



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Estimación de la repetibilidad en la
producción de fibra seca y emisión
foliar en accesiones de fique
pertenecientes a la colección de trabajo
de Agrosavia**

Laura Beatriz Espitia Negrete

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas
Medellín - Colombia
2023

Estimación de la repetibilidad en la producción de fibra seca y emisión foliar en accesiones de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia

Laura Beatriz Espitia Negrete

Tesis de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de: Magister en
Ciencias Agrarias

Director (a):

Ingeniero Agrónomo (PhD Genética y mejoramiento) José Miguel Cotes Torres

Codirector (a):

Ingeniero Agrónomo (Magister en Ciencias Agrarias) Luz Fanny Orozco Orozco

Ingeniero Agrónomo (PhD Ciencias Agrarias) Clara Inés Medina Cano

Línea de Investigación: Genética y Fitomejoramiento de plantas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas

Medellín - Colombia

2023

(Dedicatoria o lema)

*A Dios,
por permitirme seguir mis sueños y darme la fortaleza para hacerlos realidad.*

*A mi hijo Tomás,
por ser mi motor y mi fuerza. Hijo, eres mi mayor bendición te amo inmensamente.*

*A mi esposo Wistong,
por tu amor y respaldo, gracias por apoyarme y ser parte esencial de este camino, que siempre
estemos de la mano para construir a nuestros sueños juntos.*

*A mis padres Aris y Luis
mis mayores admiradores, gracias por siempre estar en sus oraciones y motivarme.*

*A mis hermanos,
por ser mis cómplices y compañía en toda mi vida.*

*A mi abuela Martha,
me viste empezar este camino y sé que desde el cielo me acompañaras siempre.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre: Laura Espitia Negrete

Fecha 31/07/2023

Agradecimientos

Mis agradecimientos van dirigidos a las siguientes personas, gracias por el apoyo, amistad y guía para la culminación de mi tesis de maestría y formación en el área de mejoramiento.

José Miguel Cotes Torres, Docente de Universidad Nacional, director de tesis, por guiarme en mi formación personal y profesional.

Luz Fanny Orozco Orozco, Investigadora Máster del Centro de Investigación La Selva- Agrosavia, Codirectora, por toda la confianza, apoyo y motivación.

Clara Inés Medina, Investigadora Ph.D. del Centro de Investigación La Selva- Agrosavia, Codirectora, por la oportunidad y entrega del legado de fique.

Yohana Grisales Investigadora Máster del Centro de Investigación La Selva- Agrosavia, por el acompañamiento y motivación en culminar.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia en los Centros de Investigación La Selva y Motilonia, donde me he formado profesionalmente.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, por la financiación de la investigación, acceder a los datos para la tesis.

Eliel Petro, Investigador Senior Asociado, Alliance of Bioversity International y CIAT, por estar atento a mis inquietudes.

Karen Ballesta, Profesional de Apoyo a la Investigación, Centro de Investigación La Selva- Agrosavia, por el acompañamiento en jornadas de estudio.

Mis compañeros de Agrosavia, Gilberto Higinio, Cristian Domínguez, Jaime López, Jaime Lozano, Felipe López por el acompañamiento en el registro de datos.

Mis amigos y futuros colegas en mejoramiento, Iván Pastrana, Luz Fanny Orozco, José Miguel Cotes, Verónica Coronado, Julieth Vargas. A mis maestros de fitomejoramiento en pregrado y postgrado por enseñarme sobre esta ciencia y arte.

Grupo Excala, S.A por brindar su apoyo y tiempo en las cosechas de fique.

Resumen general

Estimación de la repetibilidad en la producción de fibra seca y emisión foliar en accesiones de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia

A nivel mundial las fibras naturales son importantes para combatir los problemas de contaminación por las fibras sintéticas. Así, nuevamente es relevante potenciar el cultivo de fique para la fabricación de empaques y otros productos biodegradables a nivel nacional e internacional. Se reportan déficit de fibra entre los 7.000 y 10.000 t, en Colombia, el fique es de importancia en el sector agrícola, ya que es usado para el empaque de productos como café, maíz, cacao y papa. Sin embargo, no existe suficiente información técnica respecto al cultivo y al género *Furcraea*. La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, cuenta con una colección de trabajo de fique y especies relacionadas conformada por 148 accesiones, de las cuales se seleccionaron 68 accesiones para estimar el potencial genético mediante el coeficiente de repetibilidad de la producción y porcentaje de fibra seca. Los resultados de repetibilidad se obtuvieron valores de 0,29 y 0,14, para la producción y porcentaje de fibra, respectivamente. Además, se obtuvieron las correlaciones de las variables de rendimiento con las variables climáticas, encontrando correlaciones moderadas con temperatura mínima (0,5) y precipitación (0,42-0,48). Finalmente, se seleccionaron 10 accesiones por sus características agronómicas deseables de producción y porcentaje de fibra seca, las cuales superaron los promedios nacionales reportados. De otro lado, se evaluó la emisión foliar de cuatro ecotipos de fique, donde se observó variaciones de las accesiones dentro de los ecotipos. Se encontraron correlaciones positivas altas entre el largo y ancho de la hoja con la producción de fibra seca. Este estudio es un aporte al conocimiento de la especie y un insumo para fortalecer el programa de mejoramiento de *Furcraea* del país, hasta la obtención de registro de material de siembra para los cultivos comerciales.

Palabras clave: *Furcraea*, Cabuya, rendimiento, heredabilidad potencial, tasas, parámetro genético.

Abstract

Estimation of repeatability in dry fiber production and foliar sprout in fique accessions belonging to the Agrosavia collection

Worldwide, natural fibers are important in facing pollution issues caused by synthetic fibers. Thus, it is remarkable to promote fique sowing in order to manufacture packaging and other biodegradable products nationally and internationally. Fiber deficits of between 7,000 and 10,000 t are reported. In Colombia, fique is important in the agricultural sector, since it is used to pack products such as coffee, corn, cocoa and potato. However, there is not enough technical information regarding the crop and the genus *Furcraea*. The Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, has a working collection of fique and related species made up of 148 accessions. 68 accessions were selected to estimate the genetic potential through the repeatability coefficient of production and percentage of dry fiber. The repeatability results showed values of 0.29 and 0.14, for production and fiber percentage, respectively. In addition, correlations between yield variables and climatic variables were obtained, finding moderate correlations with minimum temperatura (0.5) and precipitation (0.42-0.48). Finally, 10 promising accessions were selected for their desirable agronomic characteristics of production and percentage of dry fiber, which exceeded the national averages reported. On the other hand, foliar sprout of four fique ecotypes was evaluated, it was observed that the ecotypes. High positive correlations were found between leaf length and width and dry fiber production. This study is a contribution to the knowledge of the species and an-input to strengthen the country's *Furcraea* improvement program to obtain registration of planting material for commercial crops.

Key words: *Furcraea*, pita cord, yield, potential, rates, genetic parameter.

Contenido

Contenido

Resumen general	6
Abstract	7
Introducción	14
Bibliografía	18
Capítulo 1	20
Evaluación de la repetibilidad en fibra seca y selección de accesiones de fique por su desempeño productivo	20
1.1. Introducción.....	22
1.2. Materiales y métodos.....	26
1.2.1. Localización del experimento:	26
1.2.2. Material Vegetal	27
1.2.3. Variables evaluadas	28
1.2.4. Análisis de datos	29
1.2.4.1. Análisis genéticos.....	29
1.2.4.2. Relación genotipo - ambiente	31
1.3. Resultados y discusión	31
1.3.1. Descripción de la población.....	31
1.3.2. Coeficiente de repetibilidad	33
1.3.3. Variables climáticas.....	35
1.3.4. Selección de accesiones promisorias de fique	41
1.3.5. Selección combinada en plantas de fique.....	43
1.4. Conclusiones.....	47
1.5. Bibliografía	48
Capítulo 2	53
Emisión foliar en ecotipos en cuatro ecotipos de <i>Furcraea</i> spp	53
Palabras claves.....	54
2.1. Introducción	55
2.2. Materiales y métodos	57
2.2.1. Ubicación del experimento	57
2.2.2. Material vegetal	57

2.2.3. Ciclos de evacuación.....	59
2.2.4. Variables evaluadas	59
2.2.5. Análisis estadístico	60
2.3. Resultados y discusión.....	61
2.3.1. Desarrollo de hojas por ecotipos y accesiones	61
2.3.2. Asociación de variables de crecimiento de hojas.....	65
2.3.3. Análisis discriminante dentro de los ecotipos.....	66
2.4. Conclusiones.....	72
2.5. Recomendaciones	72
2.6. Bibliografía	73

Lista de figuras

- Figura 1. Proceso de extracción de fibra de fique: a) planta óptima para cosecha, b) corte de hojas, desespine y acarreo al punto de desfibrado, c) desfibrado de hojas en maquina manual, d) fibra de fique recién desfibrada de la hoja, e) rotulación de fibra por accesión, f) fermentación de fibra, g) secado de fibra en los tendedores, h) empaque de fibra seca, i) empaque para llevar a punto de acopio..... 16
- Figura 2. Diferentes usos de la fibra de fique por la empresa Grupo Excala/ Compañía de empaques- Colombia, a) hilos de fique, b) tela de fique, c) sogas de fique, d) mochila de fique, e) saco cacaotero de fique, f) mantos para evitar erosión.....23
- Figura 3. Colección de trabajo de *Furcraea* y especies relacionadas en el Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia- Colombia.26
- Figura 4. Sitios de colecta en Colombia de las accesiones de *Furcraea* y especies relacionadas que conforman la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el C.I. La Selva. Ubicada en Rionegro-Antioquia.....27
- Figura 5. a) Planta de fique en edad productiva para el corte de hojas, b) Secado de fibra extraída de hojas de fique.28
- Figura 6. Histograma de frecuencia de a) producción de fibra seca ($\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$) y b) porcentaje de fibra seca (%) de 68 accesiones de fique durante cuatro ciclos de cosecha (2019-2022).....32
- Figura 7. Coeficiente de correlación de Pearson entre la precipitación acumulada, la radiación fotosintéticamente activa acumulada, la temperatura máxima y la temperatura mínima en función de los días de retraso, con respecto a, a) la producción de fibra seca por planta y b) el porcentaje de fibra seca. El área sombreada representa el intervalo de confianza del 95%, los círculos en la línea continua la correlación máxima, mientras que la línea horizontal discontinua indica el umbral de interés agronómico de 0,5.36
- Figura 8. Precipitaciones acumuladas en función de los días de rezago para cinco ciclos de cosecha de fique (2019-2022). El área sombreada representa el rango entre los valores máximos y mínimos observados. Las líneas verticales indican los días de rezago asociados con la máxima correlación entre la precipitación acumulada y la producción de fibra seca por planta (línea continua) y el porcentaje de fibra seca (línea discontinua)40
- Figura 9. Análisis del índice bayesiano de rendimiento-estabilidad, a) Producción de fibra seca ($\text{kg}\ \text{planta}^{-1}$) y b) Porcentaje de fibra seca (%), con intervalos de alta densidad a *posteriori* de 90%

durante cuatro ciclos de cosecha para 68 accesiones de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia. La franja color verde indica la mediana poblacional en cada variable y la línea vertical puntiaguda indica el promedio general nacional reportados.	42
Figura 10. Diagrama de dispersión de 68 accesiones de fique con los valores de producción de fibra seca y rendimiento de fibra, para la selección combinada de las 10 mejores accesiones..	44
Figura 11. Evaluación de emisión foliar de cuatros ecotipos de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia, durante tres ciclos de evaluación.	60
Figura 12. Gráfico de cajas y bigotes por accesión de fique en tres ciclos de evaluación a) número de hojas, b) hojas nuevas, c) largo de última hoja emitida, d) ancho de la última hoja emitida, Las letras en el eje X, representan el ecotipo por el cual se seleccionó la accesión, B: bordo de oro, E: espinoso, T: tunosa común, U: uña de águila.....	64
Figura 13. Representación bi-dimensional del análisis de componentes principales para el ciclo de evaluación 2020 de ocho accesiones de fique (<i>Furcraea</i> spp,) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia.....	68
Figura 14. Representación bidimensional del análisis de componentes para el ciclo de evaluación 2021 de ocho accesiones de fique (<i>Furcraea</i> spp,) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia	69
Figura 15. Representación bidimensional del análisis de componentes principales para el ciclo de valuación 2022 de ocho accesiones de fique (<i>Furcraea</i> spp,) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia.....	70

Lista de tablas

Tabla 1. Variables meteorológicas registradas durante los ciclos de cosecha de fique comprendidos entre los años 2019 al 2022.	26
Tabla 2. Repetibilidad y estimación de los componentes de varianza para la producción de fibra seca y porcentaje de fibra de 68 accesiones de fique (<i>Furcraea</i> spp.) en cuatro ciclos de cosecha.	34
Tabla 3. Producción promedio de fibra seca (kg.planta ⁻¹) y porcentaje promedio de fibra seca (%) durante cuatro ciclos de cosecha, comprendidos entre 2019 y 2022, en una población de 68 accesiones de fique. Entre paréntesis se indica el cuartil uno y tres, respectivamente.....	39
Tabla 4. Accesiones de fique seleccionadas por rendimiento-estabilidad, producción de fibra seca (kg planta ⁻¹) y porcentaje de fibra seca (%). mediana con intervalos de confianza, presencia o ausencia de espinas y procedencia del sitio de colectas.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. Variables meteorológicas registradas durante los períodos de evaluación entre los años 2020 y 2022.	57
Tabla 6. Accesiones de fique agrupadas por ecotipos dentro de la colección de trabajo de Agrosavia.	57
Tabla 7. Medias de las variables de hojas evaluadas en cuatro ecotipos de fique durante tres ciclos de evaluación entre los años 2020 a 2022 en la colección de trabajo de fique en La Selva Agrosavia.	62
Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre la variable suplementaria de rendimiento de fibras seca y variables de crecimiento de hojas, en cuatro ecotipos de fique durante en tres ciclos de evaluación, Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia, Colombia, 2020-2022.	65
Tabla 9. Valor de variabilidad en dos dimensiones de las variables de hojas en tres ciclos de evaluación comprendidos entre el 2020 y 2022 en ocho accesiones de fique	67

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término	Unidad
T _{min}	Temperatura mínima	°C
T _{max}	Temperatura máxima	°C
HR	Humedad relativa	%
PAR	Radiación solar fotosintéticamente activa	MJm ²
\bar{r}	Coeficiente de repetibilidad	
P	Producción de fibra seca	Kg planta ⁻¹
F	Porcentaje de fibra seca	%
TEF	Tasa de emisión foliar	días
HN	Hojas nuevas	unidad
NH	Número de hojas promedio	unidad
LHE	Largo de la última hoja emitida	cm
AHE	Ancho de la última hoja emitida	cm
Fibra	Fibra seca	kg
t_c	Tiempo de evaluación	días
NH _f	Número de hojas finales	unidad
NH _i	Número de hojas iniciales	unidad

Introducción

Existe una gran preocupación por la alta demanda de plástico a nivel mundial, debido a que su disposición final, casi siempre, causa contaminación y afectación al medio ambiente. En Colombia el 54% del total del plástico se destina a la producción de envases y empaques, donde se incluyen a las fibras sintéticas, que han reemplazado el uso de las fibras naturales. Esta competitividad ocasionó la disminución de la industria de la cabuya a nivel nacional, la cual fue prospera hasta mediados del siglo XX, viéndose afectada por los bajos precios y producción a gran escala de las fibras sintéticas (Campuzano, 2017; GREENPEACE, 2023).

En el país la fibra natural que más se produce y se utiliza es la proveniente de cultivos de fique. Entre el 80 y 85% de la producción total de fique es usada en el sector agrícola para la fabricación de empaques en la comercialización de café de exportación, papa, cacao y maíz. Las hojas de fique son usadas principalmente para la extracción de fibra, que representa el 4% del peso total, el 96% restante es denominado jugo y bagazo, el cual puede llegar a generar ingresos adicionales al productor, por la versatilidad de usos, como moléculas de actividad farmacológica, extracción de enzimas, formulación de insecticidas y fungicidas a base de jugo (Iannacone et al., 2013; Salas, 2021; Solarte et al., 2012; Solarte y Osorio, 2014; Yokosuka y Mimaki, 2009).

Colombia es el principal productor de fique a nivel mundial, el cultivo está distribuido en 11 departamentos productores y comercializadores de la fibra, donde Nariño (9,69 t) y Cauca (5,12 t) son los de mayor producción. A nivel nacional existe un área de siembra de 14,54 ha, que generan 19,28 t de fibra, sin embargo, existe un déficit de 7.000 a 10.000 t, por la alta demanda generada en los últimos años con el auge de las fibras naturales (Agronet, 2021).

Se han identificado diversos problemas relacionados con calidad de semillas, disponibilidad de maquinaria, problemas sanitarios como la macana y la presencia de floración que termina en la muerte de la planta, ocasionado atrasos y desuniformidad en el proceso de cosecha. El fique se caracteriza por ser un cultivo rústico donde se realizan labores mínimas para el manejo agronómico. En el establecimiento del cultivo los agricultores utilizan bulbillos o hijuelos, razón por la cual se observa diversidad en tamaño y sanidad de plantas dentro del lote. El

establecimiento se realiza con distancias de siembra entre 1,5 m entre plantas y 3 o 4 m entre surcos. Durante los primeros tres años del cultivo, es posible intercalarlo con otros cultivos de ciclo corto como maíz y frijol, que brinda al productor ingresos económicos antes de la primera extracción de fibra (Agronet, 2021; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [Minagricultura], 2022).

Dependiendo de la zona de siembra el cultivo empieza producción alrededor de los 3 a 4 años después de establecido. La extracción de la fibra inicia mediante el corte de las hojas maduras, que idealmente deben tener más o menos 45° de apertura respecto al tallo (Figura 5. a) Planta de fique en edad productiva para el corte de hojas, b) Secado de fibra extraída de hojas de fique. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a) (Echeverri et al., 2015). Estas hojas, generalmente se encuentran en los dos o tres anillos más viejos, dependiendo del tamaño y tipo de planta (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 5. a) Planta de fique en edad productiva para el corte de hojas, b) Secado de fibra extraída de hojas de fique.b). En algunas especies es necesario realizar el proceso de desespinado de las hojas que luego son acarreadas hasta el punto donde se encuentra la máquina para la extracción de la fibra. Cada hoja es pasada por la desfibradora (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**c), en este punto se separa la fibra y se obtienen los excedentes de cosecha (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**d). Posteriormente, la fibra es sumergida en agua durante un período de 12 a 15 horas, transcurrido este tiempo la fibra es extendida para ser secada al sol, donde adquiere su coloración característica, para luego ser armada en mazos y llevadas a los puntos de acopio de la fibra seca (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** f, g, h, i). Normalmente la cosecha de fique puede ser realizada cada seis meses, pero el sector fiquero enfrenta problemas por escases de mano de obra y disponibilidad de maquinarias livianas y eficientes que faciliten la cosecha, lo que ocasiona retrasos de esta.

En promedio, una planta de fique puede vivir entre 14 y 20 años, aunque se han registrado plantas con producción hasta 60 años en ciertos departamentos de Colombia, pero su ciclo se ve afectado por presencia de floración temprana que ocasiona muerte de la planta y pérdida de la unidad productiva (Artesanías Colombia, 2023).



Figura 1. Proceso de extracción de fibra de fique: a) planta óptima para cosecha, b) corte de hojas, desespine y acarreo al punto de desfibrado, c) desfibrado de hojas en maquina manual, d) fibra de fique recién desfibrada de la hoja, e) rotulación de fibra por accesión, f) fermentación de fibra, g) secado de fibra en los tendedores, h) empaque de fibra seca, i) empaque para llevar a punto de acopio.

Los productores de fique están involucrados en diversas etapas del proceso, que incluye el establecimiento del cultivo, semilleros, trazados, trasplantes y cosecha. En algunos casos, también participan en el proceso de extracción y desfibrado. Sin embargo, la comercialización y fabricación de productos a base de fique son realizados por las industrias, esto ha generado un desequilibrio en la cadena del sector, donde las mayores ganancias se concentran en el último eslabón de comercialización y no en el productor (Minagricultura, 2022; Salas, 2021).

Respondiendo a las demandas de la cadena productiva sobre el establecimiento de un banco de germoplasma de fique (in situ y ex situ) y caracterización de ecotipos (morfológica, química, agronómica, productiva y molecular). La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, en el año 2013 y 2014 realizó la colecta de 148 accesiones en el territorio nacional, dando como resultado la conformación de la colección de trabajo de fique y especies relacionadas. Dentro de esta colección se han realizado estudios de caracterización morfológica y registro de limitante fitosanitarias (Medina et al., 2022; Grisales et al., 2021; Siembra, 2023).

El objetivo de esta investigación fue estimar el potencial de mejoramiento, seleccionar accesiones por producción de fibra seca y medir la variabilidad de emisión de hojas en la colección de trabajo de fique de Agrosavia, para ellos se consideraron dos líneas temáticas, una en el área de mejoramiento y la otra en fisiología vegetal, lo que da origen a dos capítulos. En el primer capítulo se estimó el coeficiente de repetibilidad, conocido como la heredabilidad potencial de la población cuando se realizan medidas repetidas en el tiempo (Falconer & Mackay, 1996), permitiendo avanzar en el programa de mejoramiento de la especie. Además, se realizó la identificación y selección de accesiones promisorias con altas producción de fibra y porcentajes de fibras, para que inicien evaluaciones de rendimiento en diferentes localidades y puedan en un futuro ser registradas como material de siembra para el sector figuero. El segundo capítulo se describe el comportamiento de emisión foliar de ocho accesiones de fique agrupadas en cuatro ecotipos (nombre común como los productores identifican los materiales de fique) denominados uña de águila, tunosa común, bordo de oro y espinoso, con el fin de conocer las tasas de emisión foliar.

Bibliografía

Agronet. (03 de febrero de 2021). *Estadísticas rendimiento nacional por cultivo de fique*. Minagricultura. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

Artesanías Colombia. (15 de junio de 2023). *Ficha Caracterización del Fique (Furcraea andina)*. Identificación de necesidades y fortalecimiento de la actividad artesanal en el departamento del cauca. <https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/bitstream/001/4859/13/INST-D%202015.%20150.%2011.pdf>

Campuzano Hoyos, J. (2017). *Tocando fibras: Historia del cultivo del fique (henequén) y del aprovechamiento industrial de la cabuya en Colombia durante la primera mitad del siglo XX. El caso de Antioquia*. Editorial EAFIT. ISBN-13 (15).

Echeverri, R.D.E., Montoya, L.M.F & Velásquez, M.R.G. (2015). *Fique en Colombia*. Instituto Tecnológico Metropolitano. Pp 11-15. <https://books.google.es/books?id=Kdk-DwAAQBAJ&lpg=PA62&ots=hXDiHxXa5&dq=numero%20de%20hojas%20fique&lr&hl=es&pg=PA12#v=onepage&q=numero%20de%20hojas%20fique&f=false>

Falconer, D & Mackay, T. (1996). *Introduction to quantitative genetics*. Fourth edition. Prentice Hall, London, England. 136-143 p.

GREENPEACE Colombia. (22 de julio de 2023). *Di basta al plástico*. <https://www.greenpeace.org/colombia/tag/plasticos/#:~:text=Se%20consumen%201.250.000%20toneladas,contaminan%20mares%2C%20r%C3%ADos%20y%20manlagres>.

Grisales, V.N.Y., Orozco, O.L.F., Giraldo, S.C.E & Pulgarín D.J.A. (2021). *First record of *Phidotriza erigens* (Lepidoptera: Pyralidae) feeding on *Furcraea* spp. in Colombia*. Revista Ceres, 68(6), 624–627. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168060015>

Iannacone, J., La Torre, M.I., Alvarino, L., Cepeda, C., Ayala, H & Argota, G. (2013). *Toxicity of biopesticides *Agave americana*, *Furcraea andina* (Asparagaceae) & *Sapindus saponaria* (Sapindaceae) on invader snail *Melanoides tuberculata* (Thiaridae)*. Neotropical Helminthology, vol. 7, n°2, pp. 231-241. <https://www.researchgate.net/publication/260084672>

Medina Cano, C.I., Grisales Vásquez, N.Y., Orozco Orozco, L.F., Barbosa Ángel, E.S., Vargas Arcila, M.O & Cotes Torres, J.M. (2022). *Morphoagronomic characterization of a germplasm collection of *Furcraea* spp & *Agave* spp*. Revista Ceres, 69(3), 283–293. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269030005>

Minagricultura. (17 octubre de 2022). *Cadena de fique y su agroindustria*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2018-11-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Salas, R.M. (2021). *La biomasa del fique, su potencial industrial, biocida y biocombustible*. Corporación para la Investigación Innovación e Industria- Colombia.

Siembra. (15 de marzo de 2023). *Demandas del sector fiquero 2014*. <https://www.siembra.co/Demandas/Demanda/Reporte>

Solarte, R.D., Osorio, O., Hurtado, A.M & Mejía, D.F. (2012). *Evaluation of Antifungal activity of Spray-dried Fique (*Furcraea* spp) for in vitro control of *Phytophthora infestans* in potatoes*

(*Solanum tuberosum* L). vol 23, n.3 pp.77-86.
<http://dx.doi.org/10.4067/S071807642012000300010>.

Solarte, R.D & Osorio, O. (2014). *Evaluación de la concentración del jugo de fique (Furcraea spp) para el control In Vitro de Phytophthora infestans en plantas de papa (Solanum.)* <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000500008>

Yokosuka, A & Mimaki, Y. (2009). *Steroidal saponins from the whole plants of Agave utahensis and their cytotoxic activity.* *Phytochemistry*. 70(6):807-15. doi: [10.1016/j.phytochem](https://doi.org/10.1016/j.phytochem).

Capítulo 1

Evaluación de la repetibilidad en fibra seca y selección de accesiones de fique por su desempeño productivo

Resumen

A nivel mundial las fibras naturales son importantes para evitar el uso de las fibras sintéticas no reciclables, por ello el cultivo del fique puede ayudar a suplir la demanda de empaques no plásticos en el mercado colombiano e internacional. Agrosavia cuenta con una colección de trabajo de fique ubicada en el Centro de Investigación La Selva-Rionegro (Antioquia-Colombia). En este trabajo se evaluó el coeficiente de repetibilidad de 68 accesiones de *Furcraea*, cosechadas desde el 2019 hasta el 2022. Se encontraron coeficientes de repetibilidad de 0,29 y 0,14, para la producción total de fibra seca y el porcentaje de fibra seca, respectivamente. Se calculó un índice de selección rendimiento-estabilidad para las características evaluadas, mediante el cual se seleccionaron 10 accesiones promisorias, que representan el 14% de la población evaluada. Además, se calcularon los coeficientes de correlación entre las variables productivas y algunas variables meteorológicas (precipitación y radiación solar acumuladas, temperaturas

promedios máximas y mínimas). Se evaluaron varios períodos de tiempo de rezago, hasta 252 días antes de cada ciclo de cosecha. La precipitación acumulada presentó su correlación más alta a los 101 días, siendo de 0,42 y 0,48, para la producción total de fibra seca y el porcentaje de fibra seca, respectivamente. La temperatura mínima promedio presentó correlaciones positivas con el desempeño productivo del fique, sin embargo, es necesario realizar más estudios para dilucidar su papel en la producción de fibra de fique.

Palabras claves: Heredabilidad potencial, producción, *Furcraea*, variabilidad fenotípica.

Abstract

Globally, natural fibers are important to avoid the use of nonrecyclable synthetic fibers; therefore, the cultivation of fique can help supply the demand for nonplastic packaging in the Colombian and international markets. Agrosavia has a working collection of fique located at the La Selva-Rionegro Research Center (Antioquia-Colombia). In this work, the repeatability coefficient of 68 *Furcraea* accessions harvested from 2019 to 2022 was evaluated. Repeatability coefficients of 0,29 and 0,14 were found for total dry fiber yield and dry fiber percentage, respectively. The yield-stability selection index was calculated for the evaluated traits, by which 10 promising accessions were selected, representing 14% of the evaluated population. In addition, correlation coefficients were calculated between productive variables and some meteorological variables (accumulated precipitation, average maximum and minimum temperatures, and accumulated solar radiation). Several lag periods were evaluated, up to 252 days before each harvest cycle. The accumulated rainfall presented its highest correlation at 101 days, being 0,42 and 0,48 for the total dry fiber production and the percentage of dry fiber, respectively. The average minimum temperature presented positive correlations with the productive performance of fique; however, more studies are needed to elucidate its role in the production of fique fiber.

Keywords: Potential heritability, yield, *Furcraea*, phenotypic variability.

1.1. Introducción

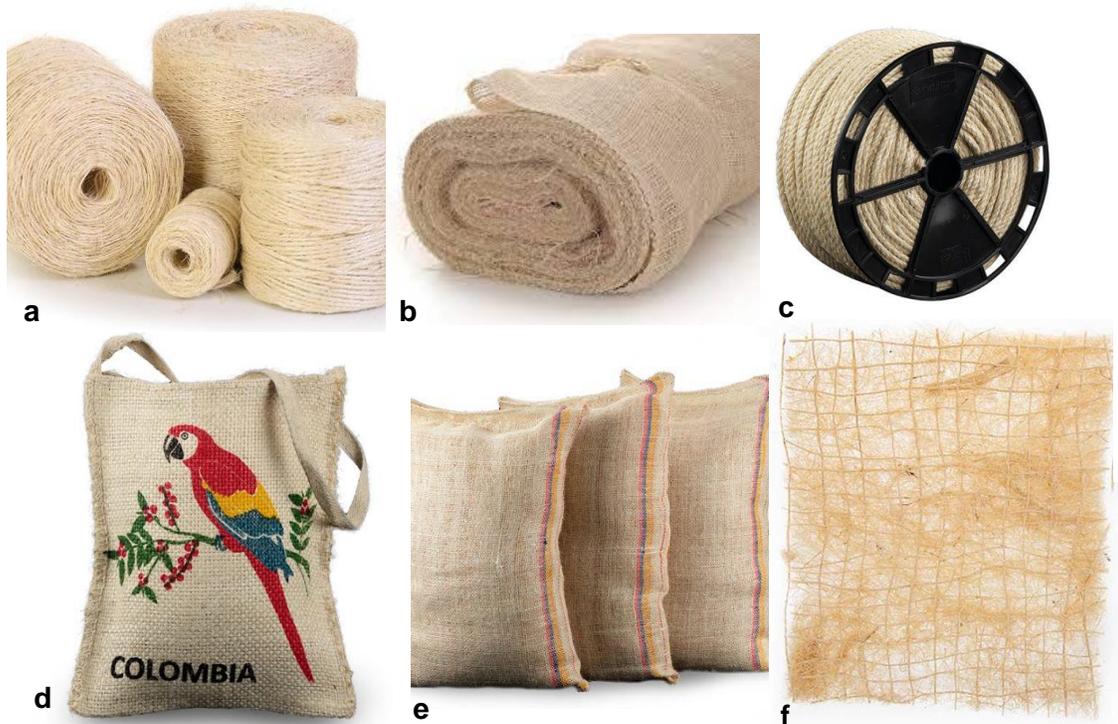
En el mundo se producen 430 millones de toneladas de plástico al año, la mayoría de un solo uso que terminan contaminando diversos ambientes, debido a su lenta degradación. Para limitar el uso de estas fibras sintéticas, una alternativa eficaz es reemplazarlas por el uso de recursos naturales renovables y biodegradables, retomando nuevamente importancia las fibras naturales, debido a que en años anteriores tenían gran relevancia hasta que llegaron las fibras sintéticas. A nivel mundial existen muchas especies de plantas que son utilizadas para la extracción de fibras naturales, sin embargo, en Colombia para este fin, existen dos especies de importancia económica, el algodón del cual se producen 9.199 t, y el fique con 19.280 t. (Agronet, 2021; EUROFIQUE, 2022; FAO, 2023; ONU, 2023).

El fique es una fibra biodegradable con diversas formas de uso (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El 70% de la producción colombiana es destinada a la fabricación de costales para la comercialización de productos agrícolas como café, maíz, papa y cacao (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. b**), el 10% para la fabricación de cuerdas biodegradables, el 5% en la fabricación de artesanías (bolsos, tapetes, bolsas resistentes entre otros, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. d**), el 10% en el sector de la construcción (mantos para hacer concreto y yesos reforzados, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. f**) y el restante 5% para otros usos tales como la fabricación de jeans (UPB, 2021), recientemente implementada en el sector textil (Minagricultura, 2022; Grupo Excala, 2023).

Del cultivo de fique se extrae la fibra que constituye el 4% de la hoja, el 96% restante lo conforman subproductos conocidos como jugo, estopa y bagazo. De estos subproductos se pueden fabricar abonos orgánicos, fertilizantes y alimento animal. Los usos de esta fibra son cada vez más diversos y versátiles, brindando una alternativa de competencia contra las fibras sintéticas (Salas, 2021).

La fibra de fique producida en Colombia es una alternativa promisoriosa para suplir la demanda de empaques no plásticos en el mercado nacional e internacional, debido al incremento del 5% del área de siembra en los últimos cinco años y a la implementación de paquetes tecnológicos que afectan positivamente el rendimiento nacional. En el 2011 la

cadena de fique manejaba exportaciones de 1.509 t, actualmente presenta descensos en las cifras, manejando exportaciones de 577 t para el 2020, destinadas a países como Venezuela, México, Ecuador, Costa Rica y Suiza. A pesar de que el fique en Colombia es importante, son pocos los recursos económicos destinados a la investigación del cultivo, que permitan afrontar los diversos problemas del sector fiquero, tales como: disponibilidad de maquinaria más eficiente para la extracción, baja calidad de semilla, control de floración del cultivo y competitividad con las fibras sintéticas (Minagricultura, 2022; Minagricultura, 2021).



Fotos: Pagina web Grupo Excala

Figura 2. Diferentes usos de la fibra de fique por la empresa Grupo Excala/ Compañía de empaques-Colombia, a) hilos de fique, b) tela de fique, c) sogas de fique, d) mochila de fique, e) saco cacaotero de fique, f) mantos para evitar erosión.

Entre el 2013-2014 en el Centro de Investigación La Selva de Agrosavia, se estableció una colección de trabajo de fique que cuenta con 148 materiales de *Furcraea* y especies relacionadas, colectadas en 12 departamentos del país, que capturan gran parte de la variabilidad genética existente en Colombia. De esta colección se han publicado artículos

científicos relacionados con la variabilidad de características morfológicas, agronómicas y atributos de valor en la fibra en las primeras 100 accesiones (Medina et al., 2022). Además, se realizó descripción de la diversidad de suelos donde se obtuvieron las colectas de las accesiones (Medina et al., 2022).

Sin embargo, no se han identificado accesiones por su estabilidad fenotípica y característica de interés agronómico. La estabilidad de los genotipos a través de los ambientes es de gran importancia en la evaluación y selección de materiales. Las variaciones entre ambientes o años pueden provocar diversas respuestas, lo que resalta la necesidad de incorporar los conceptos de estabilidad, para determinar la adaptabilidad de las plantas (Córdova, 1991).

En la actualidad no se conoce la heredabilidad de la producción de fibra de fique en esta colección, información genética importante para proyectar el programa de fitomejoramiento. Dada la dificultad práctica de estimar la heredabilidad en este cultivo de propagación vegetativa y ciclo largo, la repetibilidad es un parámetro genético que da una estimación de la heredabilidad potencial y además permite la predicción del comportamiento de la población en futuras cosechas, expresando la variabilidad fenotípica que se atribuye a la genética de la población (Falconer & Mackay, 1996).

Este coeficiente representa la correlación entre medidas repetidas sobre un mismo individuo, permitiendo reducir la incidencia del ambiente temporal, los valores de repetibilidad varían entre 0 y 1, valores cercanos a 1 indican que el carácter estudiado se expresa con mayor constancia y que es posible predecir el valor real del individuo utilizando un número de mediciones sucesivas correctas (Cargnelutti et al., 2004; Resende, 2002).

La repetibilidad puede ser usada en cultivos de propagación clonal, utilizando múltiples medidas de plantas pertenecientes a un mismo clon, se puede predecir los valores futuros a partir de los valores pasados. Las diferencias dentro del clon (intraindividual) son de origen ambiental, causados por el entorno donde se realizan las evaluaciones sucesivas, mientras que las diferencias entre los clones (interindividual) es parte ambiental y parte genética (Falconer & Mackay, 1996).

Este parámetro ha sido estimado y usado con éxito en muchos programas de mejoramiento de cultivos perennes. En cacao obtuvieron valores de $\hat{r} = 0,89$ en características

cuantitativas de los frutos en 25 genotipos evaluados durante cinco años (Dos Santos y Kageyama, 1998), en caña de azúcar se han obtenido valores de repetibilidad entre $\hat{r} = 0,03$ y $0,70$ para variables de rendimiento y porcentaje de azúcar (De Sousa, Rea y Briceño, 2003). En el cultivo de eucalipto se estimaron repetibilidades entre $\hat{r} = 0,13$ y $0,32$ (Sánchez et al., 2004). En guayaba el índice de repetitividad fluctuó entre $\hat{r} = 0,85$ y $0,98$, durante dos años de evaluación (Padilla et al., 2014) y en caucho la repetibilidad estimada estuvo entre $0,64$ y $0,66$ para el rendimiento de sólidos totales (Monsalve, et al., 2018).

El objetivo de este trabajo fue conocer el potencial genético de la población de fique, usando el coeficiente de repetibilidad y seleccionar las accesiones más promisorias por su desempeño productivo.

1.2. Materiales y métodos

1.2.1. Localización del experimento:

La colección de trabajo de fique (Figura 3) se encuentra establecida en el Centro de Investigación La Selva, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia, ubicado en Rionegro, Antioquia, con coordenadas geográficas de 6° 08' 06" de latitud, 75° 25' 3" de longitud y a 2.120 msnm (Medina et al., 2022), durante esta investigación se presentaron las variables meteorológicas mensuales descritas en la Tabla 1.



Figura 3. Colección de trabajo de *Furcraea* y especies relacionadas en el Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia- Colombia.

Tabla 1. Variables meteorológicas registradas durante los ciclos de cosecha de fique comprendidos entre los años 2019 al 2022.

Variables meteorológicas	PAR	Tmin	Tmax	Precipitación	HR
Mínimo	6,63	10,19	22,62	0,13	71,66
Media	8,24	12,42	25,05	4,75	79,49
Máximo	10,76	13,29	26,59	11,18	90,14

PAR: radiación solar (MJm²); Tmin: temperatura mínima (°C); Tmax: temperatura máxima (°C), Precipitación (mm), HR: humedad relativa (%)

1.2.2. Material Vegetal

Se evaluaron 68 accesiones de *Furcraea* pertenecientes a la colección de trabajo. Las accesiones evaluadas provienen de colectas realizadas en los departamentos de Antioquia (34,4%), Boyacá (11%), Caldas (4,05%), Cauca (2,70%), Cesar (0,67%), Cundinamarca (3,37%), Guajira (6,75%), Huila (6,09%), Nariño (5,40%), Norte de Santander (8,10%), Santander (13,51%) y Tolima (7,43%), tal como se observa en la Figura 4. Las accesiones fueron establecidas entre los años 2013 y 2014, utilizando cinco plantas por accesión (unidad experimental), sembradas a una distancia en cuadro de 3 x 3 m (Medina et al., 2022).

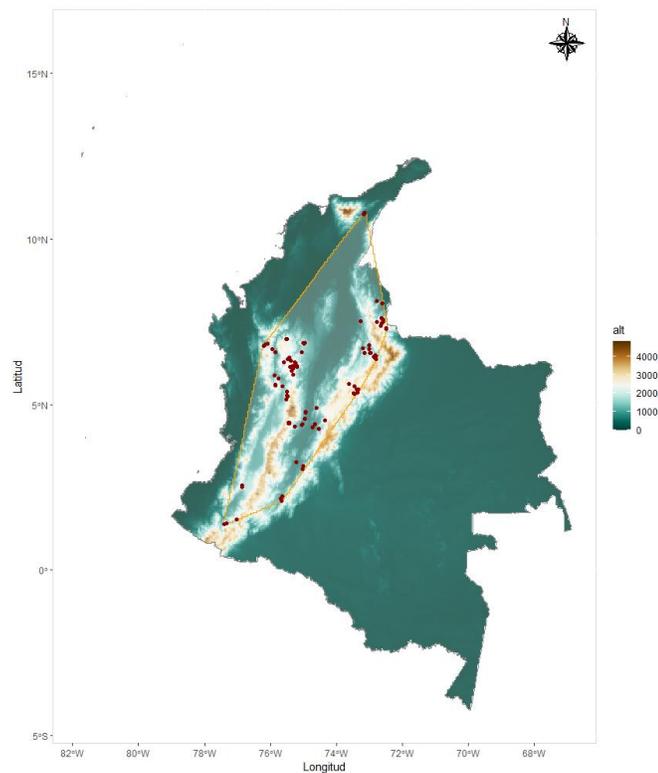


Figura 4. Sitios de colecta en Colombia de las accesiones de *Furcraea* y especies relacionadas que conforman la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el C.I. La Selva. Ubicada en Rionegro-Antioquia.

1.2.3. Variables evaluadas

Se realizaron cuatro ciclos de cosecha durante los años 2019, 2020, 2021 y 2022. Sin embargo, la cosecha correspondiente al 2019 se dividió en 41 accesiones cosechadas en diciembre 2019 y 27 accesiones en marzo del 2020, debido a problemas operacionales, el segundo ciclo se realizó en septiembre del 2020, tercer ciclo en octubre del 2021 y cuarto y último ciclo en junio 2022. Cada cosecha se realizó sobre hojas maduras con más o menos 45° de apertura respecto al tallo, representando de dos a tres anillos de hojas dependiendo del desarrollo de cada planta (Figura 5). Se registró el número de plantas cosechadas (unidad), el número de hojas cosechadas por planta (unidad), el peso fresco de cinco hojas (kg) y el peso de fibra seca (kg). Con estos datos se calcularon las variables de producción de fibra seca ($\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$) y porcentaje de fibra seca (%), las cuales fueron usadas para estimar el coeficiente de repetibilidad y posteriormente la selección de las accesiones promisorias.



Figura 5. a) Planta de fique en edad productiva para el corte de hojas, b) Secado de fibra extraída de hojas de fique.

Además, se registraron las variables climáticas, precipitación diaria (mm), radiación solar ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$), temperatura diaria máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), la información fue colectada por dos estaciones automatizadas WatchDog Serie 2000, ubicadas en el Centro de Investigación La Selva. En la información comprendida entre enero 2019 y junio 2022, faltaron el 16,7% de los datos de radiación solar, un 16,1% de los datos de temperatura y

el 15,1% de los datos de precipitación. La información faltante para radiación solar fue completada con Nasapower (\hat{p} 0,90), mientras que para los datos de temperaturas diaria (\hat{p} Max: 0,85; Tmin:0,72) y precipitación diaria (\hat{p} 0,71), se utilizó la estación meteorológica del IDEAM (código 23085270) ubicada a 1,3 km del experimento.

1.2.4. Análisis de datos

Para describir la población se construyó un histograma con los datos de las variables de producción de fibra seca y porcentaje de fibra seca por accesión, se calculó la media, el valor mínimo, el cuartil uno (Q1), el cuartil dos (Q2) y el valor máximo.

1.2.4.1. Análisis genéticos

Los datos fueron analizados a través de un modelo lineal mixto bivariado (1):

Ecuación 1

$$\begin{bmatrix} y_p \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1_n & 0 \\ 0 & 1_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_p \\ \mu_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p & 0 \\ 0 & x_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_p \\ \alpha_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_p \\ e_f \end{bmatrix}$$

Donde, 1_n son vectores de unos de tamaño n , asociados al efecto fijo promedio de la producción de fibra y porcentaje de fibra; μ_p y μ_f son las medias de la producción de fibra y porcentaje de fibra; x_p y x_f son matrices de incidencia de tamaño $n \times 68$ asociados a los efectos aleatorios de las accesiones; α_p y α_f son los efectos entre las accesiones; e_p y e_f son el error experimental.

Se asume que las varianzas asociadas a los efectos entre las accesiones son no estructuradas (2), es decir:

Ecuación 2

$$G_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha_p}^2 & \sigma_{\alpha_p \alpha_f} \\ \sigma_{\alpha_p \alpha_f} & \sigma_{\alpha_f}^2 \end{bmatrix}$$

Y para el residual se asumen varianzas heterogéneas entre y dentro de las accesiones (3):

Ecuación 3

$$R_e = \begin{bmatrix} \sigma_{e1}^2 & & & \\ & \sigma_{e2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{e68}^2 \end{bmatrix}$$

Todos los parámetros del modelo, es decir medias, efecto entre accesiones, varianzas entre accesiones, varianzas dentro de accesiones etc, fueron estimadas por la metodología bayesiana (Bayes, 1793), mediante simulación Monte Carlo en Cadenas de Markov, usando distribuciones *a priori* no informativas, que es cuando se refleja una ignorancia total o un conocimiento muy limitado sobre los parámetros de interés.

Para el análisis se utilizó el entorno estadístico de datos R (R Core Team, 2022) con los paquetes MCMCglmm (Hadfield, 2012) y Coda (Plummer et al., 2006).

Con base en los valores simulados se computó el coeficiente de repetibilidad usando la ecuación general (4), propuesta por Falconer & Mackay (1996), y expresada para cada variable de la siguiente forma: (5) y (6):

$$\hat{r} = \frac{V_G}{V_p} \tag{Ecuación 4}$$

$$\hat{r}_P = \frac{\sigma_{aP}^2}{\sigma_{aP}^2 + \sigma_{eP}^2} \tag{Ecuación 5}$$

$$\hat{r}_F = \frac{\sigma_{aF}^2}{\sigma_{aF}^2 + \sigma_{eF}^2} \tag{Ecuación 6}$$

Donde, V_G es la varianza genética; V_p es la varianza fenotípica, que se divide en varianza genética y varianza ambiental; \hat{r}_P y \hat{r}_F son los coeficientes de repetibilidad para producción y porcentaje de fibra, respectivamente; σ_{aP}^2 y σ_{aF}^2 son las varianzas condicionales entre las accesiones para las mismas variables; y σ_{eP}^2 y σ_{eF}^2 son la varianza condicional de los efectos dentro de las accesiones para producción y porcentaje de fibra (Falconer & Mackay, 1996).

Finalmente, para la selección de genotipos se consideró un índice bayesiano de rendimiento-estabilidad (bysi=bayesian yield stability index) (Cotes et al., 2012; Cotes,

2022) basado en el rendimiento mínimo esperado con probabilidad del 10%, es decir, hay un 90% de probabilidades que se obtenga un rendimiento por encima de ese valor.

Para la estimación puntual bayesiana de todos los parámetros se calculó mediante la mediana de la distribución *a posteriori* de cada uno de ellos, y como estimación por intervalo se obtuvieron los límites inferior y superior de alta densidad *a posteriori* de 90% (Box & Tiao, 1992; Gelman et al., 2013; Mood et al., 1974).

Un camino para determinar el aumento de la precisión de la repetibilidad a partir de múltiples evaluaciones, Falconer & Mackay (1996) propusieron la ecuación de precisión (7):

Ecuación 7

$$\frac{V_{p(n)}}{V_p} (\%) = \frac{1 + r(n - 1)}{n}$$

Donde, $V_{p(n)}$ es la varianza de la evaluación en n evaluaciones; r es el coeficiente de repetibilidad estimado, n el número de evaluaciones realizadas.

1.2.4.2. Relación genotipo - ambiente

Para cuantificar la asociación entre las variables meteorológicas y la producción de fibra seca y el porcentaje de fibra seca de las 68 accesiones, se realizó un análisis de correlación de Pearson ($\hat{\rho}$). Las variables meteorológicas evaluadas fueron, la precipitación y la radiación solar acumuladas, así como, los promedios de temperatura máxima y mínima diaria en varios períodos de rezagos, desde 30 hasta 252 días antes de cada ciclo de cosecha. Se consideraron como correlaciones de interés, aquellas que sobrepasaran el umbral de $|\hat{\rho}|=0,5$.

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Descripción de la población

Las 68 accesiones de fique registraron una distribución asimétrica en ambas variables, en la producción de fibra seca (Figura 6 a) la mayoría de las accesiones se concentran en valores de 1,5 y 2,0 kg·planta⁻¹ con media general de 1,91 kg planta⁻¹, lo que representaría

2,12 ton·ha⁻¹. Se identificaron accesiones que superaran el valor promedio nacional reportados de 1,2 kg·planta⁻¹ (equivalente a 1,4 ton·ha⁻¹) (Agronet, 2021).

El 8,82% de las accesiones superan el umbral de 3 kg·planta⁻¹ (3,3 ton·ha⁻¹), convirtiéndose en una población promisoría dentro del programa de mejoramiento de la especie (Figura 6 a), con lo cual, se podrían ayudar a suplir el déficit nacional de materia prima (7.000 a 10.000 t·año, Minagricultura, 2022) y, por lo tanto, se hace necesario la evaluación de estas accesiones en más localidades para evaluar su potencial productivo.

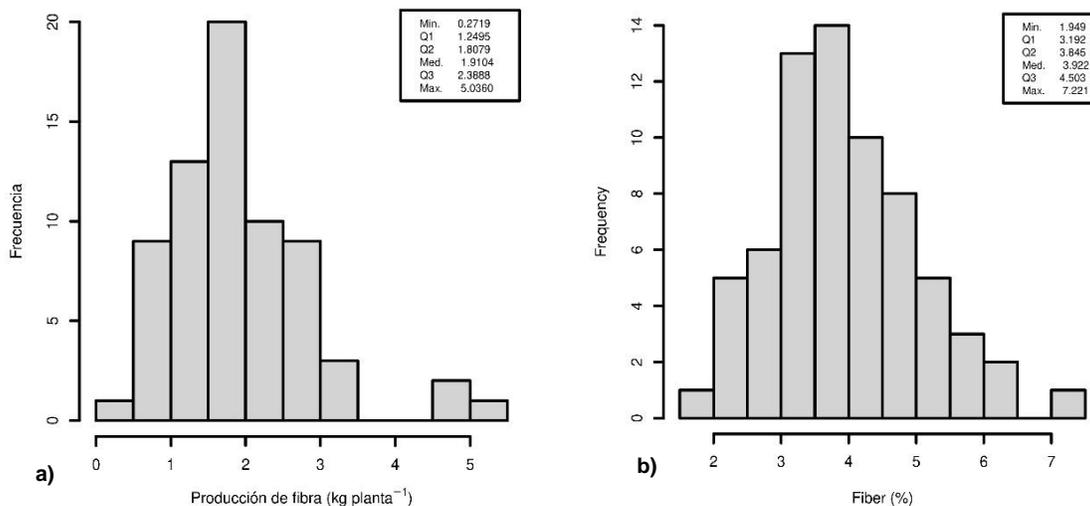


Figura 6. Histograma de frecuencia de a) producción de fibra seca (kg·planta⁻¹) y b) porcentaje de fibra seca (%) de 68 accesiones de fique durante cuatro ciclos de cosecha (2019-2022).

Otras fibras naturales utilizadas a nivel mundial son el yute (2 ton·ha⁻¹), el sisal (1 ton·ha⁻¹) y el algodón (2,5 ton·ha⁻¹) cuyos rendimientos están por debajo de los reportados en este estudio, con lo cual se confirma la ventaja competitiva que tiene el cultivo de fique en el mercado de fibras naturales y su potencial en la sustitución de fibras sintéticas (Agronet, 2021; FAO, 2023).

El porcentaje de fibra de fique de las 68 accesiones (Figura 6 b) presentaron distribución asimétrica con media general de 3,92%, concentrándose el mayor número de accesiones entre los 3,5 y 4%, valores que están por debajo del promedio nacional que es del 4% (Agronet, 2021). Sin embargo, se destacan el 11,3% de la población, que obtuvieron

valores promedios superiores a los 5,5%. Es de resaltar que porcentajes de fibras altos son deseables, debido a que con menos hojas se tendrá mayores rendimientos de fibra, este es un carácter secundario para relacionar con la característica principal que es la producción de fibra seca por planta.

En otras fibras naturales como el sisal se reportan porcentajes de fibra en hojas de 2,6%, en yute el aprovechamiento del peso total de la planta para extracción de fibra es del 6%, y cultivos como el algodón, la fibra representa el 35% del peso del fruto. Respecto a esta característica fique no se encuentra en desventaja frente a otras fibras naturales a nivel mundial (ALSUM, 2018; Mendoza, 2000; Monja-Mio et al., 2019).

1.3.2. Coeficiente de repetibilidad

Resende (2002), considerando la ganancia fenotípica debido al ambiente permanente en dos cosechas consecutivas, clasificó los valores de repetibilidad en tres categorías, alta ($\hat{r} \geq 0,60$), media ($0,30 < \hat{r} < 0,60$) y baja ($\hat{r} \leq 0,30$), en este sentido la población de fique en estudio presentó un valor de repetibilidad baja para las dos variables $\hat{r}=0,29$ para la producción de fibra seca y $\hat{r}=0,14$ para el porcentaje de fibra seca (Tabla 2). Comportamiento similar se obtuvo en el cultivo de caña de azúcar donde el rendimiento presentó valores más altos de repetibilidad que el porcentaje de azúcar, los coeficientes en general se clasificaron de bajos a intermedios para las variables toneladas de caña de azúcar y porcentaje de azúcar, los valores oscilaron entre $\hat{r}= 0,03$ y $\hat{r}= 0,70$ (De Sousa, Rea y Briceño, 2003).

Este parámetro ha sido estimado y usado con éxito en muchos programas de mejoramiento de cultivos perennes. En cacao obtuvieron valores de $\hat{r}=0,89$ en características cuantitativas de los frutos de 25 genotipos evaluados durante cinco años (Dos Santos y Kageyama,1998). En guayaba el índice de repetitividad fluctuó entre $\hat{r} = 0,85$ y $0,98$, durante dos años de evaluación (Padilla et al., 2014) y en caucho la repetibilidad estimada estuvo entre $0,64$ y $0,66$ para el rendimiento de sólidos totales (Monsalve, et al., 2018).

En agaváceas no se tiene información de repetibilidad, en cambio cultivos de fibra como el algodón han presentado valores de $\hat{r}=0,52$ en el rendimiento de fibra (Zhang et al., 2011), permitiendo avanzar en la identificación y selección de materiales superiores que hoy en día hacen parte de los programas de mejoramiento genético del cultivo.

En este sentido, los datos obtenidos en este estudio sería la primera aproximación para conocer las características genéticas y definir el potencial de mejoramiento de las accesiones de *Furcraea*.

Teniendo en cuenta que la repetibilidad es el potencial de heredabilidad máxima posible (Falconer & Mackay, 1996), podemos concluir que estos caracteres son de baja heredabilidad y por lo tanto se podrían obtener ganancias genéticas dentro de un programa de hibridación entre plantas con características agronómicas de interés, sin embargo, no será fácil, ni rápido obtener un avance genético importante. La heredabilidad y la repetibilidad son medidas de población, no se debe asociar con un individuo, sin embargo, el conocimiento del parámetro de repetibilidad en fique fue útil para tomar decisiones, permitiendo identificar las accesiones más productivas.

Tabla 2. Repetibilidad y estimación de los componentes de varianza para la producción de fibra seca y porcentaje de fibra de 68 accesiones de fique (*Furcraea* spp.) en cuatro ciclos de cosecha.

Variables	Parámetros	Estimativa bayesiana	HPD 90%*	
		Mediana	Inferior	Superior
Producción de fibra seca (kg·planta⁻¹)	Varianza entre accesiones $\sigma_{a(P)}^2$	0,24	0,12	0,39
	Varianza condicional entre accesiones $\sigma_{a(P F)}^2$	0,48	0,29	0,68
	Varianza de ambiente específico $\sigma_{e(P)}^2$	2,84	1,40	5,39
	Varianza condicional de ambiente específico $\sigma_{e(P F)}^2$	0,58	0,32	0,94
	Coefficiente de repetibilidad $r_{(P F)}$	0,29	0,13	0,45
Porcentaje de fibra (%)	Varianza entre accesiones $\sigma_{a(F)}^2$	0,33	0,15	0,55
	Varianza condicional entre accesiones $\sigma_{a(F P)}^2$	0,67	0,28	1,09
	Varianza de ambiente específico $\sigma_{e(F)}^2$	9,52	5,09	18,01
	Varianza condicional de ambiente específico $\sigma_{e(F P)}^2$	1,85	1,14	2,85
	Coefficiente de repetibilidad $r_{(F P)}$	0,14	0,05	0,25
	Covarianzas entre accesiones $Cov(P, F)$	0,38	0,13	0,66
	Correlación entre accesiones $\rho(P, F)_a$	0,69	0,44	0,89
	Covarianza de ambiente específico $\rho(P, F)_a$	3,21	1,39	6,61

*HPD: Highest Posterior Density

Los valores de ganancia de precisión obtenidos para la producción de fibra y porcentaje de fibra (Figura 7), se observa como a medida que aumentan el número de evaluaciones empieza a disminuir la varianza fenotípica (debido a la reducción de la varianza ambiental), se utilizaron en los valores de repetibilidad estimados (0,29 y 0,14) simulando un total de 10 evaluaciones adicionales. Podemos observar que a partir de la evaluación cuatro que

corresponde al número de evaluaciones realizada en este estudio, se observa una estabilidad en la disminución de la varianza fenotípica de la población con valores por debajo de 0,4 en ambas variables. Falconer & Mackay reportan que estas ganancias de precisión disminuyen rápidamente a medida que se aumenta el número de mediciones y rara vez es necesario realizar más de dos o tres mediciones.

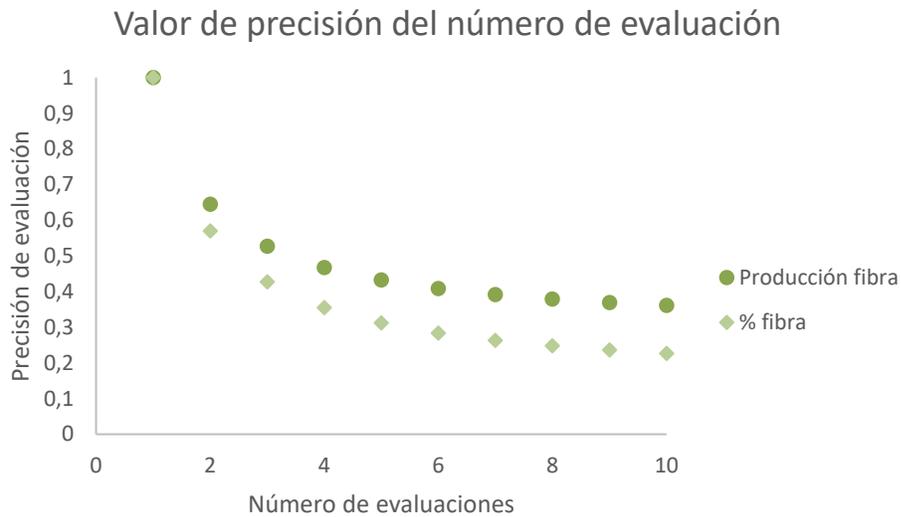


Figura 7. Precisión de múltiples evaluaciones de repetibilidad

1.3.3. Variables climáticas

Las variables meteorológicas evaluadas en los últimos de 30 días antes de la cosecha no afectaron el rendimiento de las hojas de fique, ya que estas se encuentran completamente desarrolladas y son pocos los cambios que ocurren como consecuencia de estas variables meteorológicas.

En cuanto a la precipitación acumulada se encontró que a los 101 días antes de cosecha se presentó la correlación máxima siendo de 0,42 y 0,48 para la producción y porcentaje de fibra seca, respectivamente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a, b). Sin embargo, las precipitaciones acumuladas antes de cosecha comprendidas entre los 83 y 105 días superaron el umbral de interés de 0,5 para la producción de fibra seca (kg planta⁻¹), mientras que para el porcentaje de fibra seca (%) se obtuvo un rango entre los 85 y 138 días antes de cosecha. Las dos variables comparten períodos muy cercanos por lo que, reuniendo ambas características, podemos considerar que para el cultivo de fique se

presenta una región crítica de suministro de lluvia entre los 83 y 138 días, para asegurar mejores rendimientos (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. a, b).

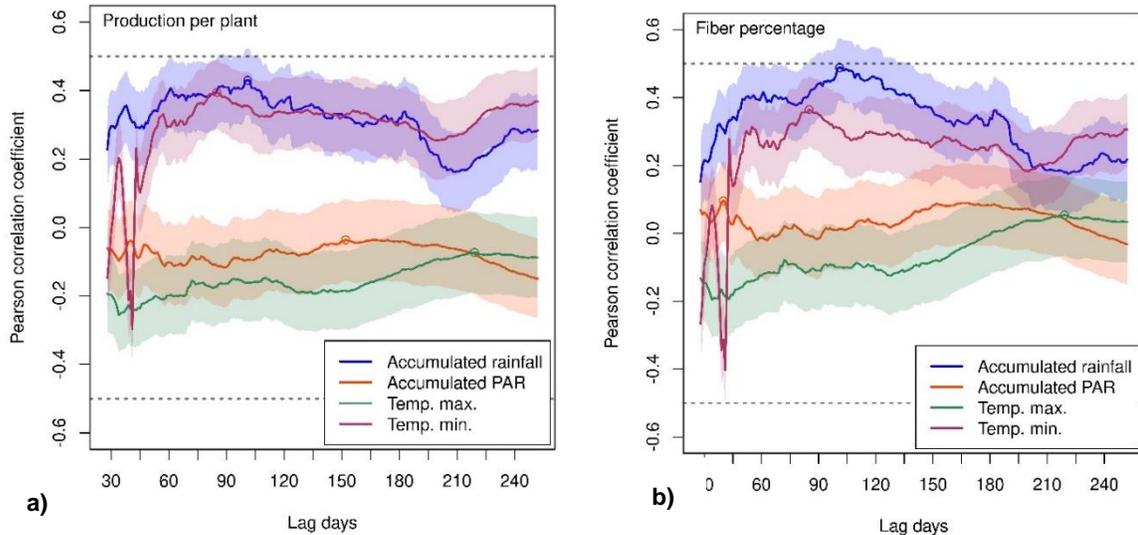


Figura 8. Coeficiente de correlación de Pearson entre la precipitación acumulada, la radiación fotosintéticamente activa acumulada, la temperatura máxima y la temperatura mínima en función de los días de retraso, con respecto a, a) la producción de fibra seca por planta y b) el porcentaje de fibra seca. El área sombreada representa el intervalo de confianza del 95%, los círculos en la línea continua la correlación máxima, mientras que la línea horizontal discontinua indica el umbral de interés agronómico de 0,5.

Los ciclos identificados como septiembre 2020, octubre 2021 y junio 20224 (Tabla 3) registraron los mejores desempeños productivos promedio de 1,91 a 2,20 kg.planta⁻¹. Presentaron valores entre 512 a 778 mm de lluvia acumulada, durante el período crítico descrito anteriormente (83 y 138 días) podemos concluir que estas son las precipitaciones

necesarias para favorecer el desempeño productivo del cultivo (

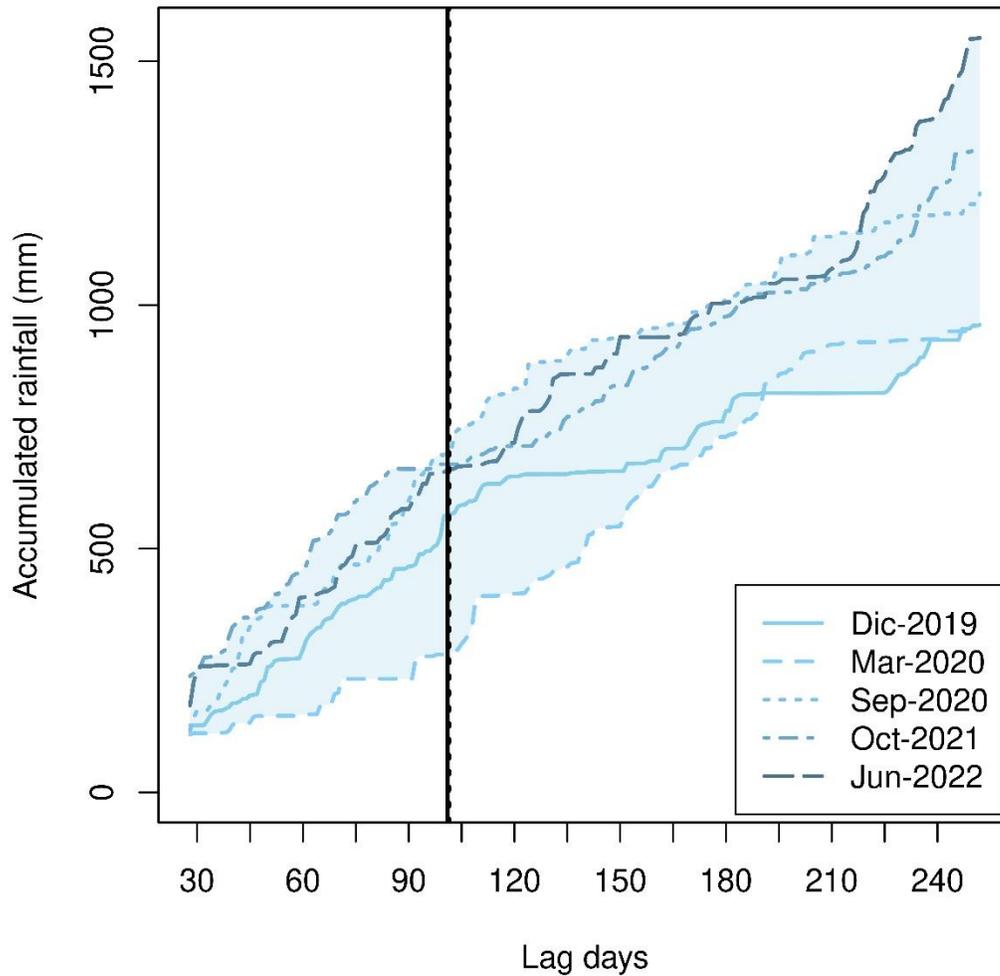


Figura 9. Precipitaciones acumuladas en función de los días de rezago para cinco ciclos de cosecha de fique (2019-2022). El área sombreada representa el rango entre los valores máximos y mínimos observados. Las líneas verticales indican los días de rezago asociados con la máxima correlación entre la precipitación acumulada y la producción de fibra seca por planta (línea continua) y el porcentaje de fibra seca (línea discontinua)

).

De otro lado el ciclo C1b (marzo 2020), presentó el peor desempeño, con precipitaciones acumuladas por debajo de 232 mm, durante el período crítico, que equivalen a una precipitación promedio de 2,79 mm·día⁻¹, nótese que la caída de los parámetros

productivos es bastante elevada llegando a valores de $0,34 \text{ kg-planta}^{-1}$ y $1,20 \%$, de producción y porcentaje de fibras, respectivamente.

Tabla 3. Producción promedio de fibra seca (kg.planta⁻¹) y porcentaje promedio de fibra seca (%) durante cuatro ciclos de cosecha, comprendidos entre 2019 y 2022, en una población de 68 accesiones de fique. Entre paréntesis se indica el cuartil uno y tres, respectivamente.

Nomenclatura del ciclo	Fecha del ciclo	Producción fibra seca (kg planta⁻¹)	Porcentaje fibra (%)
<i>C1a</i>	Diciembre-2019	2,02 (1,45-2,59)	4,26 (3,73-4,79)
<i>C1b</i>	Marzo-2020	0,34 (0,28-0,38)	1,20 (0,86-1,17)
<i>C2</i>	Septiembre-2020	1,91 (1,21-2,57)	4,35 (3,58-5,20)
<i>C3</i>	Obtubre-2021	2,13 (1,33-2,57)	4,18 (2,58-4,77)
<i>C4</i>	Junio-2022	2,20 (1,38-2,65)	4,09 (3,51-4,50)

Yepes y Silveira (2011) reportan que la productividad de las plantas depende de la disponibilidad de agua y de la eficiencia en su uso. En fique se han reportado comportamientos típicos de una planta con metabolismo CAM (Cadena et al., 2021), permitiéndole crecer bajo poca disponibilidad de agua, pero en este estudio se evidencia que su rendimiento se afecta cuando no presenta las precipitaciones adecuadas. Los valores de referencia que se tienen actualmente para el cultivo son entre 2,74 y 5,48 mm·día⁻¹ (MAVDT y MADR, 2006). Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que los límites de referencia necesitan ser reevaluados mediante estudios más detallados. Sin embargo, hasta el momento el fique no está creciendo en ambientes de sequía extrema, en dichas condiciones la producción de fibra seca se ve fuertemente afectada, permitiéndole sobrevivir sin obtener su mejor potencial. Bajo las condiciones de este experimento no se llegó a la sequía extrema.

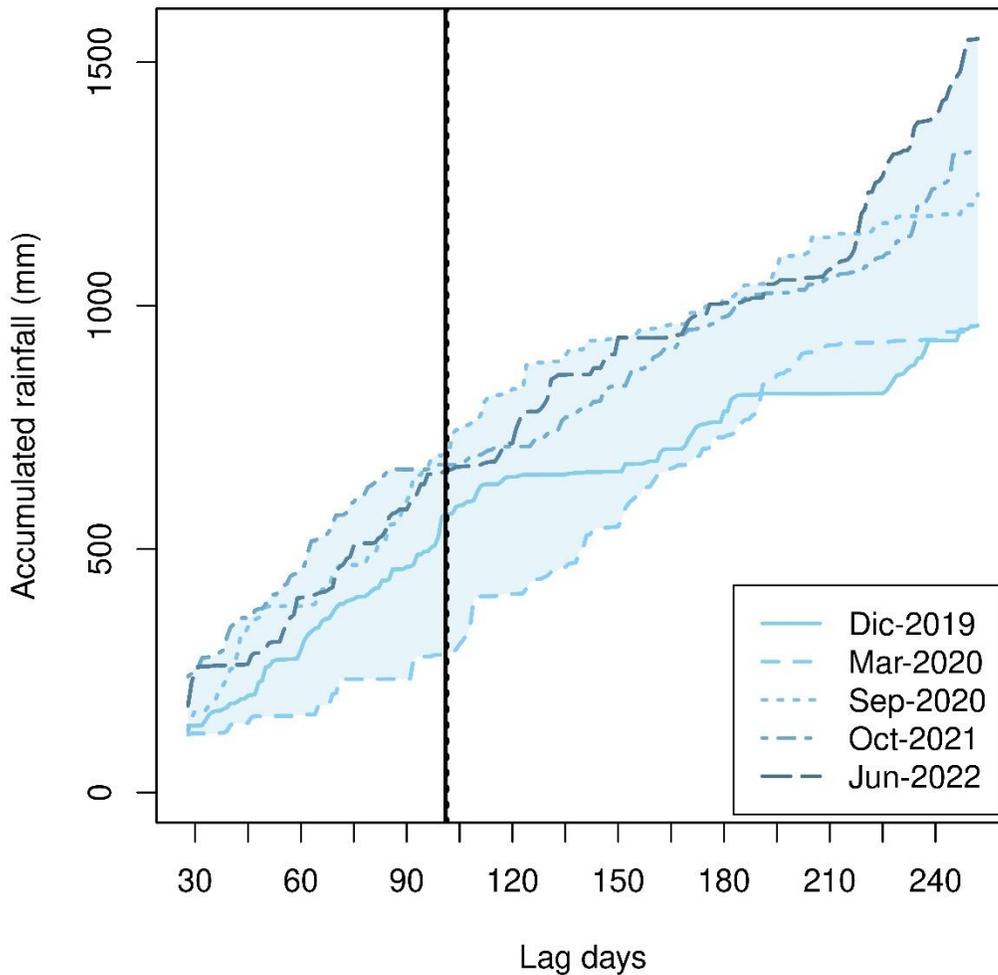


Figura 9. Precipitaciones acumuladas en función de los días de rezago para cinco ciclos de cosecha de fique (2019-2022). El área sombreada representa el rango entre los valores máximos y mínimos observados. Las líneas verticales indican los días de rezago asociados con la máxima correlación entre la precipitación acumulada y la producción de fibra seca por planta (línea continua) y el porcentaje de fibra seca (línea discontinua)

Por otro lado, durante el período de evaluación de 30 a 252 días antes de cosecha, la temperatura mínima promedio obtuvo correlaciones positivas cercanas a 0,5 en algunos puntos, pero por debajo del umbral de interés, mientras que las variables de radiación fotosintéticamente activa acumulada y temperatura máxima promedio, mostraron correlaciones bajas y negativas (Figura 8 a, b). Esto indica que el promedio de temperatura

mínima podría ser una variable meteorológica de interés para evaluarla más detalladamente en próximos ensayos.

En la actualidad se reporta que la temperatura media óptima promedio para el cultivo de fique está entre 17°C y 24°C (MAVDT y MADR, 2006). Para este ensayo la temperatura promedio obtenida con las temperaturas promedias máximas y mínimas fue de 18,2 °C (Tabla 1). A si podemos observar que usar la temperatura media enmascara el efecto que pueden tener las temperaturas mínimas en el cultivo. Aunque se definen condiciones ambientales óptimas para el mejor potencial de rendimiento del cultivo, se desconoce la capacidad y habilidad de adaptación del fique en sectores con pocas opciones de cultivo como es el caso de la guajira, que, aunque no se tengan los rendimientos más altos es una alternativa que proporciona recursos económicos al sector y ayuda con la seguridad alimentaria.

1.3.4. Selección de accesiones promisorias de fique

La producción mínima esperada de fibra seca ($\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$) presentó una mediana de 1,77 $\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ y las accesiones presentaron valores que oscilaron entre 0,28 y 3,01 $\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Se identificaron 23 accesiones que sobrepasan el rendimiento promedio de producción de fibra nacional de 1,2 $\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ (Agronet, 2021).

El porcentaje mínimo esperado de fibra seca (%) fue de 3,66 %, y los valores estimados para las acciones oscilaron entre 0,03 % y 5,19 %. Donde, 2 accesiones presentan porcentaje de fibra mínimo, que puede ser igual al porcentaje de aprovechamiento de fibra de las hojas, reportado en la literatura nacional del 4% el cual no ha sido validado por ningún estudio y se usa indiscriminadamente para cualquier material (Agronet, 2021; Salas, 2021).

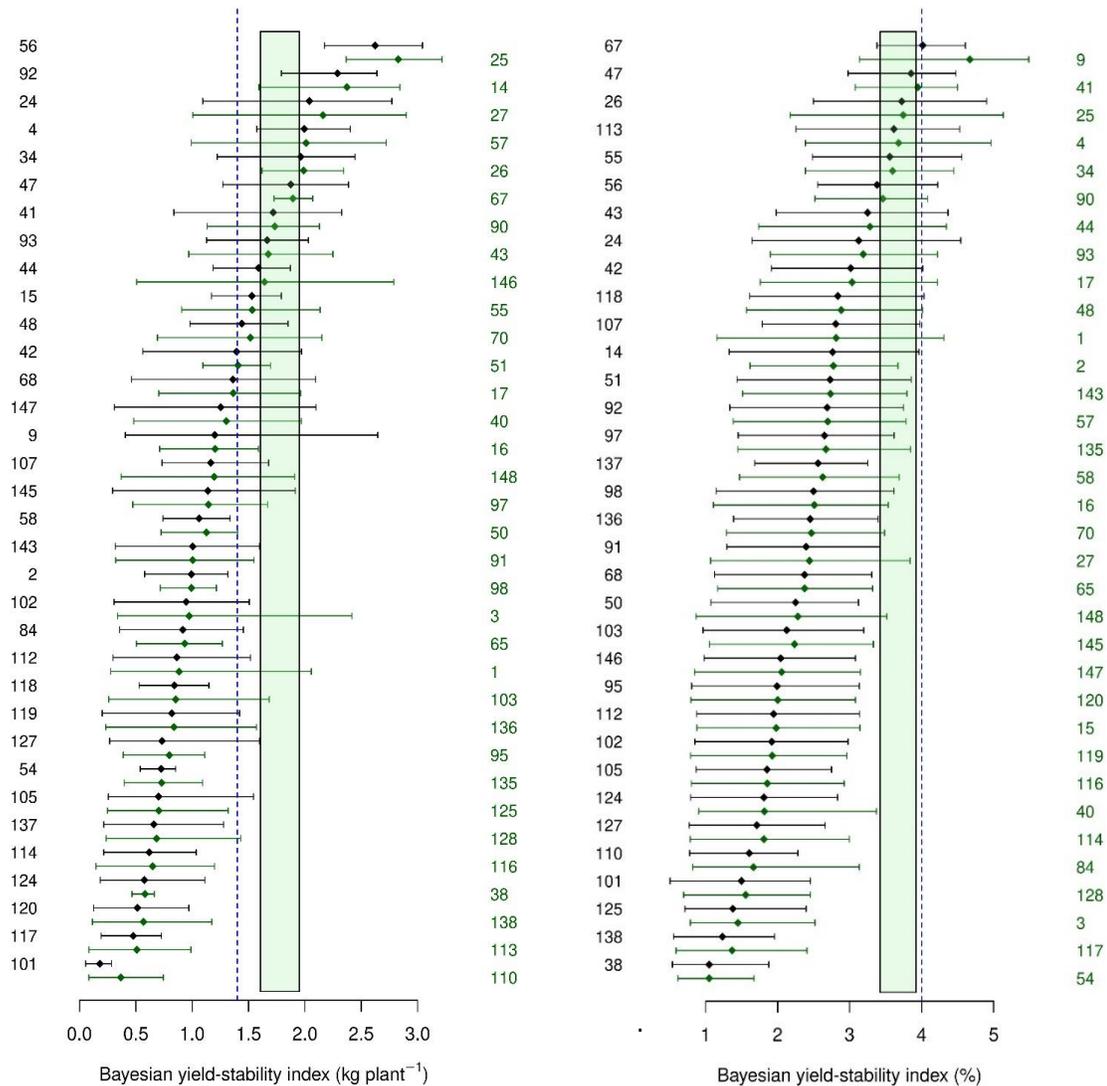


Figura 10. Análisis del índice bayesiano de rendimiento-estabilidad, a) Producción de fibra seca (kg planta⁻¹) y b) Porcentaje de fibra seca (%), con intervalos de alta densidad a *posteriori* de 90% durante cuatro ciclos de cosecha para 68 accesiones de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia. La franja color verde indica la mediana poblacional en cada variable y la línea vertical puntiaguda indica el promedio general nacional reportados.

Esta metodología permitió conocer la estabilidad de las variables de rendimiento de cada accesión e identificar las más promisorias. Si se considera que el cultivo de fique es una especie perenne, que se caracteriza por ser de ciclo largo, llevar todos los materiales de la colección de trabajo a pruebas de rendimiento, es económicamente inviable, por ello, la selección permite avanzar, disminuir tiempos y recursos en el programa de fitomejoramiento del cultivo, además, se lleva a campo solamente las mejores accesiones.

Este método de selección clonal ha sido utilizado en diferentes especies de *Agave*, Monja-Mio et al, (2019), iniciaron la selección en poblaciones silvestres o plantaciones comerciales, que presentaban alta heterogeneidad, donde identificaron individuos superiores en rendimiento, sanidad y tamaño. Estos primeros individuos dieron origen a la primera línea, para seguir con selecciones sucesivas hasta la obtención de variedades comerciales. Estudios similares de estabilidad en el rendimiento de fibra han sido evaluados en el cultivo de algodón (Aramendiz et al., 2007), lo que permitió la selección de líneas promisorias.

1.3.5. Selección combinada en plantas de fique

El en diagrama de dispersión se observa el comportamiento de índice de rendimiento-estabilidad para cada accesión respecto a las dos características evaluadas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). A partir de esta información se seleccionó de manera simultánea las accesiones que superaron los valores de $1,77 \text{ kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ de producción de fibra y 3,66 % de porcentaje de fibra, las cuales se ubicaron en el primer cuadrante. Estos valores corresponden a la mediana del parámetro de rendimiento-estabilidad para cada una de las características, lo que representa a las accesiones con los más altos valores y una baja varianza fenotípica. La mayoría de las accesiones se ubicaron por debajo de la media poblacional, es decir, en el tercer cuadrante del plano cartesiano (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Este tipo de metodología corresponde a la selección por niveles independientes (*independent culling*), donde en los programas de mejoramiento se seleccionan por dos o más características los mejores individuos (Martínez, 1999).

Batista et al, (2021), han utilizado la selección independiente para optimizar los programas de mejoramiento, siendo esta metodología útil y eficaz en ganancia genética de los materiales evaluados.

Para el cultivo de fique que es de ciclo largo y crecimiento lento, es importante identificar y seleccionar clonalmente plantas con varias características agronómicas estables durante los ciclos de selección, ya que se optimiza productividad.

25	Si	Antioquia	2012	2,82	2,36	3,21	3,74	2,17	5,13
56	No	Antioquia	1700	2,62	2,17	3,04	3,38	2,56	4,22
24	Si	Antioquia	NR	2,03	1,09	2,77	3,12	1,64	4,54
4	Si	Nariño	2217	1,99	1,57	2,4	3,67	2,39	4,96
26	Si	Antioquia	2011	1,98	1,61	2,34	3,72	2,5	4,9
34	Si	Antioquia	1443	1,96	1,22	2,44	3,59	2,38	4,45
67	Si	Antioquia	2080	1,89	1,72	2,06	4,01	3,38	4,61
47	Si	Santander	1642	1,87	1,27	2,38	3,85	2,98	4,47
90	No	Antioquia	1904	1,73	1,13	2,12	3,45	2,52	4,08
41	Si	Santander	1911	1,71	0,83	2,32	3,94	3,08	4,5

). Estas accesiones representan el 14,70 % de la población evaluada y fueron colectadas en los departamentos de Antioquia (70%), Nariño (10%) y Santander (20%). Se espera que sigan en el proceso de multiplicación *in vitro*, para establecimiento de futuras pruebas de rendimiento y evaluación agronómica, en diferentes regiones productoras de fique de Colombia.

Tabla 4. Accesiones de fique seleccionadas por rendimiento-estabilidad, producción de fibra seca (kg planta⁻¹) y porcentaje de fibra seca (%). mediana con intervalos de confianza, presencia o ausencia de espinas y procedencia del sitio de colectas.

Accesión	Espinass	Procedencia	msnm	Producción de fibra seca (kg planta ⁻¹)			Porcentaje de Fibra (%)		
				Mediana	Inferior	Superior	Mediana	Inferior	Superior
25	Si	Antioquia	2012	2,82	2,36	3,21	3,74	2,17	5,13
56	No	Antioquia	1700	2,62	2,17	3,04	3,38	2,56	4,22
24	Si	Antioquia	NR	2,03	1,09	2,77	3,12	1,64	4,54
4	Si	Nariño	2217	1,99	1,57	2,4	3,67	2,39	4,96
26	Si	Antioquia	2011	1,98	1,61	2,34	3,72	2,5	4,9
34	Si	Antioquia	1443	1,96	1,22	2,44	3,59	2,38	4,45
67	Si	Antioquia	2080	1,89	1,72	2,06	4,01	3,38	4,61
47	Si	Santander	1642	1,87	1,27	2,38	3,85	2,98	4,47
90	No	Antioquia	1904	1,73	1,13	2,12	3,45	2,52	4,08
41	Si	Santander	1911	1,71	0,83	2,32	3,94	3,08	4,5

1.4. Conclusiones

En la población de fique evaluada existe variabilidad en el rendimiento de las accesiones. Se encontraron accesiones con producción de fibra promedio de $1,91 \text{ kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ que supera los rendimientos promedios nacionales.

El coeficiente de repetibilidad para las variables de producción de fibra y porcentaje de fibra fue de $\tilde{r}=0,29$ y $\tilde{r}=0,14$; lo que permitió clasificarlas como repetibilidades bajas.

La precipitación acumulada y la temperatura mínima presentaron asociación positiva con el desempeño productivo de fique. Este estudio permitió identificar que los mayores rendimientos y porcentaje de fibra se ven influenciados positivamente cuando las precipitaciones oscilan entre 512 y 778 mm, distribuidos en un período crítico entre los 83 y 138 días antes de la cosecha.

Se logró la identificación y selección clonal de 10 accesiones promisorias por rendimiento de fibra mayores a $1,77 \text{ kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ y 3,66% de fibra, con estabilidad fenotípica, con escasa o nula floración, que permitirán aumentar los valores de producción de fibra seca y porcentaje de fibra nacional, esta selección permite avanzar en el programa de fitomejoramiento.

1.5. Bibliografía

Agronet (03 de febrero de 2021). *Estadísticas rendimiento nacional por cultivo de fique*. Minagricultura. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

ALSUM. Asociación Latinoamericana de Suscriptores Marítimos. (06 de agosto de 2023). *SISAL*. <https://alsum.co/handbook/sisal/>

Aramendiz, T.H., Espitia, C.M., Agámez, C.A., Cardona, A.C., Robles, G.J. (2007). *Estabilidad fenotípica de genotipos de algodón (Gossypium hirsutum L.) en el caribe colombiano*. Ciencias agropecuarias y biológicas. Rev, U.D.C.A Act, & Div, Cient, 10 (2): 65-73. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/585/519>

Batista, L.G., Gaynor, R.C., Margarido, G.R.A., Byrne, T., Amer, P., Gorjanc, G., Hickey J.M. (2021). Long-term comparison between index selection and optimal independent culling in plant breeding programs with genomic prediction. DOI: [10.1371/journal.pone.0235554](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235554)

Bayes, T. 1763. An essay towards solving a problema in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53: 370-418.

Box, G.E.P & Tiao, G.C. (1992). *In Bayesian Inference in Statistical Analysis*. Eds GEP Box y GC Tiao. Online ISBN:9781118033197. DOI:[10.1002/9781118033197](https://doi.org/10.1002/9781118033197)

Cadena Torres, J., Barragán Quijano, E., Romero Ferrer, J.L y Mercado, K. (2021). *Crecimiento foliar y comportamiento diario de la fotosíntesis en plantas de fique cv Ceniza (Furcraea cabuya Trelease)*. *Temas Agrarios* 26(2): 129-139: <https://doi.org/10.21897/ta.v26i2.2843>

Cargnelutti F.A., Castilhos, Z.M. de S., Storck, L., & Savian, J.F. (2004). *Análise de repetibilidade de caracteres forrageiros de genótipos de Panicum maximum, avaliados com e sem restrição solar*. *Ciência Rural*, 34(3), 723–729. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000300011>

Córdova Hugo (1991). *Estimación de parámetros de estabilidad para determinar la respuesta de híbridos de maíz (Zea mays L.) a ambientes contrastantes de centro América, Panamá y México*. Representante regional del programa de maíz de CIMMYT para Centro América y El Caribe. *AGRONOMIA MESOAMERICANA* Vol, 2. <https://www.maq.go.cr/revmeso/v02n01001.pdf>

Cotes Torres, J.M. (2022). *RGE: Respuesta del genotipo al ambiente, paquete R versión 1,0*. <https://cran.r-project.org/web/packages/RGE/RGE.pdf>

Cotes Torres, J.M., González Jaimes, E.P & Cotes Torres, A. (2012). *Selección de Genotipos con Alta Respuesta y Estabilidad Fenotípica en Pruebas Regionales: Recuperando el Concepto Biológico*. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 8(2). 226-243. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2037>

Dos Santos, C.E.M., Bruckner, C.H., Cruz, C.D., Siqueira, D.L., Pimentel, L.D & Rosado, L.D.S. (2010). *Repetibilidade em características do fruto do maracujazeiro*. Revista Ceres. 57(3), 343–350. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000300009>

Dos Santos Días, L.A & Kageyama, P.Y. (1998). *Repetibilidad y período mínimo de cosecha de cacao (Theobroma cacao L.) en el sur de Bahía*. Euphytica 102, 29-35. <https://doi.org/10.1023/A:1018373211196>

De Sousa-Vieira, O., Rea, R & Briceño, R. (2003). *Uso de la repetibilidad clonal en la selección de ambientes en ensayos regionales de variedades de caña de azúcar en los estados Lara y Yaracuy*. Bioagro, 15(2), 77-82. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612003000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Eurofique (11 de diciembre de 2022). *El valor agregado de la fibra natural del fique*. <https://eurofique.info/la-sostenibilidad-el-valor-agregado-de-la-moda-la-fibra-natural-del-fique/>

FAO (23 de febrero de 2023). *Fibras Naturales*. Obtenido de año internacional de las fibras naturales 2009. <http://www.naturalfibres2009.org>

FAO (18 de julio de 2023). *Fibras del futuro*. <https://www.fao.org/economic/futurefibres/pagina-principal-de-fibras-del-futuro/es/>

Falconer, D & Mackay, T. (1996). *Introduction to quantitative genetics*. Fourth edition. Prentice Hall, London, England. 136 p.

Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari A & Rubin, D.B. (2013). *Bayesian Data Analysis*. 3rd ed. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b16018>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, tela de fique*. <https://grupoexcala.com/producto/tela-fique/>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, manto de fique*. <https://grupoexcala.com/producto/mantocontroldeerosiondefique/>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, saco de fique*. <https://grupoexcala.com/producto/sacofiquecacaotero/>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, mochila de fique*. <https://grupoexcala.com/producto/mochilas/>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, sogas de fique*. <https://grupoexcala.com/categoria-producto/duracordel/sogas-fique/>

Grupo Excala. (11 de julio de 2023). *Productos de fique, hilos de fique*. <https://grupoexcala.com/producto/hilofique/>

Hadfield Jarrod. (2012). *Mcmclmm course notes*. https://www.researchgate.net/publication/265007277_mcmclmm_course_notes

Martínez, Orlando. (1999). *Conceptos y principios de genética cuantitativa con aplicación al mejoramiento de especies vegetales*. Pp 219.

MAVDT y MADR. (2006). *Guía ambiental del subsector fiquero*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. Segunda edición. https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/guia_ambiental_subsector_fiquero.pdf

Medina Cano C.I., Grisales Vásquez N.Y., Orozco Orozco L.F., Barbosa Ángel, E. S., Vargas Arcila, M.O & Cotes Torres, J.M. (2022). *Morphoagronomic characterization of a germplasm collection of Furcraea spp. And Agave spp.* Revista Ceres, 69(3), 283–293. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269030005>

Medina Cano, C.I., Vásquez Gallo, L.A., Tamayo Vélez Á.DJ., Vargas Arcila M & Henao Rojas J.C. (2022). *Diversity of soils in areas with the presence of Furcraea sp. In tropical ecosystems.* Agronomía Mesoamericana, 34(1), 49885. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49885>

Mendoza, A. (2000). *Desarrollo de variedades de algodón con altos porcentajes de fibra y productividad.* <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1690>.

Minagricultura (17 octubre de 2022). *Cadena de fique y su agroindustria.* <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2018-11-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Minagricultura (14 de octubre de 2023). *Plan estratégico de ciencia, tecnología e innovación del sector agropecuario colombiano cadena del fique y su agroindustria.* PECTIA 2016. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1463/110685_67961.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Monja Mio, K.M., Herrera Alamillo, M.Á., Sánchez Teyer L.F., Robert M.L. (2019). *Breeding strategies to improve production of Agave (Agave spp).* In: Al- Khayri J, Jain S, Johnson D (eds) *Advances in plant breeding strategies: industrial and food crops*. Springer, Cham. Chapter 10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8_10

Monsalve, D.A., Cotes, J.M, Navas, A.A & Córdoba, O.J. (2018). *Repetibilidad del rendimiento de sólidos totales en una población segregante de caucho (Hevea brasiliensis) en Colombia.* Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 71(1), 8407-8414. <https://doi.org/10.15446/rfna.v71n1.65827>

Mood, A.M., Graybill, F.A & Boes, D.C. (1974). *Introduction to the Theory of Statistics: McGraw-Hill.* Series in Probability and Statistics (3rd ed.). <https://doi.org/10.2307/2286195>

ONU. (22 de julio de 2023). *Noticias contaminación por plástico. Organización de las Naciones Unidas.* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos>

Padilla, J.S., González, E., Rodríguez, V.M., Reyes, L., Osuna, E.S & Acosta, E. (2014). *Varianza entre y dentro e índice de repetitividad de características cuantitativas de fruto de guayaba*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 5(8), 1423-1432. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263137780007>

Plummer, M., Best, N., Cowles, K & Vines, K. (2006). *Coda: Output analysis and diagnostics for MCMC* (versión 0.19-4). <https://cran.r-project.org/web/packages/coda/index.html>

R Core Team (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Resende, M.D.V (2002). *Genética biométrica y estadística en el desarrollo de plantas perenes*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília.

Salas, R.M. (2021). *La biomasa del fique, su potencial industrial, biocida y biocombustible*. Corporación para la Investigación Innovación e Industria- Colombia.

Sánchez, N.M., Vargas, J., Ruiz, L.D.M & López, J. (2004). *Repetibilidad de parámetros genéticos en un ensayo clonal en el sureste de México*. Agrociencia, 38 (4),465-475, ISSN: 1405-3195. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30200410>

UPB. (26 de noviembre de 2021). *Jean de fique, una alternativa de la fibra natural*. Universidad Pontificie Bolivariana. <https://www.upb.edu.co/es/noticias/patente-fibra-fique>

Zhang, J., Hu, Y., Chen, F., Zhou, Z & Sun, G. (2011). *Repeatability estimation and stability analysis of cotton (Gossypium hirsutum L.) Cultivars*. African Journal of Biotechnology, 10(66), 14802-14807. https://www.researchgate.net/publication/270592126_Repeatability_of_Yield_Stability_Statistics_in_Cotton/citation/d

Capítulo 2

Emisión foliar en cuatro ecotipos de *Furcraea* spp

Resumen

En Colombia el cultivo de fique es conocido comúnmente por diferentes nombres de ecotipos, que generalmente hacen referencia a las características fenotípicas de las plantas que los conforman. Para conocimiento del cultivo en este trabajo de investigación se realizó la emisión foliar de cuatro ecotipos. Agrosavia cuenta con una colección de trabajo de fique y especies relacionadas colectadas entre el 2013 y 2014. Se identificaron accesiones agrupadas como ecotipos, conocidos como bordo de oro, uña de águila, tunosa común y espinoso, Se realizó tres ciclos de evaluaciones durante 84 días, definidos como 2020, 2021 y 2022. Se contaron el número de hojas acumuladas por plantas, número de hojas nuevas, se midió largo y ancho de la última hoja emitida por individuo. Se realizó un análisis de componentes principales por ciclo, análisis de correlaciones entre variables con el rendimiento de fibra seca, la cual se usó como variable suplementaria. Se identificaron accesiones sobresalientes en ecotipos como uña de águila y tunosa común, que contrastan

en el grupo, con características de interés agronómico, Se obtuvo una tasa de emisión foliar entre 6 y 19 días. Además, la fibra seca tiene correlación positiva con el ancho y largo de la última hoja emitida, número de hojas nuevas y número de hojas acumuladas, presentó correlación negativa con la tasa de emisión foliar.

Palabras claves: Número de hojas, cabuya, producción, fibra.

Astract

In Colombia, the fique crop is commonly known by different names of ecotypes, which generally refer to the phenotypic characteristics of the plants that conform to them. For knowledge of the crop in this research work, the foliar emission of four ecotypes was carried out, Agrosavia has a working collection of fique and related species collected between 2013 and 2014. Accessions grouped as ecotypes were identified, known as bordo de oro, uña de águila, tunosa común and espinoso. Three cycles of evaluations were carried out over 84 days, defined as 2020, 2021, and 2022. The number of leaves accumulated per plant, number of new leaves, and length and width of the last leaf emitted per individual were counted. A principal component analysis was performed by cycle, correlation analysis between variables with dry fiber yield, which was used as a supplementary variable. Outstanding accessions were identified in ecotypes such as eagle's claw and common tunosa, which contrast in the group, with characteristics of agronomic interest. The leaf emission rate was obtained between 6 and 19 days. In addition, the dry fiber had a positive correlation with the width and length of the last leaf emitted, and the number of new leaves and the number of accumulated leaves presented a negative correlation with the leaf emission rate.

Keywords: Leaf number, cabuya, production, fiber.

2.1. Introducción

El cultivo de fique se ha desarrollado hace varios siglos, principalmente para la extracción de la fibra de las hojas. En Colombia se ha cultivado de manera permanente, con altos y bajos en la producción de la fibra a través del paso de los años. Actualmente, se reportan 11 departamentos productores en el país, donde las mayores áreas de siembra están concentradas en los departamentos de Nariño y Cauca, con el 45 y 36% del área total, respectivamente. Desde el año 2007 Agronet presenta datos estadísticos del rendimiento del cultivo y áreas de siembra nacional, se muestra un aumento de las plantaciones y número de departamentos productores. Se destacan los departamentos de Antioquia y Guajira como potenciales productores de fibra, donde en los últimos años se ha registrado una creciente área de siembra y rendimientos (Agronet, 2023; Minagricultura, 2021).

La Cadena Nacional del Fique y su Agroindustria fue constituida en el año 2004, conformada por productores, artesanos, instituciones públicas y privadas, representando los eslabones de la cadena (primario, artesanal, industrial, investigación y desarrollo tecnológico). Actualmente la fibra es usada para la fabricación de empaques de alimentos en el sector agrícola, destacándose como principales consumidores FEDEPAPA, FENALCE, FEDEARROZ Y FEDECAFE; existen otros usos de la fibra en la fabricación de artesanías, vestuarios, geomantos, entre otros (MAVDT y CADEFIQUE, 2006; Minagricultura, 2022).

Durante el año 2019, las exportaciones de fibra de fique se vieron afectadas debido a un déficit en su disponibilidad a nivel nacional, causado por la alta demanda interna, por lo cual, se importaron 0,4 t de fibras de yute para suplir las necesidades. Sin embargo, en el 2020 se observó un incremento en las exportaciones (577 t) de subproductos a base de fibra de fique como sacos, bolsas y empaques, lo que demuestra un potencial importante de este cultivo para suplir las demandas nacional e internacional (Minagricultura, 2021).

En la extracción de la planta de fique solo se usa el 4% del peso total de la hoja cortada, y el resto del porcentaje lo conforma el jugo en un 70%, las fibras cortas y bagazo con el 26%. La mayoría de los subproductos de fique son utilizados y manejados como residuos de cosecha sin ningún valor, por tal motivo el desarrollo de nuevas máquinas de extracción, están enfocadas en la separación de estos subproductos que puedan representar un valor

agregado y beneficios económicos para el productor como es el caso de Fiqueña, (Agrosavia, 2022; Salas, 2021).

Colombia y Venezuela son identificados como centros de diversidad del género *Furcraea* en el cual se reportan 24 especies, cinco están identificadas en Colombia, con diversos ecotipos; sin embargo, en la actualidad no se tiene certeza sobre el número de especies y diversidad que existe en los cultivos comerciales, ya que no se tiene control de la semilla utilizada para el establecimiento de campos agrícolas (Giraldo Cañas, 2019; Thiede, 2020).

Dentro de las plantaciones comerciales los productores de fique reconocen diversos ecotipos agrupados por las características morfológicas. Algunos de los nombres como los productores identifican y agrupan los diferentes plantas en ecotipos de fique son: uña de águila que se caracteriza por tener espinas y cultivarse sobre los 1200 msnm; bordo de oro son plantas sin espinas con un borde de color amarillo y espinas modificadas en estructuras similares a unas alas; ceniza son plantas sin espinas que se caracterizan por tener un color verde grisáceo, tienen fibras suaves y livianas; jardineña su fibra es resistente, también conocida como uña de águila en Antioquia; negra común conocida como uña de águila negra (Artesanías de Colombia, 2023; MAVDT y CADEFIQUE, 2006; Pérez, 1974).

En búsqueda de conservar el material de fique y ampliar el conocimiento de las especies existentes en el país, Agrosavia, en el Centro de Investigación La Selva, cuenta con una colección de trabajo conformada por 148 accesiones colectadas en 12 departamentos de Colombia, sobre el cual se viene trabajando para la identificación y selección de accesiones con características de interés agronómico.

El objetivo de esta investigación fue definir la emisión foliar de ecotipos de fique en tres ciclos de evaluación, para determinar la tasa de emisión foliar y relacionar el tamaño de las hojas con la producción de fibra seca.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Ubicación del experimento

El ensayo se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación La Selva, de La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria- Agrosavia, ubicado en Rionegro, Antioquia, con coordenadas geográficas de 6° 08' 06" de latitud, 75° 25' 3" de longitud y a 2,120 msnm (Medina et al., 2022). Durante el período del experimento se presentaron condiciones meteorológicas diarias definidas en la Tabla 5 (IDEAM, 2022; NasaPower, 2023):

Tabla 5. Variables meteorológicas registradas durante los períodos de evaluación entre los años 2020 y 2022.

Variables meteorológicas	Tmedia	Tmax	Tmin	Precipitación
Mínimo	14,6	17,8	8,1	0
Media	16,9	24,5	12,6	4,2
Máximo	19,5	28,6	17,4	46,1

Tmin: temperatura mínima (°C); Tmax: temperatura máxima (°C); Tmin: temperatura mínima (°C).

2.2.2. Material vegetal

Se identificaron cuatro ecotipos de fique conocidos como bordo de oro, uña de águila, espinoso y tunosa común, es esta información fue obtenida de los datos de pasaporte al momento de la colecta. Cada ecotipo estuvo conformado por dos accesiones y cada una de ella conformada por cinco plantas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 6. Accesiones de fique agrupadas por ecotipos dentro de la colección de trabajo de Agrosavia.

Ecotipos	Bordo de oro		Espinoso		Tunosa común		Uña de águila	
	F51	F56	F41	F45	F40	F9	F1	F50
ID	1	2	3	4	5	6	7	8

Usando los datos previos de la caracterización morfológica de las accesiones de la colección de trabajo de fique realizados por Medina et al. (2022), se generó la descripción de los ecotipos evaluados, de la siguiente manera:

Bordo de oro: Las hojas tienen diferentes formas entre las que se encuentran ensiformes, lanceoladas o ampliamente lanceoladas, con superficie cóncava; en hojas jóvenes el margen foliar presenta antocianinas, el ápice tiene ángulos entre los 20-45° y 45-89°, pueden tener apéndice ausente o en forma de mucrón, el limbo de superficie lisa en el haz y en el envés puede ser liso o rugoso. En promedio sus hojas miden 201,1 cm de largo, 22,5 cm de ancho y 2,4 mm de grosor. Se caracterizan por no presentar espinas, algunas presentan estructuras dentadas, rudimentos de espina o alas en la base de las hojas.

Espinoso: Las hojas tienen formas lanceoladas con superficie cóncava, margen foliar espinoso con antocianinas en hojas jóvenes, ápice en ángulo entre 20 y 45°, apéndice con forma de mucrón. En promedio miden 197,2 cm de largo, 21,5 cm de ancho y 2,2 mm de grosor. Las espinas se distribuyen a lo largo del margen foliar, son de color amarillo rojizo, en el ápice y parte media son encorvadas hacia arriba, en la parte baja son encorvadas hacia abajo y rectas, en promedio miden 5,7 mm de largo y 1,9 mm de ancho.

Tunosa común: Las hojas tienen forma lanceoladas y ampliamente lanceoladas, con superficie cóncava, margen foliar espinoso con antocianina en hojas jóvenes, ápice en ángulos entre 20 y 45°, apéndice en forma de mucrón, en promedio miden 202,1 cm de largo, 22,9 cm de ancho y 2,1 mm de grosor. Las espinas se distribuyen a lo largo del margen foliar, son de color amarillo rojizo, en promedio miden 6,6 y 1,8 mm de largo y ancho.

Uña de águila: Las hojas son lanceoladas y ampliamente lanceoladas con superficie cóncava, margen foliar espinoso, ápice en ángulo entre 20 y 45°, apéndice en forma de mucrón y aguijón, en promedio miden 202,9 cm de largo, 23,4 cm de ancho y 2,1 mm de grosor. Sus espinas se distribuyen a lo largo del margen folia pueden ser de color rojizo o amarillo-rojizo, en promedio miden 7,2 mm de largo y 2,1 mm de ancho.

2.2.3. Ciclos de evacuación

Las evaluaciones iniciaron en el año 2019A con un total de 80 plantas en seguimiento; a inicios del 2020 las evaluaciones se suspenden por la emergencia sanitaria del COVID 19, se reinició un nuevo ciclo de evaluación en el 2020B hasta el año 2022, lo que condujo finalmente al análisis de solo tres ciclos de evaluación denominados C3 (2020), C4 (2021) y C5 (2022). Las evaluaciones de crecimiento iniciaron después de cada cosecha, registrando información cada 14 días hasta completar siete evaluaciones por ciclo, para un total de 84 días de evaluación por ciclo.

De las cuatro accesiones por ecotipo inicialmente propuesta, solamente dos completaron los tres ciclos de evaluación, debido a problemas de floración, muchas de las accesiones murieron, ya que el fique es una especie monocárpica. Este fenómeno puede estar asociado con las fluctuaciones de temperatura y baja precipitación. Así mismo, Cadenas et al. (2021) menciona incrementos de floración espontánea en los cultivos de fique a causa del calentamiento global.

2.2.4. Variables evaluadas

Las variables registradas en cada accesión fueron: número de hojas nuevas (HN), número de hojas totales (NHT), largo de la última hoja emitida (LHE), ancho de la última hoja emitida (AHE) (Figura 12). Con esta información se calculó la tasa de emisión foliar de cada planta (6):

Ecuación 8:

$$TEF_a = \frac{t_c}{(NHT_f - NHT_i)}$$

Donde, TEF_a son los días necesarios para la emisión de una hoja a (1,2...8); t_c son los días de evaluación por ciclo c (1,2,3,4...84); NHT_f : número de hojas final; NHT_i : número de hojas inicial.

Además, se tomó como variable suplementaria la fibra seca por accesión (Fibra), los datos de cosecha fueron realizados al finalizar los ciclos de evaluación, las cuales fueron registradas como la producción de fibra seca por planta⁻¹.



Figura 12. Evaluación de emisión foliar de cuatro ecotipos de fique pertenecientes a la colección de trabajo de Agrosavia, durante tres ciclos de evaluación.

2.2.5. Análisis estadístico

Se obtuvo la media de cada variable para cada ecotipo y por accesión para cada ciclo de evaluación. Para cuantificar la asociación entre las variables se realizó una matriz de correlación de Pearson ($\hat{\rho}$), incluyendo los valores promedios de cada variable en los tres ciclos de evaluación. Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para evaluar la heterogeneidad entre las accesiones dentro de los ecotipos para cada ciclo de evaluación. Para el análisis de los datos se utilizó el entorno estadístico R Core Team (2023).

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Desarrollo de hojas por ecotipos y accesiones

Durante los ciclos de evaluación se encontraron cambios en el NHT, a diferencia del resto de las variables evaluadas, las cuales obtuvieron similitud en el comportamiento (Tabla 7). El valor más alto de NHT promedio de los ecotipos fue en el ciclo C4, esta respuesta pudo estar relacionada con el mayor tiempo entre una cosecha y otra, desde el C3 al C4 hubo un período mayor entre cosecha, el cual fue de 13 meses. Además, el número de hojas que se deja en la planta después de cosecha es variable, un factor que no se puede contrarlar al momento de iniciar las evaluaciones.

Se destacan valores más altos de HN, AHE y Fibra en los ecotipos uña de águila y tunosa común (Tabla 7). La TEF más alta se presentó en bordo de oro. En promedio los ecotipos de fique evaluados producen entre 5 y 9 hojas nuevas por plantas, en un período de 84 días, mientras que, Cadena et al. (2021) en el ecotipo ceniza, obtuvo una ganancia de 10 hojas por planta, igualando los mismos días de evaluación a esta investigación.

La fibra por ecotipo presentó mayores valores en uña de águila y tunosa común en todos los ciclos de evaluación. Al ser los ecotipos un tipo de agrupación muy general, evaluar los individuos que conforman los ecotipos es importante para determinar la variabilidad o similitud entre ellos.

Tabla 7. Medias de variables de hojas, evaluadas en cuatro ecotipos pertenecientes a la colección de trabajo de fique en La Selva Agrosavia, en tres ciclos de evaluación (2020 a 2022).

Ciclos	Ecotipos	HN	NHT	LHE	AHE	TEF	Fibra
C3 (2020)	Bordo de oro	5	28	217	18,7	16,0	2,55
	Espinoso	6	24	213	18,6	9,0	2,37
	Tunosa común	8	30	228	21,4	12,5	3,53
	Uña de águila	8	32	218	21,5	12,5	3,32
	Media	6	29	219	20,0	13,0	2,9
C4 (2021)	Bordo de oro	7	33	213	17,3	11,0	1,86
	Espinoso	5	29	210	18,4	13,0	1,94
	Tunosa común	7	35	226	19,8	10,5	3,89
	Uña de águila	7	36	220	21,0	12,0	3,58
	Media	7	33	217	19,0	12,0	2,8
C5 (2022)	Bordo de oro	6	28	207	18,1	13,0	1,62
	Espinoso	7	25	207	17,5	8,0	2,14
	Tunosa común	9	26	226	20,4	9,5	3,43
	Uña de águila	8	25	218	20,7	12,0	3,35
	Media	8	26	214	19,0	11,0	2,6

HN: hojas nuevas (unidad), NH: número de hojas (unidad); TEF: tasa de emisión foliar (días), LHE: largo de la última hoja emitida (cm), AHE: ancho de la última hoja emitida (cm), Fibra: fibra seca (kg planta⁻¹).

En la Figura 13, se observa las variaciones entre los individuos que conforman los ecotipos. Respecto a la variable de NH no se presentó similaridad dentro de uña de águila, tunosa común y bordo de oro (Figura 13 a). Identificando que las accesiones dentro de los ecotipos tienen comportamientos diversos.

Respecto HN, se registró un mínimo de cuatro y un máximo de 11 hojas por planta (Figura 13 b). Los ecotipos bordo de oro y espinoso presentaron estabilidad en la media de cada accesión, a diferencia de los ecotipos uña de águila y tunosa común, que presentan variaciones de 3 a 10 hojas entre las accesiones evaluadas, este tipo de variación contrastante se debe a que no existe una clasificación morfológica ni taxonómica para realizar esta agrupación.

El LHE (Figura 13 c), solo presentó similitud en las accesiones del ecotipo tunosa común, las demás accesiones mostraron variaciones. Se presentó entre todas las accesiones un

valor mínimo de 185 cm y un máximo de 250 cm de largo de hoja. Para el AHE, presentaron valores entre los 17 y 23,7 cm.

El ancho y largo de las hojas son características que se deben tener en cuenta al momento de realizar selección de plantas que favorezcan los rendimientos. Entre las estrategias de mejoramiento de *Agave* spp, Monja-Mio et al. (2019) evaluaron como atributos de interés el número, largo y ancho de las hojas, para realizar la selección clonal de plantas para la producción de fibra. Fique con comparación con agave, presenta mayores valores en estas características, lo que favorece la mayor extracción de fibra seca y competitividad del cultivo.

Figura 13 e, se evidencia la variación entre las accesiones, donde la accesión F9 y F1 presentan valores superiores a 5 kg·planta⁻¹ de fibra seca. A diferencia de sus compañeras dentro del ecotipo, las cuales presentan valores por debajo de los 3 kg·planta⁻¹.

Las accesiones evaluadas en este trabajo presentaron variabilidad dentro de los ecotipos y no es recomendable en programas de fitomejoramiento realizar este tipo de agrupación. Este resultado concuerda con los grupos conformados a partir de la caracterización morfológica de la colección de trabajo de fique, realizada por Medina et al. (2022), donde las accesiones evaluadas quedaron en grupos diferentes del dendograma, en comparación con la agrupación de los ecotipos. Además, Guzmán et al. (2023) reporta una alta variabilidad entre las accesiones de fique en sus rasgos cuantitativos, resaltando las variables de ancho y largo de hoja, como las características con más altas variaciones. Son accesiones provenientes de diferentes departamentos de Colombia, con características de adaptación en diferentes pisos térmicos. Además, esta colección está conformada por dos géneros *Furcraea* y *Agave*, y dentro del primer género se han logrado identificar a nivel taxonómico especialmente por floración, que existen diferentes especies dentro de la colección de fique por trabajos propios, incluso plantas que se agrupan dentro del mismo ecotipo pertenecen a especies diferentes.

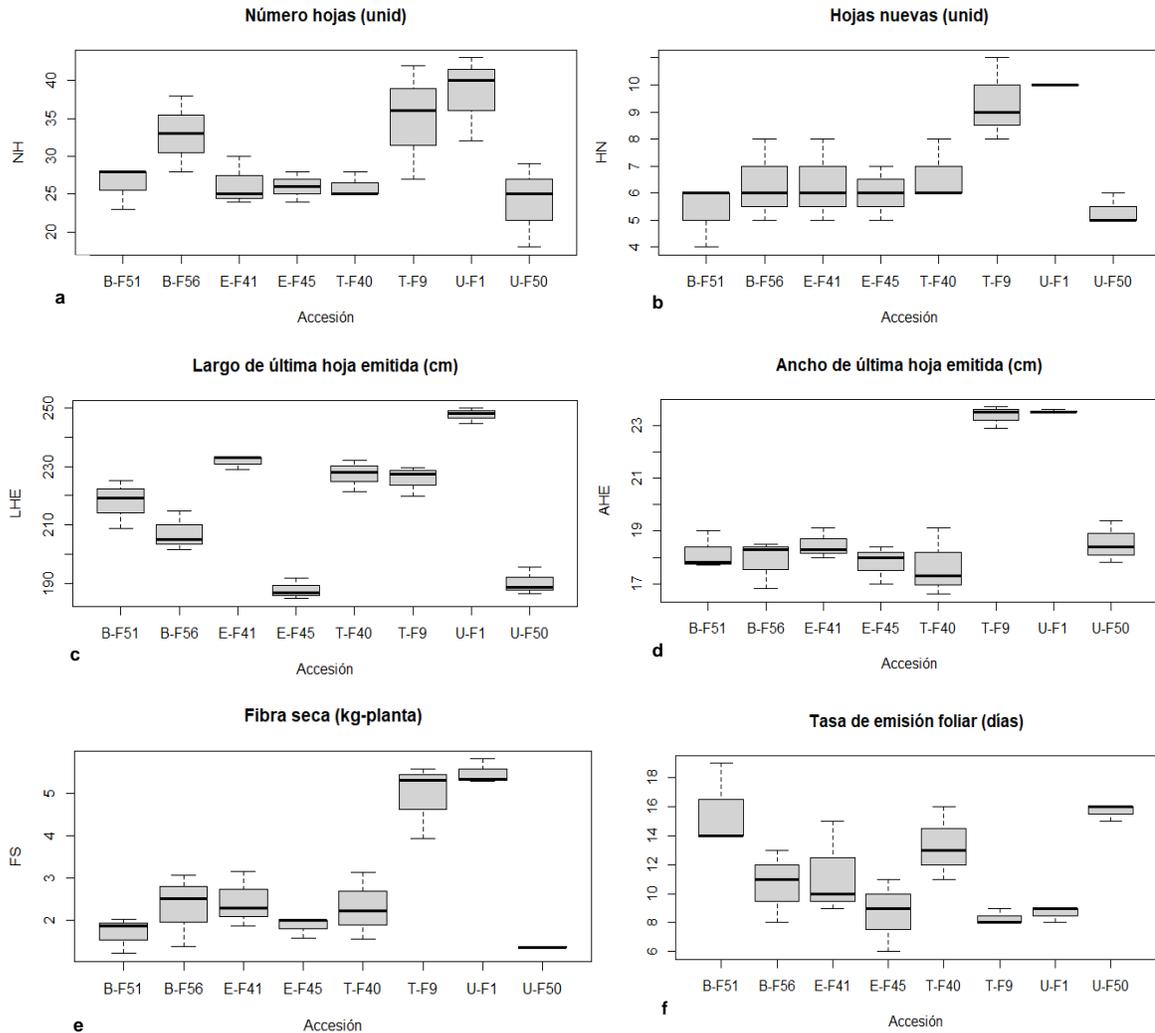


Figura 13. Gráfico de cajas y bigotes por accesión de fique en tres ciclos de evaluación a) número de hojas, b) hojas nuevas, c) largo de última hoja emitida, d) ancho de la última hoja emitida, Las letras en el eje X, representan el ecotipo por el cual se seleccionó la accesión, B: bordo de oro, E: espinoso, T: tunosa común, U: uña de águila.

2.3.2. Asociación de variables de crecimiento de hojas

La TEF presentó correlación fenotípica negativa con la producción de fibra seca (Fibra), en todos los ciclos de evaluación (Tabla 8), a mayor número de días para emitir una hoja, menor fue el rendimiento de fibra seca por planta. Las demás variables presentaron correlaciones positivas respecto al rendimiento, se destaca la alta correlación de Fibra con el LHE y AHE. Ambas características de hojas ancho y largo deberían ser incorporado en características de selección de plantas de fique, para favorecer el rendimiento de fibra.

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre la variable suplementaria de rendimiento de fibras seca y variables de crecimiento de hojas, en cuatro ecotipos de fique durante en tres ciclos de evaluación, Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia, Colombia, 2020-2022.

Ciclos	VARIABLES	NHT	LHE	AHE	TEF	Fibra
C3	HN	0,39	0,05	0,21	-0,23	0,19
	NHT		0,5	0,74	-0,48	0,69
	LHE			0,5	-0,45	0,78
	AHE				-0,54	0,72
	TEF					-0,68
C4	HN	0,37	0,02	0,17	-0,28	0,25
	NHT		0,21	0,66	-0,69	0,81
	LHE			0,38	-0,05	0,43
	AHE				-0,44	0,85
	TEF					-0,72
C5	HN	0,39	0,05	0,21	-0,23	0,19
	NHT		0,5	0,74	-0,48	0,69
	LHE			0,5	-0,45	0,78
	AHE				-0,54	0,72
	TEF					-0,68

HN: hojas nuevas (unidad), NHT: número de hojas (unidad), LHE: largo de la última hoja emitida (cm), AHE: ancho de la última hoja emitida, TEF: tasa de emisión foliar (días), Fibra: producción de fibra seca (kg-planta⁻¹)

Entre las variables NHT y AHE presentaron correlación promedio en los tres ciclos de 0,71; caso contrario en especie de *Agave*, donde la correlación es baja (Alfaro et al., 2007). El poder identificar este tipo de características favorables en las hojas de fique, mejora los

criterios de una selección mucho más eficiente en el programa de mejoramiento de la especie.

2.3.3. Análisis discriminante dentro de los ecotipos

El análisis de componentes principales permitió identificar accesiones sobresalientes dentro de los ecotipos, A través de la nube de puntos, se observó la cercanía entre las accesiones y las variables que mejor las describen (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Los ACP en todos los ciclos, explicaron más del 75% de la variabilidad entre las accesiones, comprendidos en las dos primeras dimensiones. Las variables evaluadas obtuvieron valores propios en cada componente y la variabilidad generada por cada una de ellas (Tabla 9), donde la TEF no generó variabilidad en el componente 1. La TEF se encuentra en el componente 2 y el resto de las variables de crecimiento de hojas en el componente 1 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En todos los ciclos de evaluación se observa separación de los individuos pertenecientes a los ecotipos uña de águila y tunosa común, no se observa una agrupación fija por los ecotipos, notándose variabilidad entre ellos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), por lo cual la agrupación por ecotipos no es ideal.

Tabla 9. Valor de variabilidad en dos dimensiones de las variables de hojas en tres ciclos de evaluación comprendidos entre el 2020 y 2022 en ocho accesiones de fique

Ciclos	VARIABLES	Dim.1	Dim.2
2020	HN	0,97330315	0,17333689
	NHT	0,91735447	0,273165
	TEF	-0,6535345	0,73585648
	LHE	0,73384925	0,33543618
	AHE	0,93759517	0,16304288
2021	HN	0,97330315	-0,1733369
	NHT	0,91735447	0,273165
	TEF	-0,6535345	0,73585648
	LHE	0,73384925	0,33543618
	AHE	0,93759517	0,16304288
2022	HN	0,97330315	-0,1733369
	NHT	0,91735447	0,273165
	TEF	-0,6535345	0,73585648
	LHE	0,73384925	0,33543618
	AHE	0,93759517	0,16304288

HN: hojas nuevas (unidad), NHT: número de hojas (unidad), LHE: largo de la última hoja emitida (cm), AHE: ancho de la última hoja emitida, TEF: tasa de emisión foliar (días), Fibra: producción de fibra seca (kg·planta⁻¹)

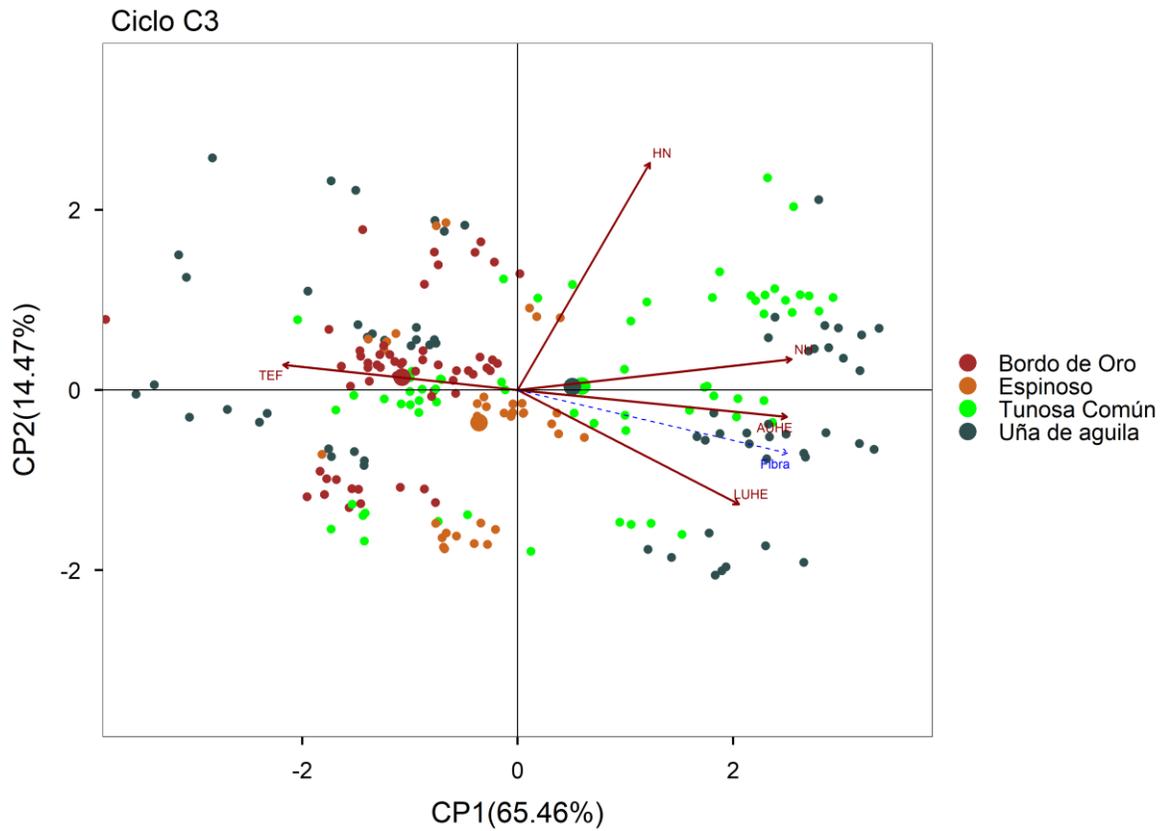


Figura 14. Representación bi-dimensional del análisis de componentes principales para el ciclo de evaluación 2020 de ocho accesiones de fique (*Furcraea* spp.) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia

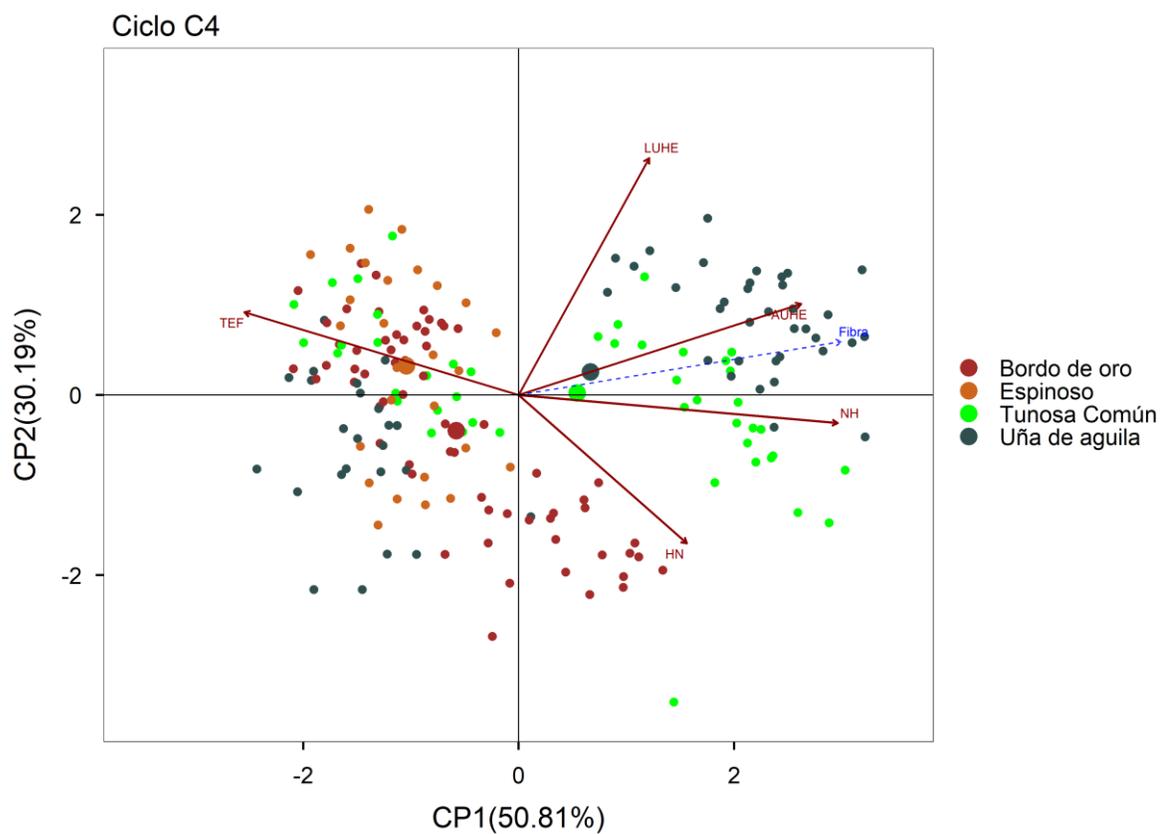


Figura 15. Representación bidimensional del análisis de componentes para el ciclo de evaluación 2021 de ocho accesiones de fique (*Furcraea* spp.) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia

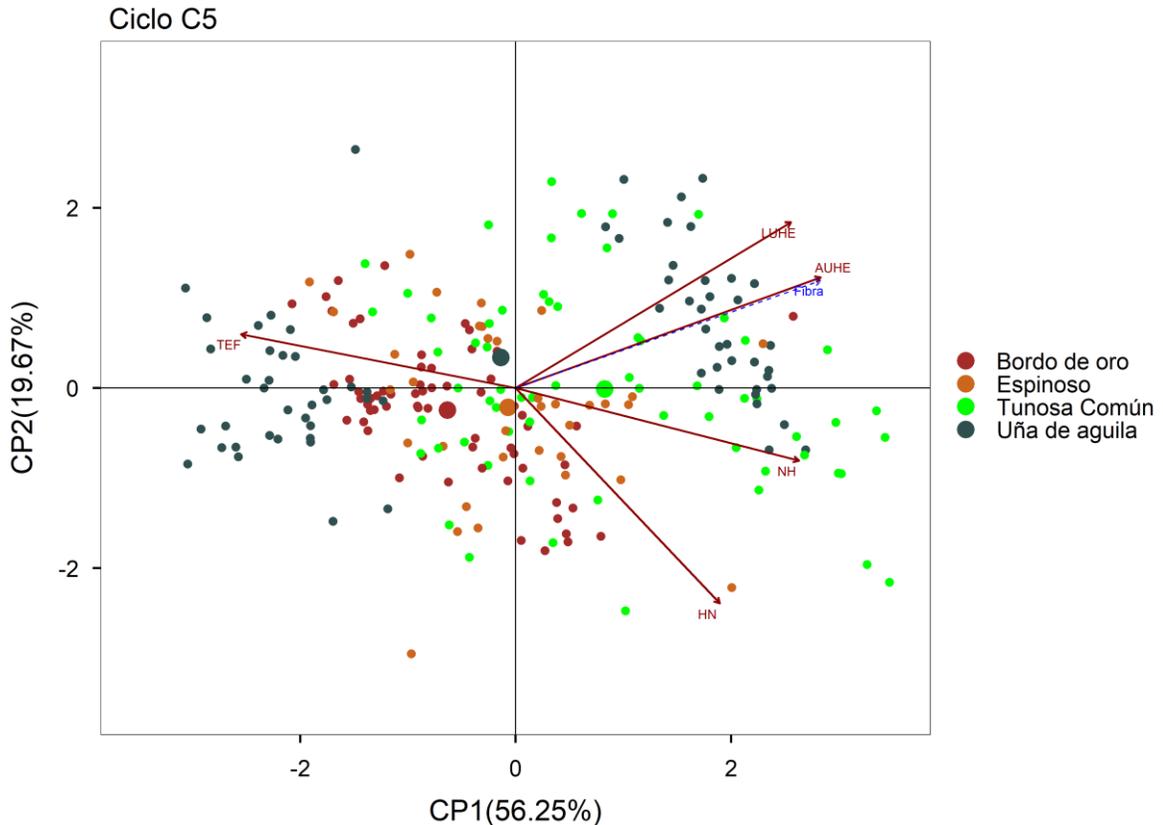


Figura 16. Representación bidimensional del análisis de componentes principales para el ciclo de valuación 2022 de ocho accesiones de fique (*Furcraea* spp.) pertenecientes a cuatro ecotipos presentes en la colección de trabajo de fique de Agrosavia en el centro de investigación La Selva, Rionegro, Antioquia

De acuerdo con los componentes 1 y 2 de los ACP graficados en el plano cartesiano, se puede observar una amplia dispersión entre las accesiones de los ecotipos evaluados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La media general por ecotipo se identifica por un círculo de mayor tamaño, se observó que con esta media se estaba sobre calificando o castigando algunas accesiones. La TEF está relacionada especialmente con las accesiones del ecotipo bordo de oro, que registró el mayor número de días para emitir hojas nuevas, (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

De las accesiones evaluadas se destacan la F9, del ecotipo tunosa común y la F1, del ecotipo uña de águila, que se encuentran relacionadas con la fibra, LHE y AHE. Además, presentaron los valores más altos en las variables de crecimiento de hojas durante todos los ciclos de evaluación. Trabajos similares fueron realizados por Alfaro et al, (2007) para definir semejanzas e identificación de grupos de agaves en la población estudiada, la cual no correspondió a la agrupación realizada por los productores.

Son pocos los trabajos que describan la fisiología de los ecotipos de fique en edad productiva (Cadena et al., 2021; Ortiz, 2022). Los ecotipos siempre se han relacionado con ciertas características morfológicas como presencia y ausencia de espinas, algunas coloraciones de las hojas y por lo general se agrupan por la localidad donde se cultivan.

Este tipo de variables solo permiten identificar variaciones de los ecotipos de tipo cualitativo, pero las evaluaciones tipo cuantitativo permiten estimar mayores diferencias. Es importante destacar que dentro de los ecotipos se encuentran accesiones con características agronómicas superiores, lo cual indica que no se deben agrupar y asociar únicamente en función de la morfología. Además, al momento de la colecta se encontraron ecotipos distribuidos en diferentes departamentos de Colombia.

2.4. Conclusiones

El número de hojas nuevas, número de hojas totales, ancho y largo de la hoja se asociaron positivamente con el rendimiento de fibra, mientras que la tasa de emisión foliar no es importante.

El largo y ancho de las hojas pueden ser sugeridos como criterios de selección en el programa de mejoramiento genético.

La tasa de emisión foliar promedio de los ecotipos de fique fue de 11 días.

Dentro de los ecotipos uña de águila y tunosa común se observó variabilidad, destacándose respectivamente F1 y F9 para las variables agronómicas evaluadas.

2.5. Recomendaciones

Para el programa de mejoramiento genético y descripción de las características cuantitativas del fique, no se deben considerar aspectos de agrupamientos por ecotipos por la variabilidad encontrada.

Se debe evaluar y definir la edad de potencial máximo productivo del cultivo de fique.

Se recomienda evaluar a mayor detalle la temperatura mínima en próximas investigaciones.

2.6. Bibliografía

Agrosavia. (05 de diciembre de 2022). Noticias web, *Fiqueña en centros de beneficio: aporte a la revolución del fique*. <https://www.agrosavia.co/noticias/fique%C3%B1a-en-centros-de-beneficio-un-aporte-a-la-revoluci%C3%B3n-de-la-agroindustria-del-fique-bajo-el-enfoque-de-sostenibilidad>

Agronet (15 de febrero de 2023). *Estadísticas del fique en área y producción del cultivo de fique en Colombia*. <https://agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

Alfaro Rojas, G., Legaria Solano, J.P & Rodríguez Pérez, J.E. (2007). *Diversidad genética en poblaciones de agaves pulqueros (Agave spp.) del nororiente del Estado de Mexico*. Revista Fitotecnia Mexicana, 30 (1),1-12, ISSN: 0187-7380. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61030101>

Artesanías Colombia. (15 de junio 2023). *Ficha Caracterización del Fique (Furcraea andina)*. Identificación de necesidades y fortalecimiento de la actividad artesanal en el departamento del Cauca. <https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/bitstream/001/4859/13/INST-D%202015.%20150.%2011.pdf>

Cadena Torres, J., Barragán Quijano, E., Romero Ferrer, J.L y Mercado, K (2021). *Crecimiento foliar y comportamiento diario de la fotosíntesis en plantas de fique cv Ceniza (Furcraea cabuya Trelease)*. Temas Agrarios 26(2): 129-139. <https://doi.org/10.21897/rta.v26i2.2843>

Giraldo-Cañas, D. (2020). *Una especie nueva de Furcraea (Agavácea) de Colombia*. Darwiniana, nueva serie 8(2): 499-508. [10.14522/darwiniana.2020.82.917](https://doi.org/10.14522/darwiniana.2020.82.917)

Guzmán, M., Medina, C., Orozco, L., Vargas M. (2023). *Diversity of Furcraea populations in Colombia: an approach to its harnessing in plant breeding programs*. Genet Resour Crop Evol. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01562-3>

IDEAM. (2022). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

MAVDT y CADEFIQUE. (2006). *Guía ambiental del subsector fiquero, 2ª ed, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y Cadena Productiva Nacional del Fique*. <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6697/1/2007222154336GuiaAmbientaFiguera2006.pdf>

Medina Cano, C.I., Grisales Vásquez, N.Y., Orozco Orozco, L.F., Barbosa Ángel, E.S., Vargas Arcila, M.O & Cotes Torres, J.M. (2022). *Morphoagronomic characterization of a germplasm collection of Furcraea spp And Agave spp*. Revista Ceres, 69(3), 283–293. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269030005>

- Minagricultura. (17 octubre de 2022). *Cadena de fique y su agroindustria*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2018-11-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Minagricultura. (09 de marzo de 2021). *Cadena agroindustrial del fique*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Monja-Mio, K.M., Herrera-Alamillo, M.Á., Sánchez-Teyer, L.F., Robert, M.L. (2019). *Breeding strategies to improve production of Agave (Agave spp.)*. In: Al- Khayri J, Jain S, Johnson D (eds) *Advances in plant breeding strategies: industrial and food crops*. Springer, Cham, Chapter 10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8_10
- NasaPower. (07 de febrero de 2023). *Aplicación de mapeo web con capacidad de respuesta que proporciona subconjuntos de datos, gráficos y herramientas de visualización en una interfaz fácil de usar*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ortiz González, D. (2022). *Vuelcos de fique (Furcraea macrophylla) y sus repercusiones agronómicas*. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (3), 48193. <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48193>
- Pérez Mejía, J.A. (1974). *El fique, su taxonomía, cultivo y tecnología*, Segunda edición. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18423/43254_51200.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- R Core Team (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Salas, R.M. (2021). *La biomasa del fique, su potencial industrial, biocida y biocombustible*. Corporación para la Investigación Innovación e Industria- Colombia.
- Thiede, J. (2020). *Furcraea AGAVACEAE*, In: Egli U, and Nyffeler R, (eds) *Monocotyledons, Illustrated Handbook of Succulent Plants*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56486-8_106