

Recibido 5 de noviembre de 2024
Aceptado 30 de noviembre de 2024

www.unipaz.edu.co

Dinámica de la maduración de coágulos de caucho expuestos a condiciones ambientales reales

Dynamics of maturation of rubber cups exposed to real environmental conditions

Juan Jaramillo^a, Nadim Cruz^a, Leidy Carreño^a, Karen Amorocho^a y Rafael Calderón^a

Resumen: El caucho se obtiene del *Hevea Brasiliensis* y su valor comercial depende de su contenido de materia seca. Durante la maduración el caucho pierde agua y se producen reacciones que mejoran su calidad. Pero, el estudio de la maduración se ha realizado bajo condiciones controladas de laboratorio, por lo que no hay claridad de la dinámica del secado de coágulos expuestos a condiciones ambientales reales. Esta investigación evalúa la dinámica del secado a través del comportamiento de la concentración de sólidos y de agua en función del tiempo de maduración bajo condiciones ambientales reales. Para esto, se tomaron muestras en un cultivo de caucho, clon FX3864, ubicado en el instituto Universitario de la Paz. La materia seca y el contenido de agua se determinaron por termogravimetría. Se analizaron muestras con tiempos de maduración de 0, 10, 15, 20 y 30 días. El contenido de agua expresó un comportamiento de tipo logístico con $R^2=0.98$. Se evidenció que tiempos superiores a 20 días favorecen DRC superiores al 75%. Se registraron coágulos con radio medio de 15 ± 5 cm y una masa seca de 0.5 ± 0.1 kg. La máxima velocidad de transferencia de agua ocurrió a los 12 días de maduración con un flux de 0.133 kg agua/m²d. Existe un remanente de agua cercano al 20% para secado bajo techo. De esto se infiere que, la venta de coágulos con tiempos de maduración menores a 13 días afecta el retorno de la inversión del productor, ya que contendría gran cantidad de agua, la cual no tiene valor comercial. Asimismo, tiempos de maduración mayores a 20 días no afectan el contenido de caucho seco, ya que la velocidad de secado disminuye considerablemente.

Palabras claves: velocidad de secado, función logística, contenido de caucho seco drc, hevea brasiliensis.

Abstract: Rubber is obtained from *Hevea Brasiliensis* and its commercial value depends on its dry matter content. During maturation, rubber loses water and reactions occur that improve its quality. However, the study of maturation has been carried out under controlled laboratory conditions, so there is no clarity on the dynamics of drying of clots exposed to real environmental conditions. This research evaluates the dynamics of drying through the behavior of solids and water concentration as a function of maturation time under real environmental conditions. For this, samples were taken from a rubber crop, clone FX3864, located at the La Paz University Institute. Dry matter and water content were determined by thermogravimetry. Samples were analyzed with maturation times of 0, 10, 15, 20 and 30 days. The water content expressed a logistic type behavior with $R^2=0.98$. It was shown that times longer than 20 days favor DRCs higher than 75%. Clots with a mean radius of 15 ± 5 cm and a dry mass of 0.5 ± 0.1 kg were recorded. The maximum water transfer rate occurred at 12 days of maturation with a flux of 0.133 kg water/m²d. There is a water remainder of close to 20% for indoor drying. From this it can be inferred that the sale of clots with maturation times of less than 13 days affects the producer's return on investment, since they would contain a large amount of water, which has no commercial value. Likewise, maturation times of more than 20 days do not affect the dry rubber content, since the drying speed decreases considerably.

Key words: drying rate, logistic function, dry rubber content drc, hevea brasiliensis.

INTRODUCCIÓN

El caucho natural es un material constituido principalmente por un polímero del isopreno (cis-1,4-poliisopreno), un elastómero con propiedades mecánicas que han resultado útiles para el desarrollo humano (Vaysse et al., 2012). Históricamente, los pueblos maya y azteca de América Central han utilizado el caucho para la elaboración de herramientas, calzado e

instrumentos ceremoniales, existiendo registros en el orden de los 2.000 años de antigüedad (Stokstad, 1999). Los mesoamericanos utilizaban el caucho por sus propiedades de dureza, resistencia y elasticidad, en especial cuando se mezclaba con el extracto de la *Ipomoea alba*, con lo que se conseguía un resultado menos quebradizo y más flexible (Hosler et al., 1999). Para darle respuesta a la creciente demanda de caucho se han instaurado plantaciones en todo el mundo, si bien el género *Hevea* es originario de Sudamérica, es cultivado principalmente en Asia y África (Lieberei, 2007).

^a Grupo de investigación en cultivos tropicales INYUBA

† juan.jaramillo@unipaz.edu.co

En el año 2016, Guatemala se convirtió en el mayor productor de caucho en América, seguido por Brasil y México. República Dominicana registró un aumento de 431% en los últimos diez años. Así mismo, la producción en México se impulsó un 158%, en Bolivia 80% y en Guatemala un 72%. En ese mismo año, la producción de caucho en Colombia fue de 22,857 toneladas, lo que representó un aumento del 513% en la última década. En el año 2011 la producción de caucho en Colombia registró un incremento del 56% respecto al año anterior (Ossa Mayam, 2018).

Actualmente, existen cerca de 73.000 ha sembradas de caucho en el país, por lo cual el sector cauchero es uno de los renglones con mejores ventajas competitivas en el mercado, dado que el caucho natural es uno de los productos de mayor oferta y demanda a nivel internacional.

El departamento del Meta es el principal productor de caucho natural, representado principalmente por medianos y grandes productores. Departamentos como Santander, Antioquia, Caquetá, Caldas y Guaviare se proyectan como zonas con gran potencial mediante agrupaciones de pequeños productores (Ministerio de Agricultura de Colombia, 2018).

La mayoría del caucho natural se obtiene del árbol *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. mediante la escarificación de su corteza en un proceso conocido como rayado. Durante el rayado se extrae una suspensión en fase líquida llamada látex, que según su destino se conserva o es coagulada; ambas presentaciones son usadas como materias primas en la industria médica, mecánica y automotriz, entre otras (Rempel y Wang, 2017).

Para el caucho natural, el contenido de materia seca y su complemento, el contenido de agua, afectan considerablemente su valor comercial (Cáceres-Sandoval y Gauthier-Maradei, 2013).

Una medida de la calidad del caucho y la salud del árbol es la proporción de materia seca en el coágulo. El estudio del contenido de materia seca en el caucho se ha realizado mediante termogravimetría, donde una muestra húmeda se somete a un calentamiento controlado.

Para medir esta propiedad la norma ASTM D1076 ha estandarizado el procedimiento del contenido de caucho seco (*Dry Rubber Content, DRC*) en el cual una muestra se somete a calentamiento hasta remover todo el material volátil presente (American Society for Testing and Materials, 2020).

Durante la postcosecha del coágulo ocurre un fenómeno llamado maduración, en el cual el caucho pierde agua y se producen reacciones que mejoran su calidad. En estas reacciones los grupos funcionales carboxilo e hidroxilo se condensan expulsando agua como producto y creando puentes entre las cadenas de isopreno, lo que le confiere al caucho mayor resistencia frente a esfuerzos térmicos y mecánicos. Esta resistencia se ve afectada por la retención de humedad en el coágulo (Seng-Neon, 1996).

Se ha visto que, el contenido de caucho seco (DRC) se ve influenciado positivamente por la correcta aplicación de buenas prácticas agrícolas y el uso de estimulantes en el panel de sangría (Cruz-Tang et al., 2023).

Además, se sabe que, el manejo postcosecha influencia fuertemente la velocidad de secado del coágulo. Sin embargo, la dinámica del secado no está bien estudiada en escenarios reales. El seguimiento de la maduración se ha realizado bajo condiciones controladas de laboratorio (Noinart et al., 2022), por lo que no hay claridad del comportamiento de coágulos expuestos a condiciones ambientales reales típicas del Magdalena Medio.

La presente investigación evalúa dicha dinámica a través del comportamiento de la concentración de

sólidos y de agua en función del tiempo de maduración para coágulos expuestos a condiciones ambientales reales. Para esto se tomaron muestras de un cultivo del clon FX3864 establecido en los terrenos del Instituto Universitario de la Paz y se analizó el contenido de caucho seco y la velocidad de secado. Los resultados de este estudio ayudarán a investigadores y productores a tomar decisiones prácticas en campo.

MÉTODOS

La materia prima se obtuvo del cultivo de *Hevea Brasiliensis* (*Willd. ex A. Juss. Müll. Arg.*) del Centro de Investigación Santa Lucía, ubicado en el Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ). Este cultivo cuenta con 2.100 árboles administrados bajo las buenas prácticas agrícolas.

Se tomaron muestras con tiempos de maduración de 0, 10, 15, 20 y 30 días, posteriormente se llevaron a la zona de almacenamiento y secado bajo techo.

La materia seca se determinó por termogravimetría a través del contenido de caucho seco (DRC) y el contenido de agua (X), según como se muestra en las ecuaciones 1 y 2.

$$DRC \equiv \frac{m_{cs}}{m_{cs} + m_{H_2O}} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

$$X = a \frac{1 + me^{-kt}}{1 + ne^{-kt}} \equiv \frac{m_{H_2O}}{m_{cs}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$N = -\frac{S_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- m_{cs} : masa de caucho seco $[kg_{cs}]$
- m_{H_2O} : masa de agua $[kg_{H_2O}]$
- S_s : Sólido seco $[kg_{cs} / coagulo]$
- A : Área superficial $[m^2]$
- N : Velocidad de secado $[kg_{H_2O}/m^2d]$
- a, m, n, k : Constantes logísticas

El contenido de caucho seco se determinó por coagulación, molienda y secado según lo descrito por la norma (ASTM, 2020). Además, se tomaron valores de volumen y masa de coágulos.

Para modelizar el secado, se ajustó una función logística al comportamiento del contenido de agua (X) en función del tiempo de maduración y se determinó la velocidad de secado (N) a partir de las ecuaciones 2 y 3, expuestas por Treybal (1997).

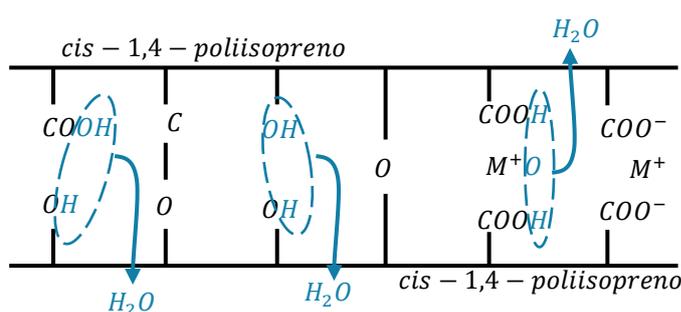
El ajuste se realizó a través del método del gradiente no lineal. Finalmente, se estudió la maduración del coágulo mediante la descripción matemática de la dinámica de su secado expuesto a condiciones ambientales reales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde la teoría del secado de caucho, se sabe que, el agua expulsada por el coágulo provino de la humedad libre pero también de las reacciones entre los grupos carboxilo, hidroxilo y átomos metálicos, como se representa en la figura 1.

Figura 1.

Representación de la química del secado.



Experimentalmente se registraron coágulos con radio de 15 ± 5 cm y una masa seca de 0.5 ± 0.1 kg, lo que resulta en un área superficial de 0.212 m^2 ; los valores promedio se reportan para $n=10$.

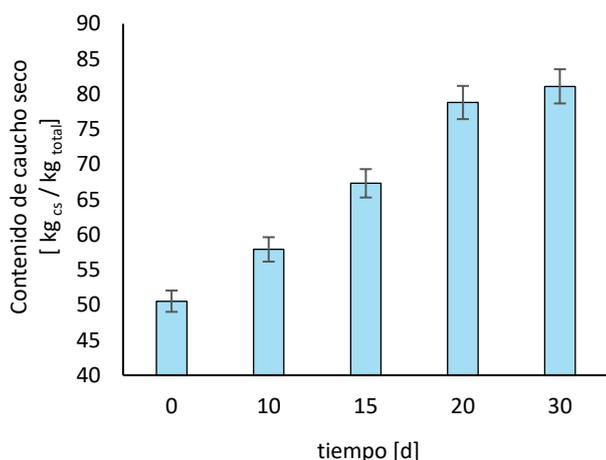
Dado que la velocidad de secado (N) depende del comportamiento de la derivada del contenido de agua, se determinó la función que describe el flujo de agua desde el coágulo al ambiente, como se muestra en la ecuación 4.

$$N = -\frac{S_s}{A} ak(n - m) \frac{e^{-kt}}{(1 + ne^{-kt})^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Se determinaron los contenidos de caucho seco DRC encontrándose en el rango de 50 a 80%, como se muestra en la figura 2.

Figura 2.

Contenido de caucho seco DRC en función del tiempo de maduración



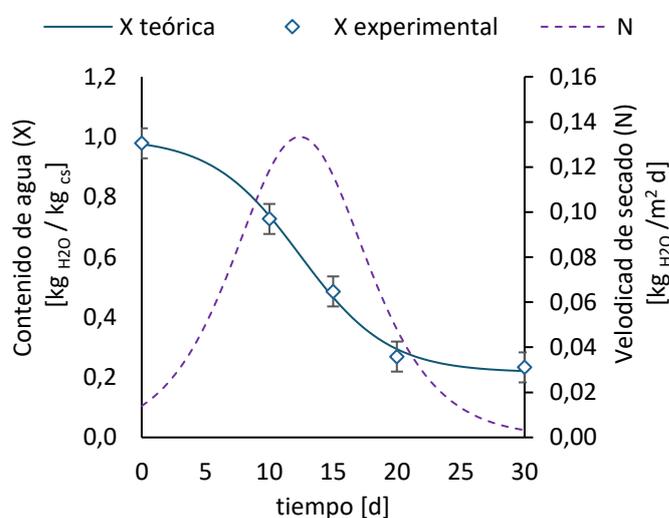
Se evidenció un aumento en el contenido de materia seca proporcional al tiempo de maduración: el DRC para el día cero fue el mínimo con 50.5%, en oposición, el DRC para el día 30 fue el máximo con 81.1%. Estos resultados son superiores a los reportados por Cáceres-Sandoval, & Gauthier-Maradei (2013), quienes encontraron DRC en el orden de 45%. El máximo DRC alcanzado en este estudio se asemeja a los resultados obtenidos por Noinart et al. (2022), quienes determinaron el rango entre 80-90% para coágulos maduros.

Es de resaltar que, tiempos iguales o superiores a 20 días favorecen DRC superiores al 75%. De lo anterior se infiere que la velocidad de secado tiene su máximo en los primeros 20 días.

Una manera de observar lo anterior es a través del contenido de agua en coágulo y de su tasa de transferencia al ambiente, es decir, mediante la velocidad a la que el coágulo entrega agua al aire ambiental, lo cual se puede observar en la figura 3.

Figura 3.

Contenido de agua y velocidad de secado.



En la figura 3 se presentan los datos de contenido de agua teórica y experimental, así como la velocidad de secado. Se ajustaron valores para las constantes a, m, n y k de 0.2161, 167.6, 36.32 y 0.2897, respectivamente.

Se comprobó que, es posible realizar el ajuste del modelo logístico para el contenido de agua, a través del método del gradiente no lineal con gran precisión ($R^2=0.98$) y significancia estadística (Valor- $P<0.05$), alcanzando un error cuadrático medio (RMSE) de $0.02 \text{ kg}_{H_2O} / \text{kg}_{cs}$.

Estas reacciones unen las cadenas de isopreno formando una malla o entramado, lo que favorece la resistencia frente al esfuerzo térmico y mecánico. Respecto del secado, la máxima velocidad de transferencia de agua ocurrió a los 12 días de maduración con un flux de $0.133 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{d}$.

Se comprobó que, a los 20 días de maduración el coágulo perdió el 72% del agua inicial. Un análisis al modelo reveló que existe un remanente de agua cercano al 20% para secado bajo techo.

CONCLUSIONES

El agua expulsada por el coágulo proviene de la humedad libre y de las reacciones entre los grupos carboxilo, hidroxilo y átomos metálicos, que unen las cadenas de isopreno formando una malla o entramado, lo que favorece la resistencia frente al esfuerzo térmico y mecánico.

Se determinó el contenido de caucho seco DRC en función del tiempo de maduración, encontrándose que tiempos superiores a 20 días favorecen DRC superiores al 75%. Se registraron coágulos con radio medio de $15 \pm 5 \text{ cm}$ y una masa seca de $0.5 \pm 0.1 \text{ kg}$, los valores promedio se tomaron para $n=10$, el área superficial del coágulo se estimó en 0.212 m^2 .

Por su parte, el contenido de agua expresó un comportamiento de tipo logístico, se ajustaron valores para a , m , n y k de 0.2161, 167.6, 36.32 y 0.2897, respectivamente. El método del gradiente no lineal permitió un ajuste con $\text{RMSE}=0.02 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{CS}}$.

La máxima velocidad de transferencia de agua ocurrió a los 13 días de maduración con un flux de $0.133 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{d}$. A los 20 días de maduración el coágulo perdió el 72% del agua. Un análisis al

modelo reveló que existe un remanente de agua cercano al 20% para secado bajo techo.

De lo anterior se infiere que, la venta de coágulos con tiempos de maduración menores a 13 días afecta el retorno de la inversión del productor, ya que se transportaría y comercialaría con gran cantidad de agua, la cual no tiene valor comercial en la agroindustria del caucho.

Asimismo, retener en bodega coágulos con tiempos de maduración mayores a 20 días no afectará sensiblemente su contenido de caucho seco, ya que la velocidad de secado disminuye considerablemente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Universitario de la Paz, a la Escuela de Ingeniería Agronómica, al Semillero de Investigación SiLátex y al grupo de Investigación en Cultivos Tropicales (INYUBA). De igual forma, se agradece a los cursos de química orgánica del semestre 2024 - B. Esta investigación se desarrolló en el marco de la convocatoria interna de la Escuela de Ingeniería Agronómica titulada: "Evaluación de dos parámetros del látex en el clon FX 3864 de caucho natural *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg, ubicado en el Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ)".

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM D1076, Standard specification for rubber concentrate, ammonia preserved, creamed and centrifuged Natural Latex. Philadelphia, United States of America.
- Cáceres-Sandoval, A. P., & Gauthier-Maradei, P. (2013). Análisis termogravimétrico como un nuevo método para la determinación de contenido de sólidos totales (CST) y caucho seco (CCS) del látex natural. *Revista ION*, 25(2).

- Recuperado de: <https://www.fiducentral.com/images/files/informeseconomicos/>
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/3040>
- Cruz-Tang, N., Suárez, G., Rico, F., Palencia-Blanco, C., & Paz, H. (2023). Modelo productivo del cultivo de caucho natural *Hevea Brasiliensis* (Willd. Ex A. Juss.) Müll. Arg, para el fortalecimiento del sector cauchero en el Magdalena medio. Poster. XVII Encuentro Nacional y X Encuentro Internacional de Investigadores de las Ciencias Pecuarias. Evento llevado a cabo por la Universidad de Antioquia en Medellín, Colombia.
- Hosler, D., Burkett, S. L., & Tarkanian, M. J. (1999). Prehistoric polymers: rubber processing in ancient mesoamerica. *Science*, 284(5422), 1988-1991. DOI: 10.1126/science.284.5422.1988
- Lieberei, R. (2007). South American leaf blight of the rubber tree (*Hevea* spp.): new steps in plant domestication using physiological features and molecular markers. *Annals of botany*, 100(6), 1125-1142.
<https://doi.org/10.1093/AOB/MCM133>
- Ministerio de Agricultura de Colombia. (2018). CADENA DE CAUCHO NATURAL, Indicadores e Instrumentos. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Caucho/Documentos/>
- Noinart, J., Bonfils, F., Musigamart, N., Sainte-Beuve, J., Flori, A., Liengprayoon, S., Rattanaporn, K., Granet, F. & Vaysse, L. (2022). Post-harvest maturation of *Hevea brasiliensis* latex coagula: Ranking of the key drivers of the mesostructure and physical properties of natural rubber. *Journal of Rubber Research*, 25(1), 5-18.
<https://doi.org/10.1007/s42464-022-00146-7>
- Ossa Maya, N. (2018). Informe de mercado mundial de caucho y cacao. Fiduciaria central. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://www.fiducentral.com/images/files/informeseconomicos/>
- Rempel, G. L., & Wang, H. (2017). Nitrile Rubber Latex Blends: Preparation, Characterization and Applications. In: Markovic, G., P. M., V. (eds) *Rubber Nano Blends*. Springer Series on Polymer and Composite Materials. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48720-5_3
- Seng-Neon, G. (1996). Storage Hardening of Natural Rubber, *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 33:12, 1939-1948, DOI: 10.1080/10601329608011018
- Stokstad, E. (1999). How Aztecs Played Their Rubber Matches. *Science*, 284, 1898 - 1899.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.284.5422.1898B>
- Treybal, R. (1997). *Transferencia de masa* (2da ed.). Universidad de Rhode Island. Editorial Mc-Graw Hill. New York.
- Vaysse, L., Bonfils, F., Sainte-Beuve, J., & Cartault, M. (2012). Natural Rubber. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, 281–293.
 doi:10.1016/b978-0-444-53349-4.00267-3