayote a un valor de 10.0, la remoción de SST fue del 99% y tan sólo 14% de las sustancias que provocan la DQO.

Empleando este coagulante y las mismas condiciones de prueba con equipos de jarras se trataron 20 litros de agua, el agua obtenida de la etapa de sedimentación se filtró por un lecho de arena. Una porción del agua sedimentada se filtró a través de una membrana de 0.1 µm para simular un proceso de microfiltración, en la Fotografía 2 se muestra el aspecto de la muestra en las diferentes etapas de tratamiento.



Fotografía 2. Aspecto del nejayote sin tratar (arriba), después de coagulación, floculación y sedimentación (abajo izquierda) y filtrado por arena (abajo derecha).

El análisis de algunos parámetros de calidad del agua después de las diferentes etapas de tratamiento se muestra en las siguientes gráficas.

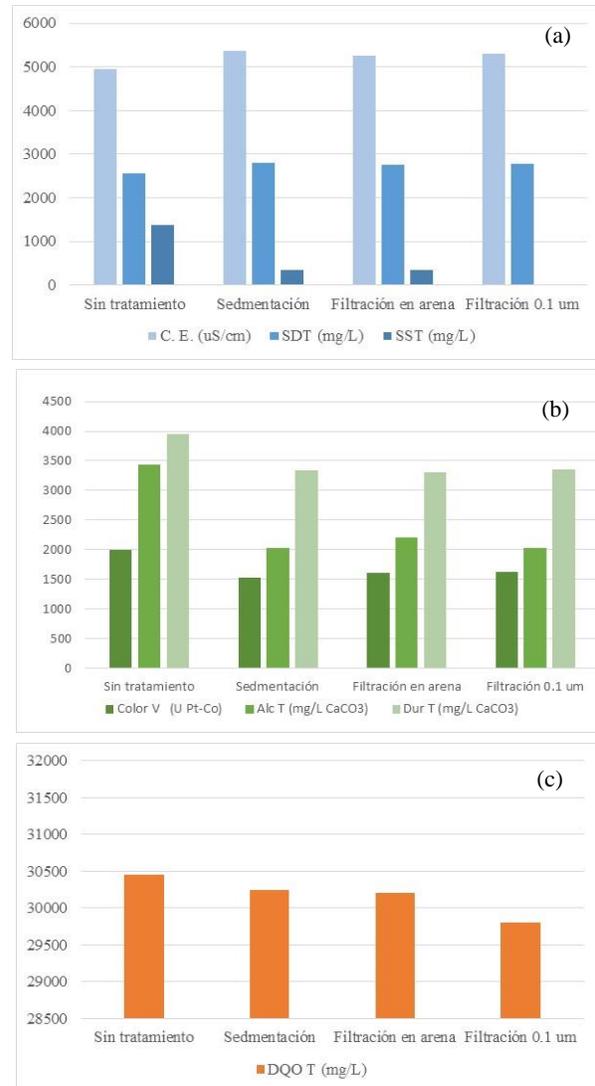


Figura 1. Evolución de la calidad del agua durante el proceso de tratamiento: (a) contenido de sólidos, (b) concentración de alcalinidad y dureza; color verdadero y (c) demanda química de oxígeno.



Tabla 5. Resumen de resultados de las pruebas con diferentes coagulantes y floculantes

Coagulante	Floculante	Dosis Coagulante (mg/L)	Dosis Floculante (mg/L)	pH de prueba	Remoción de SST %	Remoción de DQO %	Observaciones
Bufloc 5290 Poliacrilamida, peso molecular medio. Catiónico	-	1 a 10 y 10 a 60	-	6 a 10 y 11.87	99	7 a 14	Mejor dosis 10 mg/L, Mejor pH = 10.0
SNF FL 2949 Poliamina de mediano peso molecular. Catiónico	FLOPAM AN 934VHM Peso molecular ultra alto Aniónico	100	2 a 15	8	97	0.2 a 4.9	
AQ PI-S720 Aniónico	-	15 a 25	-	7	96	5 a 9	Mejor dosis 15 mg/L
Bufloc 5631 Aniónico	-	5 a 30	-	6 a 10 y 11.1	96	4 a 13	Mejor condición dosis 5 mg/L y pH = 8.0
FLOPAM AN 934VHM Peso molecular ultra alto. Aniónico	-	5		6 a 10 y 11.89	95	2.1 a 6.7	Trabaja bien a pH ≤ 10. No trabaja bien a pH =11.89
Bulab 5255 Aniónico	-	2 a 12	-	8	92	3 a 11	Mejor dosis 10 mg/L
FLOQUAT FL 2949 Peso molecular bajo. Catiónico	FLOPAM FO 4650 SSH Peso molecular alto Catiónico	100	2 a 15	8	91	0 a 8.5	
AQ PC-B517	-	15 a 25	-	7 a 12	89	4 a 9	Mejor remoción con dosis de 17 mg/L y pH =8.0
FLOQUAT FL 2949 Peso molecular bajo. Catiónico	-	100 a 350	-	8	72	-	
FLOQUAT FL 14481 PoliDADMAC , peso molecular bajo. Catiónico	-	10 a 300	-	8	69	-	
Superfloc C-592 PoliDADMAC, peso molecular medio. Catiónico	Superfloc C-1596 Poliacrilamida catiónica peso molecular alto	10 a 60	0.2 a 1.2	8	67		
Sulfato de aluminio	Superfloc C-1596	0 a 100	1.5	5.0 a 8.0	52		El desempeño no se ve mejorado con la modificación de pH en el intervalo estudiado.
Sulfato de aluminio	-	20 a 70	-	5.0 a 7.5	44	3 a 8	Mejor dosis 40 mg/L, el desempeño no mejora con la modificación de pH en el intervalo estudiado.



“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

Se observa que el agua tratada incrementa su conductividad y sólidos disueltos por la adición de ácido para disminuir el pH a un valor de 10 en el que el polímero es eficiente para la remoción de sólidos suspendidos. El pH del agua filtrada queda en 9.72 unidades. La dureza total se disminuye en un 11%. La DQO y el color no tienen remoción significativa incluso después de la etapa de microfiltración lo que confirma que la gran mayoría de la materia orgánica está en solución. Se remueve sólo un 75 % de sólidos suspendidos después de la etapa de filtración granular. Una observación importante es que el nejayote incrementa su viscosidad y hace difícil el paso del agua a través de los filtros de arena. También dificulta la filtración a vacío con membranas de 0.1 μm .

Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Oaxaca-Luna, A., Del Real López, A., Espinosa-Arbelaez, D., Rodríguez-García, M. (2013). Physico-mechanic treatment of nixtamalization by-product (nejayote). *CyTA-Journal of Food*. Vol. 11, No. SI, 75-83, <http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2013.781680>.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Consejo Empresarial de la Industria del Maíz por el financiamiento para las pruebas realizadas así como por su apoyo para la obtención de las muestras.

Conclusiones

La caracterización del agua de nejayote muestra que el agua contiene: a) gran cantidad de sólidos suspendidos que provocan turbiedad; b) materia orgánica que en su mayoría se encuentra en forma disuelta y que se manifiesta también como color; c) una dureza elevada derivada del calcio adicionado al agua en forma de cal (óxido de calcio), compuesto que también produce condiciones alcalinas (valores de $\text{pH} > 10$) y d) alta concentración de sólidos disueltos (materia orgánica) y sales.

Una característica sobresaliente del agua problema es que los sólidos suspendidos se encuentran formando una suspensión muy estable por lo que requieren de un agente externo, por ejemplo un producto químico que pueda desestabilizar la suspensión y producir la separación de los sólidos del agua.

Las pruebas de tratamiento mediante coagulación, floculación y sedimentación con diversos productos coagulantes y/o floculantes mostraron que no es posible llevar a cabo la coagulación al pH natural del nejayote, por lo que es necesario disminuirlo a valores de 10 o menores según el tipo de coagulante. Se observó que los polímeros orgánicos son más eficientes que los coagulantes metálicos para este tipo de agua. Los mejores resultados obtenidos muestran remociones entre el 75 y el 97 % de sólidos suspendidos totales. La cantidad de materia orgánica prácticamente no disminuye.

Los resultados obtenidos muestran que un tratamiento fisicoquímico del tipo empleado en este estudio no es suficiente para obtener agua reusable en el proceso de producción de los molinos, sin embargo este proceso podría ser la primera etapa de un tren de tratamiento para lograrlo. Por lo anterior es recomendable un estudio de tratabilidad mediante procesos biológicos para la degradación de la materia orgánica no obstante la limitante por los espacios, tiempos y costos que estos puedan implicar.

Referencias

Pulido, R., Escarcega, C., Durán de Bazúa, C., (1987) Modelo cinético para reactores biológicos rotatorios usados en el tratamiento aerobio de efluentes líquidos de la industria del maíz. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 2(1), 15-24

Reyes-Vidal, M., Aceves, A., Martínez-Silva, A., Asaff, A. (2012). Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reuso del agua. *Estudios sociales: Revista de investigación científica*. Segundo Número Especial, 200-216.