



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 21/ Edición N.42
Julio - diciembre de 2024
Reia4228 pp. 1-19

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Jiménez G, F. J.; Posada, L.; Castro H, C.
I.; Betancur Vélez, M.; Rios Arango, J. A.
Caracterización fisicoquímica y
evaluación ambiental del jugo
generado durante la extracción de la
fibra de fique (*Furcraea sp*)
Revista EIA, 21(42), Reia4228.
pp. 1-19.
<https://doi.org/10.24050/reia.v21i42.1770>

✉ *Autor de correspondencia:*

Mariluz Betancur Vélez
Ingeniería Química
Universidad Pontificia Bolivariana,
Colombia
mariluz.betancur@upb.edu.co

Recibido: 26-03-2024
Aceptado: 27-05-2024
Disponible online: 01-07-2024

Caracterización fisicoquímica y evaluación ambiental del jugo generado durante la extracción de la fibra de fique (*Furcraea sp*)

FRANCISCO J. JIMÉNEZ G¹

LAIA POSADA¹

CRISTINA I. CASTRO H¹

✉ MARILUZ BETANCUR VÉLEZ¹

JOSÉ ADRIAN RIOS ARANGO¹

1. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

Resumen

Existen muchos residuos agroindustriales que pueden suministrar uno o más nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. El presente estudio aborda la caracterización del jugo de fique, su evaluación ambiental y un análisis de los requisitos que debe cumplir para ser empleado como fertilizante líquido. El impacto ambiental se determinó con la huella gris fue de $377,9 \pm 14,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo por la demanda química de oxígeno (DQO); $255,3 \pm 11,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5); $29,6 \pm 3,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo en fósforo y $10,6 \pm 1,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de nitrógeno, lo que indica que su vertimiento causaría daños medioambientales severos. Sin embargo, por ser orgánico se determinó la capacidad de reducción de la carga orgánica de manera biológica, alcanzando un porcentaje de biodegradabilidad del 90% a las 55 horas, lo que indica que sería rápidamente aprovechado por los microorganismos. Finalmente, con los resultados de la caracterización fisicoquímica y teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5167, el jugo de fique clasifica como enmienda o acondicionador orgánico no húmico líquido, sin embargo, a pesar que las concentraciones de los macronutrientes N, P_2O_5 , K_2O no cumplen con el valor mínimo, es factible que los cultivadores de Fique puedan avanzar hacia una economía circular, mediante el aprovechamiento del jugo de Fique como enmienda y reemplazo de fertilizante en su propio cultivo y complementar la fertilización con el abono orgánico que también se puede obtener del bagazo de Fique u otra fuente.

Palabras claves: Fique (*Furcraea sp.*); Residuos agroindustriales; Jugo de Fique; Fertilizantes Orgánicos; Huellas ambientales; Impacto Ambiental; Biodegradabilidad; Caracterización de residuos.

Physicochemical characterization and environmental assessment of the juice produced during the extraction of ficus fibers (*Furcraea sp*)

Abstract:

There are many agroindustrial wastes that can provide one or more essential nutrients for plant growth. The present study deals with the characterization of fique juice, its environmental evaluation and an analysis of the requirements to be used as liquid fertilizer. The environmental impact was determined with the gray footprint of $377,9 \pm 14,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ juice for chemical oxygen demand (COD); $255,3 \pm 11,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ juice for biochemical oxygen demand (BOD5); $29,6 \pm 3,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ juice for phosphorus and $10,6 \pm 1,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ for nitrogen, indicating that its discharge would cause severe environmental damage. However, since it is organic, the capacity to biologically reduce the organic load was determined, reaching a percentage of 90% biodegradability in 55 hours, which indicates that it would be rapidly utilized by microorganisms. Finally, with the results of the physicochemical characterization and taking into account the NTC-ISO 5167 standard, the fique juice is classified as a non-humic liquid organic amendment or conditioner, although the concentrations of the macronutrients N, P_2O_5 , K_2O do not meet the minimum value, it is feasible that fique growers can move towards a circular economy by using fique juice as an amendment and fertilizer substitute in their own crops, complementing fertilization with organic fertilizer that can also be obtained from fique bagasse or another source.

Keywords: Fique (*Furcraea sp.*); Agroindustrial Waste; Fique Juice; Organic Fertilizers; Environmental Footprints; Environmental Impact; Biodegradability; Waste Characterization.

1. Introduction

Colombia, por su privilegiada ubicación geográfica es un país con un gran potencial agrícola, el cual es considerado el principal productor de fique a nivel mundial con un estimado de 30.000 toneladas al año y 20.000 hectáreas sembradas (Ovalle-Serrano, et al., 2018) (Quintero, et al., 2012). Esta fibra natural es empleada en la fabricación de productos como cuerdas, sacos, bolsos y artesanías, para las cuales sólo se utiliza la fibra larga que corresponde al 4 %

del peso total de la hoja, el restante 96 % concierne a un lixiviado conocido como jugo y el bagazo, con un porcentaje del 92 y 4 %, respectivamente (Quintero, et al., 2012). Actualmente, estos dos subproductos se disponen en el suelo en pequeñas áreas, sin cumplir con los requisitos del decreto 050 de 2018, ni con los valores de los parámetros físico-químicos para disposición de aguas residuales tratadas en el suelo establecidos en la resolución 699 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, ocasionando alteración al medio ambiente.

Sin embargo, los subproductos de fique pueden ser aprovechados en la generación de productos de valor agregado, por lo que están siendo objeto de investigaciones. En el caso del jugo se han reportado el aislamiento de su microflora como bacterias para la producción de biopolímeros como los polihidroxicanoatos (Sánchez Moreno, et al., 2012), su implementación como sustrato para la producción de metano (Barrera, et al., 2009) y etanol (Vasco-Echeverri, et al., 2013), bioinsumo para el control de plagas y enfermedades en cultivos (Rojas-Salas & Luque Turriago, 2012), aditivo para concreto (Gómez H, et al., 2019), fungicida a partir de saponinas extraídas del jugo (Rojas-Salas & Luque Turriago, 2012) (Álvarez S, et al., 2013), aislamiento de una gran variedad de compuestos químicos (Abdul-Hafeez, et al., 2020) (Leitão, et al., 2012) y acompañado del bagazo y con la adición de otras sustancias como cal, fosforita, melaza, estiércol y leche ácida, se ha empleado en abono (Acosta M, et al., 2013) (Channab, et al., 2024). Los fertilizantes suelen aportar en proporciones variables seis macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre y ocho micronutrientes: hierro, boro, cloro, manganeso, zinc, cobre, níquel y molibdeno (Sánchez Moreno, et al., 2012). Los macronutrientes desempeñan un papel importante en toda la vida de las plantas. En actividades beneficiosas en el metabolismo vegetal, así como en la protección biótico y abiótico, como el estrés por metales pesados, sequía, calor, rayos UV, radiaciones, enfermedades y ataques de insectos. Los macronutrientes también ayudan a aumentar el rendimiento, el crecimiento y la calidad de los cultivos. (Peter, et al., 2019)

Estos abonos orgánicos son actualmente muy apreciados por la creciente adopción de prácticas agroindustriales ecológicas y sustentables que buscan alcanzar la productividad deseada protegiendo el medio ambiente (Nagavallema, et al., 2004) (Guzmán, et al., 2015), al emplear materias primas orgánicas que sustituirían fertilizantes sintéticos generados a través de procesos que utilizan materias primas fósiles y en los que se generan grandes cantidades de dióxido de carbono, los cuales se vienen manejando de manera desbalanceada generando pérdida de la fertilidad del suelo y afectando la productividad agroindustrial (Nagavallema, et al., 2004).

En esta última aplicación su efecto ha sido evaluado de manera empírica en el desarrollo de varios cultivos y en el mejoramiento del suelo (Rojas-Salas & Luque Turriago, 2012) (Leitão, et al., 2012) (Acosta M, et al., 2013) y en la literatura son pocos los estudios que se presentan con la caracterización de los macro y micro elementos y el análisis para fertilizantes. Por tal motivo, en este trabajo se realizó una caracterización físico química del jugo de la especie bordo de oro (*Furcraea castilla*) mediante técnicas analíticas como gravimetría, volumetría, espectroscopia de absorción atómica, espectroscopia de plasma acoplado inductivamente, espectrofotometría visible, entre otras. Además, se calculó la huella hídrica gris generada por la carga transportada por la escorrentía y la lixiviación del jugo de fique dispuesto sin ningún proceso previo al suelo. Se determinó la biodegradabilidad del mismo que lo cataloga como un producto biodegradable dando posibilidades de su uso en la producción de bioinsumos. También, se comparó con la norma NTC-ISO 5167, para establecer si cumplía los requisitos que debe pasar un fertilizante líquido y se analizaron los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelos.

2. Materiales y métodos

2.1 Obtención del jugo.

El jugo fue obtenido a partir del proceso de desfibrado de cuatro lotes diferentes de hojas de plantas de fique especie bordo de oro (*Furcraea castilla*), cultivadas por la empresa Agave S.A.S. en una finca en el municipio de Amalfi, Antioquia. A las muestras se les midió el pH al llegar al Laboratorio utilizando un pH-Metro Schott Lab 850 bajo el procedimiento descrito en el procedimiento estándar SM-4500 H⁺ a condiciones de laboratorio controladas y luego fueron almacenadas en un cuarto frío a una temperatura de 4 °C con el fin de evitar procesos fermentativos. El pH durante el almacenamiento se mantuvo aproximadamente constante durante el tiempo que tomó la caracterización con valores promedio de $4,33 \pm 0,17$ Unidades de pH.

2.2 Caracterización del jugo

Las concentración de sólidos insolubles en agua se determinaron tomando volúmenes entre 3 a 5 mL, se filtraron usando filtro de fibra de vidrio de 0,70 μm y 0,47 μm de diámetro previamente secados y pesados de acuerdo a lo establecido en el SM-2540-D (APHA/AWWA/WPCF., 2017), luego las muestras fueron secadas en una estufa a 105 °C durante 24 h, los filtros se enfriaron durante 30 min en un desecador para realizar los pesajes hasta peso constante empleando una balanza Mettler Toledo AG285.

Análisis de Nitrógeno y Fósforo

El análisis de nitrógeno total se realizó por medio del procedimiento estándar SM-4500-Norg-B y SM-4500-NH3-B,C, tomando 10 mL de muestra a la que se le realiza una digestión ácida con una mezcla de sulfato de cobre, sulfato de potasio y ácido sulfúrico, luego las digestiones obtenidas son destiladas empleando el destilador Buchi KjellFlex K360, para obtener el nitrógeno en forma de amoníaco y se recoge en 50 mL de una solución absorbente de ácido bórico e indicador mixto hasta un volumen de 250 mL que luego se titula con ácido sulfúrico 0,02 N. (APHA/AWWA/WPCF., 2017)

El análisis de fósforo total se realizó tomando volúmenes de 50 mL de jugo, implementando el procedimiento SM-4500-P B, E se hizo una digestión ácida en una mezcla de 1,0 mL de ácido sulfúrico y 5,0 mL de ácido nítrico, la muestra se digesto hasta concentrarla a 1,0 mL, luego reacciona con una mezcla de tartrato antimonílico de potasio y molibdato de amonio en medio ácido, posteriormente se lee la absorbancia de las muestras en el espectrofotómetro UV-VIS Genesys 6 de Thermo Scientific a una longitud de onda de 880 nm, luego aplicando la ecuación de la curva de calibración se obtienen los valores de la concentración de las muestras.

Determinación de Mercurio

Para la determinación de mercurio en las muestras de jugo de fique se tomaron volúmenes de 0,100 mL de las diferentes muestras y se ingresaron al equipo Analizador Directo de Mercurio DMA-80 de acuerdo al método de EPA 7473.

Determinación de Metales

Metales por absorción atómica (AA): Mg, K

Para la determinación de potasio y magnesio en las muestras de jugo, se tomaron 100 mL de muestra y se realizó una digestión ácida con ácido nítrico y ácido clorhídrico para destruir la materia orgánica y sales disueltas de acuerdo al método estándar SM-3030- F. Esta digestión se reconstituye a 100 mL con agua desionizada para luego analizar en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica ICE 3500, bajo el método de SM-3111- B empleando una llama de aire acetileno que alcanza una temperatura de 1.800 °C a 2.000 °C. (APHA/AWWA/WPCF, 2017)

Metales por espectroscopia de plasma acoplado inductivamente ICP-OES: As, Cd, Cr, Ni, Pd

Para la determinación de metales por esta técnica, se tomaron 43 mL de muestra y se realizó una digestión ácida empleando un digestor de microondas ETHOS ONE de Milestone. Luego las digestiones se llevan a volúmenes de 50 mL y son leídas en el

espectrómetro de emisión óptica acoplado inductivamente ICP-OES 6500 THERMO SCIENTIFIC.

Análisis Elemental: Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre (CHONS)

Para la determinación de carbono y azufre en las muestras de jugo de fique, se hizo una separación de los sólidos suspendidos y posterior secado a 40 °C, procediendo luego a homogenizar las muestras por maceración, del cual se tomaron cantidades de muestra de 0,3, 0,7 y 1,0 mg, adicionalmente se tomaron 20 µL de la porción del sobrenadante, para realizar el análisis se utilizó el Analizador Elemental Flash 2000 Thermo Scientific, el cual emplea oxígeno para la combustión y helio como gas de arrastre.

Determinación de la densidad del jugo de fique

Para determinar la densidad del jugo se utilizó un picnómetro de 25 mL, el cual fue llenado con las muestras de jugo y posteriormente pesado en una balanza analítica METTLER TOLEDO AG285 con una precisión de 0,01 mg.

Tratamiento estadístico

Para determinar el valor de cada uno de los parámetros evaluados se calculó la media (Ecuación 1) y la desviación estándar (Ecuación 2) de cada parámetro. Adicionalmente se eliminaron los valores anómalos, que son aquellos que tienen valores de asimetría superiores al límite de 3 desviaciones estándar con respecto a la media. El resultado se expresó como $\bar{x}_j \pm 2\sigma_j$, que representa una incertidumbre del 95% de certeza.

$$\bar{x}_j = \frac{\sum x_{j,i}}{n} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum(x_{j,i} - \bar{x}_j)^2}{n}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

\bar{x}_j es la media aritmética del parámetro j-ésimo.

$x_{j,i}$ es el i-ésimo dato del parámetro j-ésimo.

σ_j es la desviación estándar del indicador j-ésimo.

n es el número de datos.

2.3 Análisis ambiental

Para la evaluación ambiental asociada al impacto en el recurso hídrico, se determinó la huella hídrica (HH) del cultivo tradicional de fique con descarga directa de jugo de fique al suelo para determinar la carga que llega a las fuentes hídricas por escorrentía. Para el cálculo de la HH se desarrolló la metodología desarrollada por Water Footprint Network (WFN), la cual consta de tres componentes: verde, azul y gris (Hoekstra, et al., 2011). Juntos, estos componentes brindan una imagen integral del uso del agua al delinear la fuente de agua consumida, ya sea como lluvia/humedad del suelo o agua superficial/subterránea, y el volumen de agua dulce requerido para la asimilación de contaminantes. Para efectos de este análisis se realizó únicamente la huella gris, toda vez que esta huella determina el impacto por vertimiento o escorrentía a las fuentes hídricas cercanas.

Para el cálculo de la huella hídrica gris (HHgris) se utilizaron las concentraciones promedio encontradas de N, P, DQO y DBO₅ del jugo, asumiendo un factor de lixiviación-escorrentía $\alpha=0,1$ (Singh, et al., 2022); y los estándares de calidad del agua establecidos por la autoridad ambiental cercana a la zona (Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA-, 2012). Para el cálculo se utilizó la ecuación 3.

$$HH_{gris} = \frac{\alpha \times Cc}{(C_{max} - C_{nat})} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde α = factor de lixiviación (%), el cual se fija en 10% (Singh, et al., 2022); C_c = Carga contaminante aplicada (g/m^3); C_{max} = concentración máxima de nitrógeno (10 mg/L), fósforo (2,0 mg/L), DQO ($25 \text{ mgO}_2/\text{L}$) y DBO_5 ($18,8 \text{ mg O}_2/\text{L}$) para una masa de agua determinada (Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA-, 2012); C_{nat} = fondo natural de concentración de nitrógeno y fósforo, que se fijan en 0,8 y 0,1 mg/L respectivamente (Sierra Ramírez, 2011) y para DQO y DBO_5 se asumieron como 0.

2.4 *Análisis de biodegradabilidad*

Se tuvo como referencia el método 301 F de la guía de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) para productos químicos (OECD, 1992). El análisis de DBO respirométrico se realizó utilizando el equipo OXITOP WTW y una incubadora a $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Se toma una porción de la muestra de jugo de fique y se vierte en una botella del OXITOP, a la cual se le adiciona posteriormente una semilla de microorganismos, solución tampón de fosfatos, sulfatos de magnesio, cloruro de hierro y cloruro de calcio y se cierra herméticamente, a este sistema se le hace un seguimiento de la degradación de la materia orgánica en el tiempo, por medio de la medición del vacío generado en la botella debido al consumo de oxígeno inicial contenido en ella. Para estimar la biodegradabilidad se emplea la relación de la ecuación 2, los valores de DBO_n corresponden a las mediciones en los diferentes tiempos y se tiene en cuenta el valor de la DQO de la muestra.

$$\text{Biodegradabilidad (\%)} = \frac{\text{DBO}_n}{\text{DQO}} \times 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

3. Resultados y discusión

Durante el proceso de extracción de fibra larga de fique el principal residuo generado es el jugo, el cual constituye cerca del 70% de la masa procesada. Dicho jugo es una suspensión de color verde a ocre, tiene un olor característico fuerte, y es muy corrosivo (Ver imagen 1). Su densidad medida a escala experimental fue de 1,04 kg/L y su pH promedio fue de $4,33 \pm 0,17$ unidades de pH. También presentó niveles elevados de carga orgánica medida como DQO de $94,48 \pm 3,68$ g O₂/L y DBO₅ de $47,87 \pm 2,10$ g O₂/L. La materia orgánica presente en el jugo la complementan la presencia de nitrógeno (N) en concentraciones del orden de $975,0 \pm 164,2$ mg N/L, fósforo (P) de $576,5 \pm 59,7$ mg P/L y de potasio de $3550,2 \pm 1043,9$ mg K/L. Todos estos valores se encuentran en el mismo orden de magnitud de otros estudios realizados en extractos de jugo de (*Furcraea sp*) (Imbachí-Hoyos, et al., 2012) (Vasco-Echeverri, et al., 2013).

Los sólidos en suspensión por presencia de fibras cortas o mucílago del proceso de beneficio, arrojó un valor de $20,86 \pm 4,01$ g/L y los sólidos sedimentables fueron de 775 mL/(L-h). De acuerdo con la cantidad de sólidos presentes se demuestra que la separación de los sólidos no es eficiente mediante la sedimentación y gravimetría, se requieren procesos de filtración para su remoción total.



Análisis ambiental – Huella Hídrica gris.

El impacto ambiental se determinó con la HHgris teniendo en cuenta 4 parámetros asociados a la contaminación de origen orgánico que son: DQO, DBO₅, Nitrógeno Total y Fósforo Total. El mayor impacto generado por el proceso de manejo y disposición del jugo de fique, lo presenta la DQO contenida en el jugo, en caso de llegar a verter este jugo en el suelo a través del escurrimiento llegase al agua superficial. De acuerdo con los resultados obtenidos, para la producción tradicional de fique la huella gris fue de $377,9 \pm 14,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo por la DQO; $255,3 \pm 11,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo de DBO₅; $29,6 \pm 3,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de jugo en el fósforo y $10,6 \pm 1,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de nitrógeno (ver Tabla 1). Se tomó en consideración como referencia un caudal promedio característico de $0,138 \text{ m}^3/\text{s}$ para la quebrada Guayabito que abastece el acueducto municipal en el municipio de Amalfi (Colombia) (Gobernación de Antioquia, 2021), y que se pueden tener hasta $4,483 \text{ m}^3$ de jugo de fique por hectárea sembrada durante el desfibrado, para la cual un cuerpo de agua con el caudal mencionado no tiene la capacidad de diluir la concentración del jugo a niveles aceptables, por lo que su vertimiento causaría daños medioambientales severos.

Además, con el objetivo de presentar los resultados en una unidad funcional más comprensible para los productores, se calculó

el impacto asociado a la producción de un kilogramo de fique. Según las mediciones in situ de rendimientos realizadas en el proyecto, por cada kilogramo de fique obtenido en el desfibrilado se generan, en promedio, 80 litros de jugo de fique. El impacto máximo de HHgris debido a la lixiviación del jugo de fique es de $6,05 \pm 0,23 \text{ m}^3/\text{kg}$ de fique, seguido por la DBO_5 , que es de $4,08 \pm 0,18 \text{ m}^3/\text{kg}$ de fique.

Tabla 1. Resultados obtenidos del agua contaminada por disposición inadecuada de jugo de fique

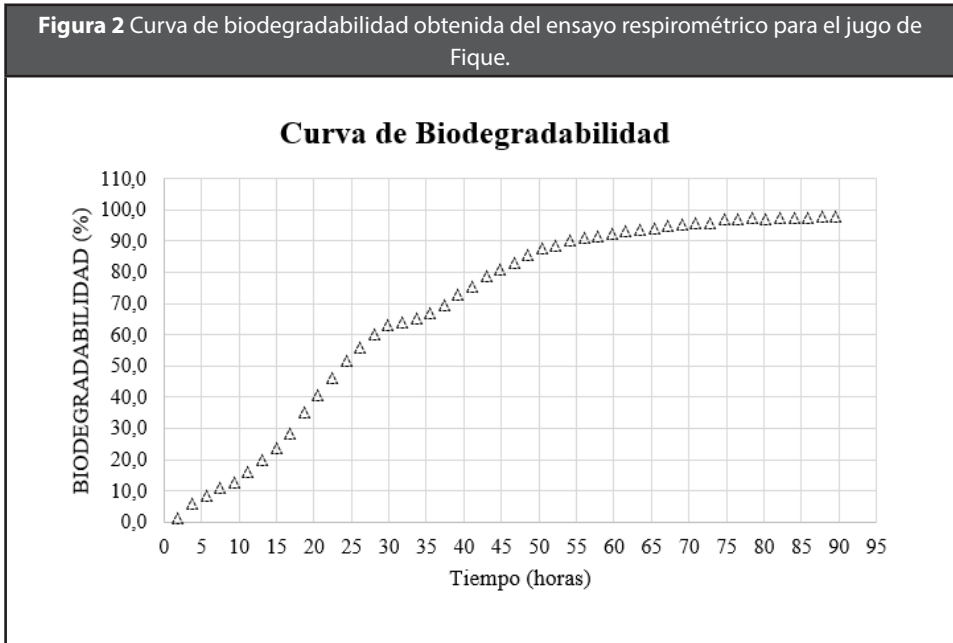
	Unidad	Nitrógeno	Fósforo	DQO	DBO_5
α	-	10%	10%	10%	10%
Carga aplicada	g/L jugo	0,975	0,577	94,48	47,87
Carga Lixiviada	g/L jugo	0,097	0,0577	9,448	4,787
C_{\max}	g/m^3	10,0	2,0	25,0	18,8
C_{\min}	g/m^3	0,8	0,1	0,0	0,0
Hhgris	$\text{m}^3 \text{ agua}/\text{m}^3 \text{ jugo}$	$10,6 \pm 1,8$	$29,6 \pm 3,1$	$377,9 \pm 14,7$	$255,3 \pm 11,2$
Hhgris	$\text{m}^3 \text{ agua}/\text{kg} \text{ fique}$	$0,17 \pm 0,029$	$0,47 \pm 0,05$	$6,05 \pm 0,23$	$4,08 \pm 0,18$

Las concentraciones de los macronutrientes nitrógeno y fósforo, están alrededor de 0,975 g/L y de 0,577 g/L respectivamente, y los valores de la carga orgánica fácilmente biodegradable medida como DBO_5 asciende a 47,87 g/L en promedio, lo que puede representar una gran oportunidad de aprovechamiento del jugo de fique como fertilizante orgánico, o como insumo para la obtención de alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas entre otros productos (Dias Ribeiro, et al., 2013). Su aprovechamiento in situ, o mediante la producción de bioinsumos es fundamental para la mitigación y reducción de la contaminación que genera su disposición al suelo.

Análisis de biodegradabilidad

De acuerdo con los resultados encontrados en la literatura, el jugo de fique es más ecotóxico que el mancozeb (fungicida) y que el propanil (herbicida). El valor de CL_{50} en ensayos para trucha arco iris es de 1,0 mg/L para el jugo, mientras que en mancozeb y propanil son de 2,2 mg/L y 8 mg/L respectivamente (Colombia, Ministerio de ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial, 2006). Sin embargo, también es un producto natural y por ser orgánico en un 90% (análisis de material volátil superior al 90%), en este trabajo se determinó la capacidad de reducción de la carga orgánica de manera biológica, a través del porcentaje de biodegradabilidad. Los valores obtenidos en el ensayo de la DBO respirométrica se presentan en la Figura 2.

Se observa que a las 55 horas el jugo alcanza una biodegradabilidad superior al 90%, lo que indica que es un compuesto biodegradable, y sería rápidamente aprovechado por los microorganismos adaptados en el suelo sin causar alteraciones significativas en la microbiota (Anon., 2016) (OECD, 1992). Además, esta característica es apta para tratar el jugo mediante procesos de estabilización de tipo físico, químico y/o biológico y a su vez generar compuestos de interés industrial, como la producción de biogás, la separación de microorganismos, uso como fungicida, entre otros (Vasco-Echeverri, et al., 2013) (Barrera, et al., 2009).



Aprovechamiento potencial del jugo de fique en fertilización.

La norma NTC-ISO 5167, establece los requisitos que debe cumplir un fertilizante líquido y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelos. De acuerdo a las definiciones dadas en la norma, se clasifica el jugo como enmienda o acondicionador orgánico no húmicos líquidos, con lo cual en el numeral 4.2.7 de la misma norma, se encuentran los requisitos fisicoquímicos que debe cumplir el producto a usar como fertilizante (ICONTEC, 2011). En la Tabla 2 se presenta una comparación con los límites y los 4 lotes analizados para el jugo de fique, se observa que el contenido de carbono oxidable cumple con la cantidad mínima a garantizar para un fertilizante. Los nutrientes (N, P₂O₅, K₂O) presentan valores inferiores al valor mínimo de 15 g/L establecido para un fertilizante comercial y los metales cumplen con los valores máximos permitidos.

Tabla 2. Comparación de los parámetros a garantizar según la NTC 5167

Parámetros	Unidades	Valor Norma NTC 5167	Concentración promedio Jugo de Fique	# Lotes	Rango datos	Desviación típica
Productos Insolubles en agua	g/L	Max 40	20,86	4	15,47 - 25,16	4,01
Carbono Orgánico Oxidable	g/L	Min 20	89	1	-	
Nitrógeno Total N	g/L	Min 15	0,975	4	0,79 - 1,12	0,138
Fósforo Asimilable P ₂ O ₅	g/L	Min 15	1,37	4	1,210 - 1,524	0,137
Potasio soluble K ₂ O	g/L	Min 15	3,55	4	2,37 - 4,89	1,044
Contenido de Sodio	(g/L)	Max 15	0,049	2	0,021 - 0,077	0
Densidad	(g/cm ³)	Reporte	1	1	-	
pH	Unidades de pH	Max 8,5	4,33	4	4,15 - 4,6	0
CaO	mg/kg		1964	1		
MgO	mg/kg		533	4	341 - 1.012	332,6
S	mg/kg		0	3	0 - 0	0,0
Fe	mg/kg		64,0	4	13,5 - 117,42	45,1
Mn	mg/kg		2	4	1,65 - 2,96	0,6
Cu	mg/kg		1	4	0,65 - 1,97	0,6
Zn	mg/kg		3	4	0,73 - 6,9	2,9
B	mg/kg		1	4	1,17 - 1,71	0,2
As	mg/kg	Max 41	0,0147	4	0,005 - 0,031	0,012
Cd	mg/kg	Max 39	0,0117	4	0,005 - 0,018	0,006
Cr	mg/kg	Max 1200	0,0482	4	0,005 - 0,072	0,030
Hg	mg/kg	Max 17	Menor 0,001	4	Menor 0,001	-
Ni	mg/kg	Max 420	0,1715	4	0,091 - 0,348	0,1
Pb	mg/kg	Max 300	0,1744	4	0,031 - 0,547	0,2

A pesar que las concentraciones de los macronutrientes N, P_2O_5 , K_2O no cumplen con el valor mínimo de un fertilizante comercial según la NTC 5167, es factible que los cultivadores de Fique puedan avanzar hacia una economía circular, mediante el aprovechamiento del jugo de Fique como enmienda y reemplazo de fertilizante en su propio cultivo. Para los años de cosecha en los cultivos de Fique se recomienda fertilizar con abono químico 12-12-17-2 (N- P_2O_5 - K_2O -S) a una razón de 300 kg a 400 kg por hectárea al año (Dias Ribeiro, et al., 2013), es decir, se requieren 36 kg de N, esto se podría suministrar al emplearse 14,4 m³ de jugo de Fique. Como una hectárea de Fique produce aproximadamente 4,8 m³ de jugo como residuo, se podría aprovechar toda esta cantidad y complementar la fertilización orgánica con el abono orgánico que también se puede obtener del bagazo de Fique (Colombia, Ministerio de ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial, 2006).

4. Conclusiones

La agroindustria del Fique en Colombia genera un aproximado de 93.400 toneladas de residuos por año, los cuales son depositados en el suelo o en las fuentes de aguas causando desequilibrio al ecosistema. De los residuos, aproximadamente el 73% corresponde al jugo de Fique, equivalente a 96.000 m³ al año, los cuales generan una huella hídrica de 36,28 Mm³/año. De acuerdo con lo anterior, el jugo de Fique no puede ser vertido directamente sobre el suelo o a un cuerpo de agua superficial.

Las concentraciones de los macronutrientes N y P_2O_5 , y los valores de la carga orgánica fácilmente biodegradable medida como DBO_5 , presentan una gran oportunidad de aprovechamiento del jugo de fique como enmienda de nutrientes in situ, siempre y cuando se realicen procesos previos de estabilización y degradación del jugo de fique. Para realizar la comercialización del jugo de fique de acuerdo a los lineamientos dados por la NTC 5167, la cual establece los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como

abonos o fertilizantes, es necesario mezclar el jugo con productos que incrementen su concentración de N, P y K.

Aunque el jugo de fique es ecotóxico presenta una biodegradabilidad superior al 90% en 55 h aproximadamente. Lo anterior permite que se establezca y degrade el jugo de fique antes de ser usado como enmienda y que tenga un sin número de posibilidades para la obtención de bioinsumos mediante procesos biológicos de digestión aerobia y fisicoquímicos. Se recomienda a futuro evaluar el potencial de degradación mediante digestión anaerobia y generación de energía con el gas obtenido.

5. Agradecimientos

Este artículo fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), Colombia y el Fondo Francisco José de Caldas, 1210-903-86606 CT 80740-448-2021: “Misión Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa hacia una sociedad impulsada por el conocimiento” Proyecto 86725.

6. Referencias

- Abdul-Hafeez, E. Y. et al., 2020. In vitro cytotoxic activity of certain succulent plants against human colon, breast and liver cancer cell lines. *South African Journal of Botany*, 131, pp. 295-301.
- Acosta M, J. et al., 2013. Efecto de abonos orgánicos a partir de subproductos del fique en la producción de maíz. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), pp. 94-102.
- Álvarez S, D. E. et al., 2013. Evaluación del bioinsumo de fique (*Furcraea gigantea*) en el control del tizón tardío de la papa. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), pp. 29-36.
- Anon., 2016. Resolución 0689 del 03 de mayo del 2016. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- APHA/AWWA/WPCF, 2017. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. New York: American Public Health Association.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA-, 2012. Resolución Metropolitana No. 2016. Medellín: s.n.
- Barrera, P. et al., 2009. Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique. *Revista ION*, 2(1), pp. 53-61.

- Channab, B. E., El Idrissi, A., Essamlali, Y. & Zahouily, M., 2024. Nanocellulose: Structure, modification, biodegradation and applications in agriculture as slow/controlled release fertilizer, superabsorbent, and crop protection: A review. *Journal of Environmental Management*, 352, p. 119928.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006. Guía Ambiental del subsector Fiquero. [En línea] Available at: http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6697/1/2007222154336_GuiaAmbientalFiquera2006.pdf [Último acceso: 15 Diciembre 2022].
- Dias Ribeiro, B., Alviano, D. S., Barreto, D. W. & Zarur Coelho, M. A., 2013. Functional properties of saponins from sisal (*Agave sisalana*) and juá (*Ziziphus joazeiro*): Critical micellar concentration, antioxidant and antimicrobial activities. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 436, pp. 736-743.
- Gobernación de Antioquia, 2021. Anuario estadístico de Antioquia. [En línea] Available at: <https://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/servicios-publicos-2021/> [Último acceso: 02 Diciembre 2023].
- Gómez H, C., Zuluaga, R., Gañan, P. & Pique, T. M., 2019. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive. *Journal of Cleaner Production*, 235, pp. 1540-1548.
- Guzmán, B. et al., 2015. Saponins from *Chenopodium Quinoa Willd* and *Chenopodium Pallidicaule Aellen* as biocontrollers of phytopathogen fungi and hemolysis agents. *Revista Boliviana de Química*, 32(1), pp. 8-14.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. & Mekonnen, M., 2011. *The Water Footprint Assessment Manual*. Washington: Earthscan.
- ICONTEC, 2011. Norma técnica colombiana NTC 5167 2011-03-23 productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá: ICONTEC.
- Imbachí-Hoyos, J. F., Morales-Velasco, S. & Alban-López, N., 2012. Utilización del subproducto de fique: licor verde, como controlador de plagas en el cultivo de repollo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), pp. 109-115.
- Leitão, F. et al., 2012. Medicinal plants traded in the open-air markets in the State of Rio de Janeiro, Brazil: an overview on their botanical diversity and toxicological potential. *Rev Bras Farmacogn*, 4(2), pp. 225-247.
- Nagavallema, K. et al., 2004. *Vermicomposting: recycling wastes into valuable organic fertilizer*. Patancheru, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
- OECD, 1992. *Test No. 301: Ready Biodegradability, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3*. Paris: OECD Publishing.
- Ovalle-Serrano, S., Gómez, F., Blanco-Tirado, C. & Combariza, M. Y., 2018. Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from Colombian Fique decortication by-products. *Carbohydr. Polym.*, 189, pp. 169-177.
- Peter, E. A. C., Hudson, N. & Evans, C., 2019. An Efficacious Supplementary Fertilizer Formulation from Agricultural Farm Biomass. *Chemical Science International Journal*, 19 Diciembre, pp. 1-15.
- Quintero, M. et al., 2012. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example. *Bioresource Technology*, 108, pp. 8-13.
- Rojas-Salas, M. C. & Luque Turriago, E., 2012. Fungicide from sisal juice (*Furcraea spp.*) and evaluation of its effectiveness on the drop (*Phytophthora infestans*) in the potato crop (*Solanum tuberosum*). *Revista Educación en Ingeniería*, enero a junio, 7(3), pp. 13-22.

- Sánchez Moreno, S. A., Marín Montoya, M. A., Mora Martínez, A. L. & Yepes Pérez, M., 2012. Identificación de bacterias productoras de Polihidroxialcanoatos (PHAs) en suelos contaminados con desechos de fique. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, 14(2), pp. 89-100.
- Sierra Ramírez, C., 2011. *Calidad de agua. Evaluación y diagnóstico*. 1 ed. Medellín: Universidad de Medellín.
- Singh, K. et al., 2022. Water footprint assessment of surface and subsurface drip fertigated cotton-wheat cropping system – A case study under semi-arid environments of Indian Punjab. *Journal of Cleaner Production*, 365, p. 132735.
- Vasco-Echeverri, O., Ramírez-Cardona, M., Vélez-Salazar, Y. & Giraldo-Ramírez, M., 2013. Producción de bioetanol empleando fermentación tradicional y extractiva a partir de jugo de fique. *Hechos Microbiológicos*, 4(2), pp. 91-97.