

EVALUACION DEL RENDIMIENTO Y USO DE LA CORTEZA DE GUACIMO PULVERIZADO, COMO FLOCULANTE NATURAL EN EL PROCESO DE CLARIFICACION DE JUGO DE CAÑA DE AZUCAR MEDIANTE MODELACION MATEMATICA

EVALUATION OF THE PERFORMANCE AND USE OF POWDERED GUACIMO BARK AS A NATURAL FLOCCULANT IN THE SUGAR CANE JUICE CLARIFICATION PROCESS THROUGH MATHEMATICAL MODELING

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DA UTILIZAÇÃO DA CASCA DE GUACIMO EM PÓ COMO FLOCULANTE NATURAL NO PROCESSO DE CLARIFICAÇÃO DO SUCO DE CANA DE AÇÚCAR ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA

David Ernesto Ávila Cubillos

Instructor investigador SENA Centro de Desarrollo Agroempresarial, Regional Cundinamarca, grupo de investigación GITAE. Especialista en Gerencia de Recursos Naturales. Biología – Saneamiento Ambiental. Especialista tecnología Calidad de aguas. Maestrante en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. e-mail: davilac@sena.edu.co

Jhon Freddy Betancur

Docente Investigador Universidad de Manizales; Grupo de Investigaciones Biomédicas, Centro de Investigación en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible - CIMAD (Manizales, Caldas, Colombia), e-mail: jbetancur@umanizales.edu.co

Resumen

Se tomaron muestras de corteza de guácimo para su utilización como floculante natural, las muestras pasaron por un proceso de pulverizado del cual se obtiene la corteza pulverizada y un subproducto como residuos de fibras vegetales. Se realizaron pruebas de turbidez para jugo de caña de azúcar con el floculante natural imitando las condiciones en el proceso, adicionando el floculante entre los 60-70°C y llevando el jugo hasta ebullición

aproximadamente a los 94°C. Las pruebas de turbidez arrojaron que existe una correlación entre la concentración del floculante y el porcentaje en jugo del floculante, mediante un ANOVA; con las pruebas de turbidez se desarrolló un modelo de regresión polinómica multivariado POLY42 en Matlab R2017b, obteniendo los coeficientes del modelo y un r^2 de 0.9965. El modelo se utilizó para hallar un máximo local y así aplicarlo en el proceso, encontrándose así dos máximos locales como rango óptimo de aplicación, comprendido entre 2.0270 y 4.8182 para porcentaje en jugo; 13.2808 y 14.8271 para la concentración de floculante. Los máximos locales se evaluaron en proceso, obteniendo errores de alrededor del 1%, siendo el más alto de 1.02%.

Palabras clave: Floculantes naturales, guacimo, mucilago, caña de azúcar, panela, jugo de caña, Matlab, máximo local

Abstract

Guacimo bark samples were taken for its use as a natural flocculant, the samples went through a pulverization process from which the pulverized bark was obtained and a by-product as vegetable fiber residues. Turbidity tests were carried out for sugarcane juice with the natural flocculant imitating the process conditions, adding the flocculant between 60-70°C and bringing the juice to boiling at approximately 94°C. The turbidity tests showed that there is a correlation between the concentration of the flocculant and the percentage in juice of the flocculant through an ANOVA; With the turbidity tests, a multivariate polynomial regression model POLY42 was developed in Matlab R2017b, obtaining the coefficients of the model and an r^2 of 0.9965. The model was used to find a local maximum and thus apply it in the process, finding two local maximums as the optimum range of application, between 2.0270 and 4.8182 for percentage in juice; 13.2808 and 14.8271 for the flocculant concentration. The local maximums were evaluated in process, obtaining errors around 1%, the highest was 1.02%.

Keywords: Natural flocculants, guacimo, mucilage, sugar cane, panela, cane juice, Matlab, local maximum

Resumo

Amostras da casca de Guacimo foram retiradas para sua utilização como floculante natural, as amostras passaram por um processo de pulverização do qual foi obtida a casca pulverizada e um subproduto como resíduo de fibra vegetal. Testes de turbidez foram realizados para o caldo de cana-de-açúcar com o floculante natural imitando as condições do processo, adicionando o floculante entre 60-70°C e levando o caldo à fervura a aproximadamente 94°C. Os testes de turbidez mostraram que existe uma correlação entre a concentração do floculante e a porcentagem no suco do floculante por meio de uma ANOVA; Com os testes de turbidez, um modelo de regressão polinomial multivariado POLY42 foi desenvolvido no Matlab R2017b, obtendo os coeficientes do modelo e um r^2 de 0,9965. O modelo foi utilizado para encontrar um máximo local e assim aplicá-lo no processo, encontrando dois máximos locais como a faixa ótima de aplicação, entre 2,0270 e 4,8182 para porcentagem no suco; 13,2808 e 14,8271 para a concentração de floculante. Os máximos locais foram avaliados em processo, obtendo erros em torno de 1%, sendo o mais alto 1,02%.

Palavras-chave: Floculantes naturais, mucilagem, cana-de-açúcar, panela, caldo de cana, Matlab, máximo local.

Introducción

El guácimo (*Guazuma ulmifolia Lam.*) se trata de un árbol mediano de 2 a 15m de altura, este se produce a una altura entre 700 y 1200 msnm, es característico de sitios abiertos, laderas de montañas bajas, terrenos planos, márgenes de ríos y arroyos. Es propio de zonas bajas cálidas, desarrollándose en temperaturas entre 20 y 30°C; ha tenido diversos usos, entre ellos el uso artesanal de madera para artículos torneados y decorativos, uso en construcción durante la época colonial, saporífera, combustible en forma de madera y carbón entre otros (CONABIO C. n., 2020). En la actualidad uno de sus usos más extendidos es como floculante natural en el proceso de producción de panela.

Tradicionalmente en el proceso de clarificación de jugo de caña, se retira la corteza del árbol, esta se macera y revuelve en agua para luego ser adicionada al jugo, aunque este proceso es artesanal, y no se cuenta con una amplia bibliografía sobre su uso, la corteza de guácimo ya ha sido probada como floculante en algunos experimentos, entre ellas como floculante para aguas residuales, en donde se obtuvo una reducción de la turbidez (NTU) de entre 40 y 90% (Rodiño, Extractos coagulantes naturales de *Hylocereus triangularis*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* para el tratamiento de agua cruda del río Sinú, 2014), el uso de otras especies vegetales como *Malvaviscus arboreus*, *Heliocarpus popayanensis* e *Hylocereus undatusha* son reportadas como floculantes naturales por Ramírez Estrada (2011). Recientemente también se ha puesto a prueba el uso de esta corteza, pero de manera pulverizada, teniendo rendimientos de hasta el 85.83% de remoción de turbidez (Ávila Cubillos, 2018), a partir de análisis estadísticos preliminares para verificar su rendimiento en la reducción de turbidez.

En el proceso de producción de panela es necesario el uso de floculantes para la clarificación del jugo de caña, proceso que consiste en la eliminación de las cachazas, las cuales son sólidos en suspensión, en Colombia se maneja comúnmente 3 plantas cuya corteza tiene acción floculante, debido a la acción del mucilago obtenido en la maceración de sus cortezas, estas plantas son guácimo (*Guazuma ulmifolia Lam.*), balso (*Heliocarpus americanus L.*) y cadillo (*Triumfetta láppula L.*) (Osorio, 2007); el mucilago es una sustancia con alto peso molecular, siendo este superior a los 200.000g/mol (Echeverry, 2004). El proceso de clarificación puede realizarse con floculantes artificiales, sin embargo, el uso de estos supone unos costos más elevados y posibles riesgos a la salud, puesto que el más común de estos floculantes son las poliacrilamidas, compuesto catalogado como posible carcinógeno para los humanos (grupo 2A) por la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (IARC - International Agency for Research on Cancer) IARC, 2018.

Ante esta problemática se optó por usar floculantes naturales; la presente investigación se centra en una de las tres plantas mencionadas, el guácimo, cuya corteza macerada es utilizada en el proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar, en donde al usarse de forma pulverizada se puede extraer una mayor cantidad de mucilago y reducir las pérdidas que se tienen al extraer el mucilago por medio de la maceración.

La aplicación de una modelación matemática a partir del software Matlab permite determinar de forma más precisa el rango óptimo de concentración de corteza y su porcentaje en jugo necesario en el proceso de clarificación, al ofrecer una comparación de las cantidades a utilizar de floculante, con los datos obtenidos en proceso, se determina en forma precisa el manejo de matrices y la representación de datos, obteniendo gráficos de análisis que permiten validar los resultados de forma precisa.

Materiales y métodos

Área de estudio. Para la investigación todas las muestras de guácimo y de jugo de caña, fueron obtenidas de un trapiche panelero ubicado en Tobia Cundinamarca, manejado por el SENA Centro de Desarrollo Agroindustrial y empresarial, como continuación del proyecto de producción de Guacimo pulverizado desarrollado en el laboratorio del centro de Desarrollo Agroempresarial, SENA. Regional Cundinamarca, proyecto realizado con recursos SENNOVA.

Se seleccionaron árboles de Guacimo (Figura 1) proveniente de dos fincas de caña panelera en la región de Gualiva, municipios de Villeta y Nimaima, de cinco años de edad, se tomaron varas (tallos del árbol) para extracción de la corteza, cuyas longitudes se ubicaron entre 2.5 y 3 metros de longitud y un diámetro promedio en su sección más gruesa de cuatro cm, a estas se les retiró las ramas y follaje, dejando únicamente la vara de madera para el secado en condiciones ambientales protegidas de la humedad durante un periodo de quince días.

Figura 1. Árbol de Guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.)



Posterior al secado se procedió con la limpieza superficial de la corteza (Figura 2), de forma manual con un cepillo en seco, a fin de retirar algunas impurezas y objetos extraños que se adhieren a la misma; se cortaron trozos de 2cm y posteriormente se pulverizaron por medio de un molino analítico de cuchillas.

Figura 2. Extracción de la corteza de Guácimo.



De este proceso se obtuvieron fibras vegetales (sin mucilago) y corteza pulverizada (con mucilago); los cuales fueron separados mediante el uso de un tamiz que permitió diferenciar entre ambos subproductos (Figura 3).

Figura 3. Guacimo molido



Se prepararon soluciones de 10 y 20mg/mL de la corteza pulverizada en agua, la evaluación del proceso de floculación se realizó utilizando diferentes concentraciones (0.5,1,2,4,6 y 8%) del pulverizado en jugo de caña. La floculación se realizó simulando las condiciones del proceso, en el cual se sumerge la sustancia clarificante en el jugo de caña a temperaturas entre los 60 y 70°C (Osorio, 2007) en agitación constante; proceso realizado en un agitador magnético a 500RPM durante 10 minutos, posterior mente la mezcla se deja en ebullición a una temperatura de 94°C. A los jugos se les tomo la turbidez antes y después de la clarificación con el fin determinar el porcentaje de remoción de turbidez, estas medidas fueron realizadas mediante el uso de un turbidímetro HANNA, escala 0,00-10000 NTU.

Se realizó un Análisis de varianza ANOVA para confirmar la interacción entre la concentración de la solución floculante y el porcentaje en jugo, teniendo como variable respuesta el porcentaje de reducción de turbidez, por medio del software IBM SPSS STATISTICS 25.

Adicionalmente se buscó un punto de aplicación óptimo, por medio de una regresión polinómica multivariable, con la herramienta de Curve Fitting Toolbox 3.5.6 de Matlab R2017b, para tener un modelo que se ajustará a los datos obtenidos. Posteriormente se

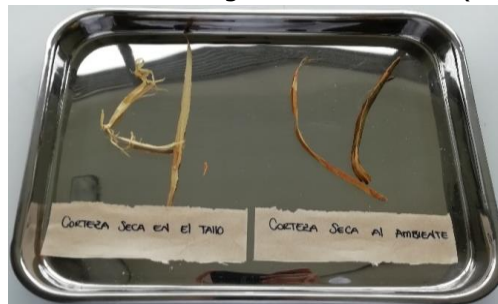
utilizó un algoritmo dentro del mismo programa para buscar un máximo local de la función obtenida, correspondiente al mayor porcentaje de remoción de turbidez, dentro de un rango restringido.

La concentración de la solución floculante y el porcentaje óptimo obtenidos fueron evaluados en trapiche para corroboración de la aplicación del modelo.

Resultados y Discusión.

Para determinar la cantidad de corteza de guácimo se tomaron 40 varas de tallo con una longitud de 100cm de largo y un diámetro promedio de 4cm. Los tallos fueron limpiados de sus impurezas superficiales tales como células muertas y hongos (Figura 2). Para pulverizar la corteza se encontró que es mejor secarla primero las varas, sin embargo, el secado de la corteza en tiempos prolongados promueve la oxidación de la misma (figura 4) y disminuye la efectividad del floculante, razón por la cual se optó por secarla al ambiente sin removerla del tallo para que este actuara como una barrera antioxidante.

Figura 4. Comparación corteza de guácimo oxidada (Iz) y no oxidada (Dr)



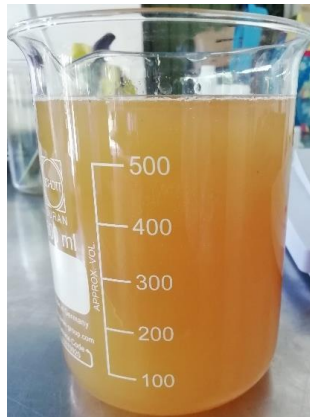
Los tallos seleccionados una vez secados en condiciones ambientales por un periodo de quince días fueron pesados a fin de determinar los porcentajes de corteza en relación al peso total, la relación obtenida tallo - corteza fue de 82,79% - 17,21% respectivamente. En promedio, cada vara permitió obtener una relación tallo - corteza de 162,44 g - 33,78 g respectivamente.

De la pulverización se obtuvo corteza de guácimo pulverizada y un subproducto correspondiente a fibras vegetales, dado que las fibras no contienen mucilago no son utilizadas en el proceso de floculación, además estas interfieren en la floculación puesto que no permiten una correcta homogenización de la solución en el jugo, debido a la formación de flocs que encapsulan la corteza pulverizada (figura 5 y 6).

Figura 5. Solución floculante con fibras vegetales



Figura 6. Solución floculante sin fibras vegetales



Para el diseño de experimentos se trabajó con las siguientes concentraciones de floculante y porcentaje en jugo, teniendo como variable respuesta el porcentaje de reducción de turbidez, donde se realizaron 3 repeticiones (tabla 1).

Tabla 1. Factores y Niveles ANOVA

Concentración mg/mL	Porcentaje					
10	0,5	1	2	4	6	
20	0,5	1	2	4	6	

El uso de floculante, bajo las mismas condiciones del proceso (60-70°C), fue consistente en cuanto a comportamiento, se alcanzó el punto de ebullición de las muestras a los 94°C, independientemente del porcentaje en jugo, por lo que la cantidad de floculante utilizada no es suficiente para cambiar perceptiblemente el punto de ebullición del jugo de caña. La formación de cachaza con el floculante, fue en largas tiras, en lugar de flocs individuales, esto posiblemente debido a que se utilizó una solución sin fibras vegetales (figura 7).

Figura 7. Formación de cachaza con floculante de guácimo pulverizado

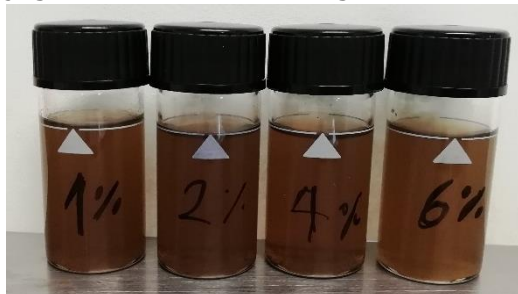


De las pruebas realizadas de turbidez, se observó un decrecimiento de la turbidez en las diferentes concentraciones del floculante, siendo el de mejor resultado obtenido el de 4% a 10mg/mL, presentando una reducción de la turbidez de 82.13%. También se observa que la concentración de 20mg/mL mostró resultados significativamente inferiores, con su resultado mas alto en 76.53%, estando 5.6 puntos porcentuales por debajo del mejor resultado a 10mg/mL. Estos resultados muestran que el uso de guacimo pulverizado como floculante natural en el proceso de clarificación de jugo de caña tiene buenos rendimientos frente a otros métodos de clarificación, como la sulfitación, donde se tiene un valor promedio de reducción de turbidez del 59% (Castillo, 2012).

Figura 8. Muestras de jugo clarificado con 10mg/mL a distintos porcentajes en jugo



Figura 9. Muestras de jugo clarificado con 20mg/mL a distintos porcentajes en jugo



Los resultados de las pruebas de turbidez obtenidos se presentan en la tabla 2:

Tabla 2. Resultados pruebas de turbidez a dos concentraciones del floculante natural.

concentración de 10mg/mL				Concentración 20mg/mL			
Replica	Porcentaje	NTU	Reducción	Replica	Porcentaje	NTU	Reducción
1	0,5	425	54,25	1	0,5	427	54,04
1	1	320	65,55	1	1	218	76,53
1	2	191	79,44	1	2	246	73,52
1	4	166	82,13	1	4	290	68,78
1	6	283	69,54	1	6	388	58,23
2	0,5	420	54,79	2	0,5	434	53,28
2	1	303	67,38	2	1	232	75,03
2	2	187	79,87	2	2	243	73,84
2	4	169	81,81	2	4	300	67,71
2	6	282	69,64	2	6	392	57,8
3	0,5	417	55,11	3	0,5	430	53,71
3	1	289	68,89	3	1	214	76,96
3	2	189	79,66	3	2	245	73,63
3	4	220	76,32	3	4	291	68,68
3	6	283	69,54	3	6	390	58,02

En contraste a los resultados obtenidos por Quezada, quien utilizo otras plantas mucilaginosas como el cadillo y alcanzo valores de 100 (Quezada, 2014), valores que están alrededor de los obtenidos en la presente investigación.

Tabla 3. Análisis de varianza (ANOVA)

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	732,514	2	366,257	148,738	,000 ^b
	Residuo	22,162	9	2,462		
	Total	754,676	11			

gl: grados de libertad, F: valores de F.

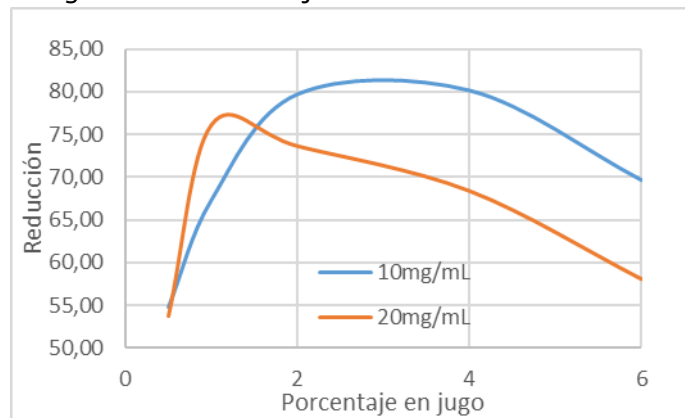
a. Variable dependiente: REDUCCION

b. Predictores: (Constante), CONCENTRACION, PORCENTAJE

En la tabla 3 (Anexo 1), se observa un nivel de significancia inferior a 0,05, por lo que existe interacción entre el porcentaje en jugo y la concentración del floculante.

El comportamiento de las concentraciones de trabajo se observa en la figura 10, a una concentración de 10mg/mL se evidencia un rango de aplicación óptimo y de fácil uso entre 2% y 4% en jugo, debido a su amplitud para trabajar con este rango, permite que el proceso panelero incurra en menos errores. Por otro lado, la concentración de 20mg/mL no cuenta con un rango amplio y dificulta su uso, a la vez que hace un uso inadecuado del floculante natural.

Figura 10. Porcentaje de reducción de turbidez



Dado a que el comportamiento presentado en la figura 10 no es lineal, se desarrolló un modelo polinómico multivariado en Matlab, tomando como valores promedio, los expresados en la tabla 4.

Tabla 4. Valores promedio para modelo

Porcentaje en jugo	Reducción	
	10mg/mL	20mg/mL
0,5	54,72	53,68
1	67,28	76,18
2	79,66	73,66
4	80,09	68,39
6	69,57	58,02

Con el objetivo de recrear el modelo mediante el uso de programa Matlab, se introdujo la siguiente información:

Ecuación 1. Matrices para modelo en Matlab

$X = [0.5, 1, 2, 4, 6, 0.5, 1, 2, 4, 6, 0.5, 1, 2, 4, 6];$

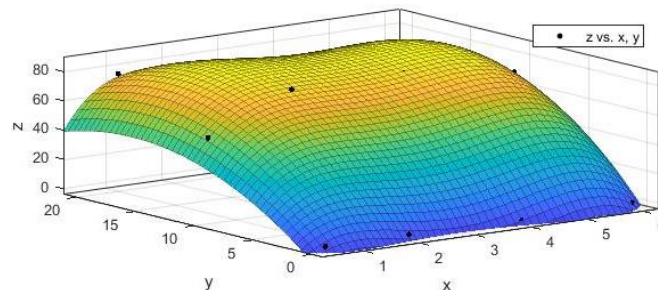
$y = [10, 10, 10, 10, 10, 20, 20, 20, 20, 20, 0, 0, 0, 0, 0];$

$z = [54.72, 67.28, 79.66, 80.09, 69.57, 53.68, 76.18, 73.66, 68.39, 58.02, 0, 0, 0, 0, 0];$

En donde la matriz X correspondió al porcentaje en jugo, la matriz Y correspondió a la concentración de floculante y la matriz Z correspondió al porcentaje de reducción de turbidez. Es de anotar que se fijó un punto 0 en las matrices que corresponde al no uso del floculante.

Con las matrices generadas se obtuvo un modelo polinómico multivariado POLY-42 usando la herramienta de curve fitting en Matlab. En la figura 11 se observa el grafico de superficie que corresponde al modelo obtenido, dentro de los rangos de 0 a 6 para el porcentaje en jugo y 0 a 20 para la concentración de floculante.

Figura 11. Superficie del modelo obtenido



Donde la ecuación y las constantes del modelo obtenido son:

Ecuación 2. Modelo de reducción de turbidez

$$f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3 + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p40*x^4 + p31*x^3*y + p22*x^2*y^2$$

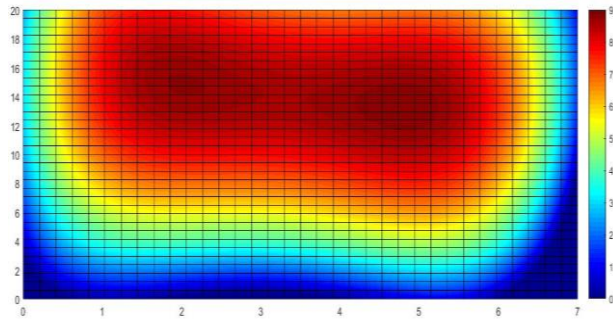
Coefficientes (con un intervalo de confianza de 95%):

p00 =	-15.28 (-58.52, 27.95)
p10 =	40.33 (-59.35, 140)
p01 =	6.126 (1.656, 10.6)
p20 =	-29.12 (-97.58, 39.34)
p11 =	4.63 (0.09385, 9.167)
p02 =	-0.2043 (-0.4053, -0.00335)
p30 =	7.4 (-9.803, 24.6)
p21 =	-0.9565 (-2.158, 0.2456)
p12 =	-0.133 (-0.305, 0.03906)
p40 =	-0.5995 (-1.995, 0.7956)
p31 =	0.05321 (-0.05655, 0.163)
p22 =	0.01665 (-0.00931, 0.0426)

$$R^2 = 0.9965$$

Como se buscaba obtener un punto óptimo de aplicación del floculante, se procedió a buscar un óptimo local de la función, para ello se observó la función como un mapa de colores (figura 12) y así obtener un valor aproximado, ubicando este alrededor de X=2 y Y=14.

figura 12. Mapa de color de la función de reducción de turbidez



Para obtener el máximo local cercano a $(2,15)$, se define la función obtenida en Matlab, de la siguiente forma; utilizando $f(x,y)$ y las constantes de la ecuación 2.

Ecuación 3. Función de turbidez en Matlab

```
function z = fturb(v)
    x = v(1);
    y = v(2);
```

Para obtener el máximo local, se utiliza la función `fmincon`, esta función utiliza por defecto un algoritmo de punto interior, algoritmo muy comúnmente utilizado en programación no lineal (Mathworks, 2018). `fmincon` nos permitio obtener el mínimo local, dentro de un rango determinado, como se busca el máximo, la función se tiene que invertir.

Ecuación 4. Función invertida de turbidez en Matlab

```
fun = @(v) -fturb(v);
```

Para utilizar la función `fmincon`, se debio especificar ciertas restricciones, los valores para estas restricciones se presentan a continuación:

Ecuación 5. Restricciones para función `fmincon`

```
lb = [0,0];
ub = [8,20];
A = [];
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
x0 = [2,14];
```

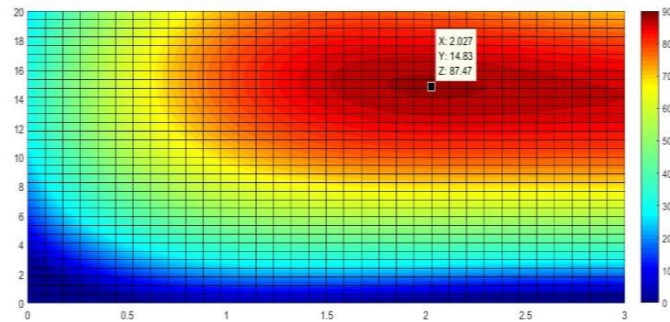
En donde `lb` es el límite inferior, definido como una matriz de los valores iniciales x,y ; `ub` es el límite superior, con los valores finales x,y ; `A`, `b`, `Aeq` y `beq` se usan para definir desigualdades por lo que se dejan vacíos. Finalmente, `x0` es el punto inicial del algoritmo de la función.

Se define una matriz P, para tomar los datos de fmincon, como [x,y], estos datos se rescatan y evalúan en la función fturb, para obtener el valor de Z, correspondiente al porcentaje de reducción de turbidez.

Ecuación 6. función fmincon en Matlab
P = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)
x = P(1);
y = P(2);
fturb(P)

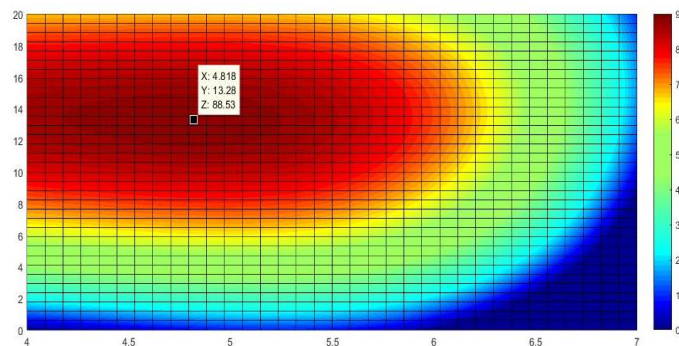
El proceso en Matlab arrojó como resultado un máximo local 1 (figura 13) ubicado en (x,y,z) (2.0270, 14.8271, 87.4737).

Figura 13. Máximo local 1 función de reducción de turbiedad



El proceso se repitió para otro máximo local, con $x_0 = [4.8, 13]$, arrojando un máximo local 2 en las coordenadas (x, y, z) (4.8182, 13.2808, 88.5329), por lo que se establece como rango óptimo de aplicación el comprendido entre 2.0270 y 4.8182 para porcentaje en jugo; 13.2808 y 14.8271 para la concentración de floculante (figura 14).

Figura 14. Máximo local 2 función de reducción de turbiedad



Se observa un mayor porcentaje de reducción de turbiedad en el segundo máximo local, sin embargo, la diferencia fue de 1.0592%.

Los resultados teóricos para máximos locales se contrastaron con los obtenidos en proceso bajo las condiciones requeridas por el modelo y se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados prueba en proceso del modelo

Prueba en proceso	Máximo local 1	Error	Máximo local 2	Error
1	89,57%	1,02%	87,46%	0,99%
2	86,91%	0,99%	86,01%	0,97%
3	87,77%	1,00%	87,31%	0,99%

Los resultados muestran que el modelo es adecuado, donde se evidencian errores al rededor del 1%, entre los dos máximos locales evaluados, el máximo local 2 tiene menor error, si se observa la figura 14, este comportamiento es lógico puesto tiene una mayor área de valores cercanos al máximo local, sin embargo, debido a que el máximo local 1 requiere menos recursos en términos de la cantidad necesaria de agua para preparar la solución floculante, se selecciona el máximo local 1 como la mejor opción.

Conclusiones

El árbol de Guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) Ofrece un alto potencial para incentivar su cultivo en asociación con caña panelera, dado que puede ser usado como plantación sostenible desde el punto de vista agronómico, permitiendo la obtención de mucilago natural que puede ser usado como floculante en el proceso panelero.

El incentivo, producción y uso correcto de la corteza de Guacimo pulverizado en el proceso panelero como floculante natural permite evitar el uso de productos sintetizados como las poliacrilamidas, las cuales dejan como residuo el monómero de acrilamida y este está catalogado como posible carcinógeno para los humanos (grupo 2A) por la International Agency for Research on Cancer (IARC) ((IARC), 2018).

El uso de la corteza de guácimo pulverizada, dio los mejores resultados a una concentración de 10mg/mL en solución al 4%, a esta concentración se observo una reducción de la turbidez de 82.13%, siendo esta la mejor relación entre el porcentaje de concentración y la menor cantidad de aplicación. Comparando estos resultados con otros usos de la corteza de guácimo como floculante en algunas situaciones, entre ellas su uso en tratamiento de aguas residuales, en donde se obtuvo una reducción de la turbidez NTU de entre 40 y 90% (Rodiño, 2014), recientemente también se ha puesto a prueba el uso de esta corteza, pero de manera pulverizada, teniendo rendimientos de hasta el 85.83% de remoción de turbidez en jugos de caña de azucar (Ávila Cubillos, 2018).

La aplicación del modelo matemático bajo el ambiente de software Matlab permitió la determinación efectiva de un óptimo a utilizar en la floculación en el proceso de producción de panela. Además, al encontrarse con 2 máximos locales, se recomienda utilizar el máximo

local 1, puesto que este es el que menor consumo de recursos tendría, tomando el punto 2.0270 para porcentaje en jugo y 13.2808 para la concentración de floculante.

De acuerdo a las gráficas obtenidas del modelo y conforme a los resultados obtenidos se puede apreciar que el mejor rendimiento se va a encontrar en el punto 2.0270 en función de la reducción de turbiedad, para porcentaje en jugo y 13.2808, esto considerando que, aunque el máximo local 2 de 4.8182 para porcentaje en jugo y 14.8271 para la concentración de floculante, arroja valores 1.0592% más elevados, la diferencia no es significativa para compensar el gasto en recursos, en cuanto a un mayor uso del floculante.

El modelo de reducción de turbidez, presenta un buen ajuste, ya que cuenta con un R^2 de 0.9965, lo que nos permite una gran confianza, reflejada en los resultados obtenidos en el proceso, donde el error más significativo fue de 1.02%. Se recomienda aplicar el modelo a futuro a concentraciones distintas del máximo local para corroborar la validez del mismo, fuera del rango óptimo, y para refinar el modelo con mas datos experimentales.

Recomendaciones.

Las fibras vegetales obtenidas como subproducto de la pulverización de la corteza de guácimo pueden interactuar con el mucilago de la corteza y disminuir su efectividad, se recomienda un correcto tamizado al momento de separar las fibras de la corteza pulverizada. Adicionalmente se recomienda ahondar en diferentes métodos de separación de sólidos y de los tamaños de partícula involucrados; se debe determinar en futuras investigaciones la posibilidad de mejorar la interacción de este al aplicarse en el medio acuoso tamaños de partículas menores.

Debido a la naturaleza de la investigación, solo se utilizaron materiales con los que cuenta directamente el área de influencia donde se encuentra el CDAE (Centro de Desarrollo Agroindustrial y empresarial), lo que significa que los jugos utilizados siempre provinieron de un mismo tipo de caña; Se podría comparar el modelo bajo condiciones diferentes a la planta, para pH, tipo de caña, °Brix, entre otros.

Dados los resultados obtenidos y a la información limitada de rendimientos de otros floculantes naturales, específicamente a los aplicados en el proceso panelero, se recomienda realizar pruebas comparativas para determinar eficiencias de floculación y disminución de turbidez, al igual que la comparación con floculantes sintéticos.

Se recomienda para futuras investigaciones registrar el valor inicial y final de NTU, y en lo posible el porcentaje de reducción, ya que si bien el jugo de caña utilizado para este artículo tenía valores constantes alrededor de 1000 NTU, estos pueden variar de manera significativa entre distintos cultivos de caña y registrar estos valores podría facilitar la comparación de datos entre estudios a futuro.

Agradecimientos

Al director de trabajo de grado Jhon Fredy Betancur, por su disposición y orientación metodológica en el desarrollo del proyecto. Al CIMAD de la Universidad de Manizales, por avalar este proyecto y brindar su apoyo a partir de las líneas de investigación de la Universidad de Manizales.

Por parte del SENA Centro de Desarrollo Agroempresarial, y centro de Desarrollo Agroindustrial y empresarial, Regional Cundinamarca, y los compañeros del grupo de investigación Gitae, por los aportes realizados en el avance del proyecto Guacimo, así como a la Dra Leonora Barragan Bedoya, Directora (E) SENA regional Cundinamarca, a la investigadora Química, Maria Consuelo Quiroga Maldonado, así como al líder SENNOVA del CDA Orlando Castrillon y especialmente al Ingeniero Químico Daniel Felipe Avila Florez, por su aporte en este proceso investigativo.

Literatura citada

- (IARC), I. A. (15 de 10 de 2018). *Acrylamide - IARC Monographs*. Obtenido de <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono60-16.pdf>
- Ávila Cubillos, D. E. et al (2018). Producción de guácimo (*Guazuma ulmifolia*) deshidratado a partir de especies nativas para suplir la necesidad de extractos vegetales en el proceso panelero. *Revista Tecnología Y Productividad*, 4(4), 183-194.
- Castillo, D. (2012). *Análisis y efectos de los procesos de sulfitación de jugo y meladura sobre el color del azúcar producida, para el proceso de disolución en una refinera*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- CONABIO, C. N. (2020). *Guazuma ulmifolia*. Obtenido de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/66-sterc1m.pdf
- CONABIO, C. N. (s.f.). <http://www.conabio.gob.mx>. Recuperado el 1 de 11 de 2018, de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/66-sterc1m.pdf
- Echeverry, P. (2004). *Mucilago pulverizado a partir de cascara de la cascara de cacao, una alternativa en la clarificación de jugos en la industria panelera*. Manizales: Universidad Nacional.
- Mathworks. (2018). *mathworks.com*. Recuperado el 25 de 12 de 2018, de [mathworks.com: https://la.mathworks.com/help/optim/ug/fincon.html](https://la.mathworks.com/help/optim/ug/fincon.html)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (17 de Marzo de 2015). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 01 de Marzo de 2016, de www.minambiente.gov.co/images/.../app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la calidad del agua potable primer apéndice a la tercera edición. *Recomendaciones Organización Mundial de la Salud. Primer apéndice a la tercera edición. Volumen 1*, 270.
- Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM en la producción de caña y panela. Colombia: CORPOICA, MANA, FAO.
- Quezada, W. (2014). Clarificación del jugo de caña mediante el empleo de plantas mucilaginosas. *Sobre los Derivados de la caña de Azúcar*, 41-48.
- Ramírez Estrada, L. M., Suárez Córdoba, J. D., & Ramírez Quirama, J. F. (2011). Evaluación de las propiedades floculantes de

Malvaviscus arboreus, *Heliocarpus popayanensis* e *Hylocereus undatus* para clarificación de aguas. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 2(2), 33-42. <https://doi.org/10.22490/21456453.924>

Rodiño, J. (2014). Extractos coagulantes naturales de *Hylocereus triangularis*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* para el tratamiento de agua cruda del río Sinú. Colombia: Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental.

Rodiño, J. (2014). Extractos coagulantes naturales de *Hylocereus triangularis*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* para el tratamiento de agua cruda del río Sinú. Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental.

Anexo 1

Resultados ANOVA

```
REGRESSION
/DESCRIPTIVES MEAN STDDEV CORR SIG N
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS BCOV R ANOVA COLLIN TOL
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT REDUCCION
/METHOD=ENTER PORCENTAJE CONCENTRACION
/PARTIALPLOT ALL.
```

Regresión

Estadísticos descriptivos

	Media	Desv. Desviación	N
REDUCCION	69,0169	8,28293	12
PORCENTAJE	5,0000	1,04447	12
CONCENTRACION	15,0000	5,22233	12

Correlaciones

		REDUCCION	PORCENTAJE	CONCENTRACION
Correlación de Pearson	REDUCCION	1,000	-,658	-,733
	PORCENTAJE	-,658	1,000	,000
	CONCENTRACION	-,733	,000	1,000
Sig. (unilateral)	REDUCCION	.	,010	,003
	PORCENTAJE	,010	.	,500
	CONCENTRACION	,003	,500	.
N	REDUCCION	12	12	12
	PORCENTAJE	12	12	12
	CONCENTRACION	12	12	12

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,985 ^a	,971	,964	1,56922

a. Predictores: (Constante), CONCENTRACION, PORCENTAJE

b. Variable dependiente: REDUCCION

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	732,514	2	366,257	148,738	,000 ^b
	Residuo	22,162	9	2,462		
	Total	754,676	11			

a. Variable dependiente: REDUCCION

b. Predictores: (Constante), CONCENTRACION, PORCENTAJE

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		Sig.
		B	Desv. Error	Beta	t	
1	(Constante)	112,558	2,680		42,000	,000
	PORCENTAJE	-5,221	,453	-,658	-11,525	,000
	CONCENTRACION	-1,163	,091	-,733	-12,832	,000

Coefficientes^a

Modelo		Estadísticas de colinealidad	
		Tolerancia	VIF
1	(Constante)		
	PORCENTAJE	1,000	1,000
	CONCENTRACION	1,000	1,000

a. Variable dependiente: REDUCCION

Correlaciones de coeficiente^a

Modelo		CONCENTRACION	PORCENTAJE
1	Correlaciones	CONCENTRACION	,000
		PORCENTAJE	1,000
	Covarianzas	CONCENTRACION	,008
		PORCENTAJE	,205

a. Variable dependiente: REDUCCION

Diagnósticos de colinealidad^a

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza		
				(Constante)	PORCENTAJE	CONCENTRACION
1	1	2,907	1,000	,00	,00	,01
	2	,076	6,180	,03	,14	,85
	3	,017	12,930	,97	,85	,14

a. Variable dependiente: REDUCCION

Estadísticas de residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	N
Valor pronosticado	57,9835	80,0502	69,0169	8,16041	12
Residuo	-3,73161	2,08109	,00000	1,41941	12
Desv. Valor pronosticado	-1,352	1,352	,000	1,000	12
Desv. Residuo	-2,378	1,326	,000	,905	12

a. Variable dependiente: REDUCCION