



Diversidad morfo-agronómica de accesiones de *Manihot esculenta* Crantz: Implicaciones de conservación y manejo genético

Morpho-agronomic diversity of *Manihot esculenta* Crantz accessions: Implications for conservation and genetic management

Del Rosario-Arellano, J.L.¹ , Meneses-Márquez, I.² , Cruz-Moreno, F.Z.¹ , Serna-Lagunes, R.¹ , Leyva-Ovalle, O.R^{1*} , Andrés-Meza, P.¹ , Verdejo-Lara, R.A.¹ , Llarena-Hernández, C.R.¹ , Diaz-José, J.¹ 

¹ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Córdoba-Orizaba. Universidad Veracruzana. Calle Josefa Ortiz de Domínguez, S/N, Col. Centro, C.P. 94950, Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Cotaxtla. Km 34 carretera Veracruz-Córdoba, C.P. 94270, Medellín de Bravo, Veracruz, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Del Rosario-Arellano, J.L., Meneses-Márquez, I., Cruz-Moreno, F.Z., Serna-Lagunes, R., Leyva-Ovalle, O.R., Andrés-Meza, P., Verdejo-Lara, R.A., Llarena-Hernández, C.R., Diaz-José, J. (2025). Morpho-agronomic diversity of *Manihot esculenta* Crantz accessions: Implications for conservation and genetic management. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1719. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1719>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: August 20th 2024.

Accepted/Aceptado: July 30th 2025.

Available on line/Publicado: August 15th 2025.

RESUMEN

La evaluación de la variación de germoplasma vegetal es importante para clasificar e identificar las características deseables para mejoramiento y conservación de los cultivos. El objetivo del estudio fue analizar la diversidad morfo-agronómica de accesiones de yuca en la región Las Montañas, Veracruz, México. La diversidad morfogenética de 11 accesiones de yuca se determinó con el índice de Shannon (H') y el coeficiente de similitud de Jaccard (J') a partir de 33 caracteres cualitativos. Un análisis de componentes principales (PCA) y conglomerados se aplicó a 15 caracteres cuantitativos. Los caracteres con variación significativa fueron la forma del lóbulo central de la hoja, orientación del pecíolo, color de la epidermis y forma de la planta. El índice H' osciló entre 0.13 y 1 ($\bar{X} = 0.43$) indicando una diversidad media debida a la variabilidad (J' de 43 a 100 %; $\bar{X} = 69\%$) entre accesiones. El análisis de conglomerados determinó 4 grupos contrastantes, y una varianza del 81 % en los primeros tres componentes del PCA. El estudio indica la existencia de suficiente información genética aportada por la variabilidad de las características morfo-agronómicas, que se atribuyen a la diversidad de linajes que se encuentran adaptados al origen geográfico de las accesiones evaluadas.

PALABRAS CLAVE: Análisis de componentes principales, caracteres morfo-agronómicos, germoplasma, índice de Shannon, yuca.

*Corresponding Author:

Otto Raúl Leyva-Ovalle. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Córdoba-Orizaba. Universidad Veracruzana. Calle Josefa Ortiz de Domínguez, S/N, Col. Centro, C.P. 94950, Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. Teléfono: (271) 740 4828. E-mail: oleyva@uv.mx

ABSTRACT

The evaluation of variation in plant germplasm is crucial for classifying and identifying desirable traits for the improvement and conservation of crops. The objective of this study was to analyze the morpho-agronomic diversity of cassava accessions in the Las Montañas region of Veracruz, Mexico. The morphogenetic diversity of 11 cassava accessions was determined using the Shannon index (H') and the Jaccard similarity coefficient (J') based on 33 qualitative traits. Principal Components Analysis (PCA) and cluster analysis were applied to 15 quantitative traits. The traits with significant variation included the shape of the leaf's central lobe, petiole orientation, epidermis color, and plant shape. The H' index ranged from 0.13 to 1 ($\bar{X} = 0.43$), indicating moderate diversity due to variability (J' from 43 to 100 %; $\bar{X} = 69\%$) among the accessions. The cluster analysis identified 4 contrasting groups, with a variance of 81 % in the first three components of the PCA. The study indicates the presence of sufficient genetic information contributed by the variability of the morpho-agronomic traits, attributed to the diversity of lineages adapted to the geographic origin of the evaluated accessions.

KEY WORDS: Cassava, germplasm, morpho-agronomic traits, principal component analysis, Shannon index.

Introducción

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una planta de porte arbustivo y perenne, con una raíz tuberosa de 1 m de largo y 10 cm de diámetro, rica en carbohidratos, además de grasas, proteínas, multivitamínicos y minerales (Li *et al.*, 2023). Su cultivo ofrece una fuente confiable de ingresos económicos por la venta de sus tubérculos; además, que destaca por su valor industrial al obtener productos con alto valor (Aguilar-Rivera, 2024; Andrés-Meza *et al.*, 2024). En otro aspecto, su versatilidad ecológica le permite crecer en diversos entornos ambientales (Ogbonna *et al.*, 2021), incluso bajo condiciones de suelo y clima desafiantes (Imarhiagbe *et al.*, 2024). Por lo anterior, es que en las zonas tropicales y subtropicales representa un recurso fitogenético crucial para garantizar la seguridad alimentaria y combatir la pobreza (Thiele *et al.*, 2022).

En la actualidad, la diversidad genética intraespecífica de la yuca se debe a procesos continuos de selección, intercambio de materiales nativos, hibridación natural, introducción de nuevos genotipos y translocación de linajes genéticos (Laila *et al.*, 2021; Tovar *et al.*, 2016). En este sentido, aunque es usual el empleo de variedades mejoradas en la agricultura convencional (Obare *et al.*, 2023), en sistemas de producción local se continua con el uso y conservación

de numerosos morfotipos (Wooring & Payahua, 2022), caracterizados por su alto rendimiento, sabor, demanda comercial, tolerancia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, o por su alto contenido de almidón (Mutoni et al., 2023; Ferguson et al., 2024); no obstante, se descartan aquellos materiales sin rasgos de interés (Obayelu et al., 2015; Le et al., 2019), los cuales pueden tener un potencial de uso desconocido (Pérez et al., 2019; Hoogerheide & Tiago, 2023), por lo que es importante preservar el pool genético.

En este contexto, el Centro Internacional de Agricultura Tropical conserva 5,760 accesiones sudamericanas y asiáticas, junto con 883 parientes silvestres de yuca; de manera análoga, el Instituto Internacional de Agricultura Tropical resguarda una colección de 2,712 accesiones procedentes del África occidental (Ferguson et al., 2019). En tanto, en México, son escasos los programas de conservación *ex situ* de la yuca, a excepción de lo reportado por Del Rosario-Arellano et al. (2022^a), quienes resaltaron al material MMEXV40 por su productividad agrícola, rendimiento de extracción de almidón, y excelentes propiedades para la producción de películas biodegradables.

En este enfoque, la recolección, conservación y caracterización de germoplasma vegetal surgen como acciones que contribuyen de manera notable al reducir los impactos de la erosión genética, y con la posibilidad de emplearse en la obtención de materiales mejorados (Devi et al., 2022; Carvajal-Yepes et al., 2024). Con base en lo anterior, los estudios donde se conjunta el análisis de caracteres cuantitativos y cualitativos, asociados con indicadores de la variación genética intraespecífica como el índice de Shannon (H') y el índice de similitud de Jaccard (J'), permiten una mejor exploración y comprensión de la divergencia entre las variedades de yuca (Afonso et al., 2020).

Al respecto, en el s sureste de México se dispone de evidencia ecológica, biológica y cultural sobre la diversidad de la yuca (Del Rosario-Arellano et al., 2017; Salinas-Cach et al., 2019; Li et al., 2023), a este propósito, en el estado de Veracruz se encuentran registros de colectas en la zona costera en un rango altitudinal de 20 y 500 msnm (Meneses et al., 2014), mientras, en la región Las Montañas, existe un estudio de prospección (112 a 1391 msnm), donde se encontraron 13 clones de yuca, de las que se desconocen sus características fenotípicas, la posible diversidad y usos potenciales (Del Rosario-Arellano et al., 2024). De esta manera, el objetivo de la investigación fue evaluar la diversidad genética del germoplasma de yuca presente en la región Las Montañas, Veracruz, México, con el fin de proporcionar información valiosa para futuros programas de mejoramiento, iniciativas de conservación, promoción de la seguridad alimentaria y desarrollo de estrategias agrícolas resilientes.

Material y Métodos

Colecta y establecimiento de las accesiones de yuca

Se colectaron accesiones de yuca en febrero de 2023 mediante recorridos en diversos municipios de la región Las Montañas, Veracruz (Figura 1); asimismo, mediante la solicitud de

donación de esquejes a estudiantes de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA) en la región Orizaba-Córdoba de la Universidad Veracruzana. En total, 13 accesiones se establecieron el 21 de marzo en el campo experimental de la FCBA (Figura 1). El área tiene un clima semicálido húmedo (A)_{C(m)(f)} (García, 2004), con una temperatura media de 22.9 °C y precipitación anual de 2 372 mm con base en la serie histórica de 30 años (Harris *et al.*, 2020). El tipo de suelo es vertisol (INEGI, 2022), con una textura franco-arcillosa, pH de 4.4, materia orgánica de 1.47 %; asimismo, con contenidos de nitrógeno y fósforo de 0.04 % y 77.28 mg kg⁻¹, respectivamente.

Manejo agronómico

La preparación del suelo se realizó de forma mecánica, a través de un chapeo, cruza y surcado. Para la siembra, se cortaron esquejes de 20 cm de longitud, luego se sumergieron en una solución de Agromil®V AdStrong (1 ml L⁻¹) + Promyl® (Metil1-(butilcarbamoil)bencimidazol-2-ilmcarbamato, 0.3 g L⁻¹). Se manejo una distancia de siembra de 1 x 1 m entre plantas y surcos, respectivamente (10 000 plantas ha⁻¹). Las parcelas experimentales consistieron de una superficie de 25 m². Las malezas se controlaron de forma manual, en tanto, la nutrición consistió en la aplicación al suelo de 10 g de fosfato diamónico (18-46-00) a los 60 días después de la siembra (das) y 20 g de Blaukorn® (12-8-16 (Mg+S+B+Fe+Zn) a los 100 dds. La cosecha se realizó a los 300 dds de forma manual. Durante el experimento, se descargaron y analizaron datos de temperatura y precipitación, con lo cual se realizó un climograma para visualizar los patrones de variación de estas dos variables climáticas (NASA, 2024).

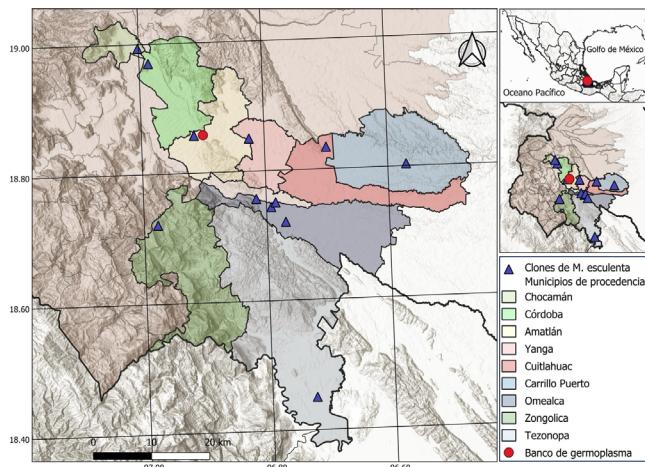


Figura 1. Procedencia del germoplasma de yuca en la región Las Montañas, Veracruz.

Caracterización morfo-agronómica

La caracterización del material genético se realizó a través del manual propuesto por Fukuda *et al.* (2010), para lo cual, 48 descriptores morfo-agronómicos se registraron a los 3, 6, 9 y 12 meses después de la siembra en 11 accesiones de yuca, considerando entre 1 y 5 plantas para su medición, dependiendo de la disponibilidad del material vegetativo. Cabe destacar que dos clones no prosperaron por escasez de material al inicio de la siembra, además de que el clon MMEXV4 provenía de un cañal que antes se quemó para la cosecha (Del Rosario-Arellano *et al.*, 2024).

Para el estudio de la diversidad genética contenida en los caracteres fenotípicos de las accesiones, se consideró la evaluación de 33 caracteres cualitativos mediante el índice de diversidad de Shannon-Weaver (H'). Este indicador permite evaluar las características de los morfotipos con base en las formas que expresa su diversidad genética (Dong *et al.*, 2004), bajo la hipótesis de que los patrones agro-morfológicos son resultado de la expresión de genes adaptados a las condiciones ambientales asociadas a la localidad de origen donde fueron colectados y cultivados por varias generaciones (Singh *et al.*, 2016; Desheva & Valchinova, 2023). El índice de Shannon señala, con un valor de -1 a 1 como baja diversidad, de 1 a 2 como mediana diversidad y > que 2, una alta diversidad (Zambrano *et al.*, 2003). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de similitud de Jaccard (J'), el cual relaciona las características morfo-agronómicas, bioquímicas y moleculares de la diversidad genética en los cultivos (Guidoti *et al.*, 2018; Nogueira *et al.*, 2021), este varia de 0 a 1, siendo 1 la similitud máxima entre el conjunto de caracteres discretos. Estos indicadores se calcularon en el software Real Statistics Using Excel (Zaiontz, 2023). Es importante precisar que ambos indicadores son útiles para la evaluación de la diversidad de caracteres cualitativos para cultivos (Dong *et al.*, 2004).

Las variables cuantitativas registradas fueron 15: número de lóbulos de la hoja (NLL), largo del lóbulo central de la hoja (LCLL), ancho del lóbulo central de la hoja (WCLL), relación largo/ancho de la hoja (LLWRA), longitud del peciolo (PETL), altura de la planta (PLAH), altura a la primera ramificación (HBRAN), número de ramas (LBR), ángulo de ramificación (ABR), número de raíces de almacenamiento (NSROOT), peso total de la raíz (ROOTW), número de raíces comerciales (CROOT), grosor de la corteza (CORT), contenido de materia seca (DMC) y contenido de almidón (STC). Estas variables se evaluaron mediante un análisis de componentes principales (PCA), proceso que se basó la matriz de correlaciones. El objetivo de este análisis fue determinar la variación entre los grupos de accesiones y las variables morfo-agronómicas, lo que es posible evidenciar por medio de un gráfico bidimensional (biplot). También se efectuó un análisis de conglomerados empleando el método de Ward y distancia euclíadiana para clasificar los grupos que presentan similitud en los patrones morfo-agronómicos. Estos análisis se realizaron en el software InfoStat versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Resultados y Discusión

Condiciones climáticas

En los 300 días que duró el ciclo del cultivo, se registró una temperatura máxima y mínima promedio de 27.01 y 15.87 °C, respectivamente; con una precipitación acumulada de 1,627.76 mm (Figura 2). Los datos climáticos presentados indican la factibilidad de introducir un banco de germoplasma de yuca, toda vez que los requerimientos óptimos de la especie rondan entre los 20 a 29 °C, tolerando incluso hasta 35 °C; asimismo, de precipitaciones ubicadas entre los 1,000 a 2,500 mm (Del Rosario-Arellano *et al.*, 2022^b). Cabe destacar que, en el sitio de evaluación, el suelo se caracteriza por una alta retención de humedad debido a su textura arcillosa, aspecto que, de presentarse por un periodo prolongado ocasionaría pudriciones en la raíz tuberosa (Cock *et al.*, 2018), por lo tanto, es necesario considerar surcos elevados para evitar posibles daños.

Distribución de los caracteres cualitativos

Las accesiones de yuca mostraron rangos variables en cuanto a la frecuencia de los caracteres cualitativos (Tabla 1). Los caracteres que mostraron una alta variabilidad fueron la forma del lóbulo central de la hoja, con un 36.36 % lanceolada, 27.27 % elíptico-lanceolada y un 18.18 % para obovado-lanceolado y pandurado-lineal. Obare *et al.* (2023), encontraron que en una población de 256 accesiones de yuca en Kenya, el 43.5 % registraron forma oblong-lanceolada, 35.7 % lanceolada y el 8.2 % con forma elíptica-lanceolada. Debido a la diversidad de la variable, es que se utiliza para discriminar fenotipos de yuca. Por otro lado, el color rojo verdoso del peciolo se observó con mayor frecuencia (36.36 %), seguido por verde amarillento (27.27 %) y verde con rojo (9.09 %).

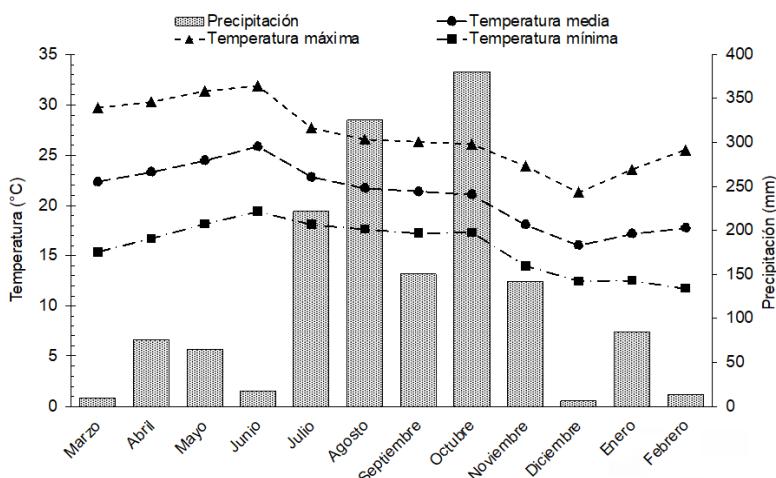


Figura 2. Climograma durante el periodo del desarrollo de la yuca.

Respecto a la raíz tuberosa, el color crema de la pulpa fue el rasgo con mayor predominancia en 72.73 %. La importancia de esta variable es que se vincula con los hábitos alimentarios de cada región, y la que determina la venta comercial (Mezette et al., 2013). Es preciso destacar que las accesiones MMEXV3 y MMEXV7 presentaron un color de pulpa amarilla (18.18 %), aspecto que se relaciona con una alta concentración de β -carotenos, precursores de pro-vitamina A (Tize et al., 2021; Mutoni et al., 2023), razón por la cual, las accesiones podrían valorarse en programas de fitomejoramiento, con miras a incrementar la calidad nutricional de nuevos genotipos.

Por otro lado, el color verde de la nervadura de la hoja, cicatrices foliares semiprominentes, crecimiento erecto del tallo y color verde de las ramas terminales fueron los caracteres con la más baja variabilidad, al presentarse estos rasgos en el 100 % de las accesiones. Lo anterior difiere con un estudio de caracterización de 52 accesiones de yuca en Tanzania, al reportar que solo el 50 % del germoplasma presentaba nervaduras verdes (Mtunguwa et al., 2017). De lo anterior, se ha hecho mención que el color verde oscuro juega un rol importante en la identificación de genotipos con alto rendimiento de raíces tuberosas (Khumaida et al., 2015).

Cabe mencionar, que el 72.73 % de las accesiones presentaron pubescencia sobre la hoja apical, opuesto a lo reportado por Ferguson et al. (2024) en un estudio de 79 accesiones de yuca, asimismo, con los resultados de Pierre et al. (2022), al encontrar solo un 7 % de 118 accesiones con esta característica. Se ha hecho mención que los genotipos con mayor densidad de tricomas favorecen la oviposición y desarrollo de ninfas de mosquita blanca (dependiente de la especie), aunque también los parámetros de color de la hoja presentan una relación estrecha en la incidencia del insecto (Pastório et al., 2023). Por tanto, son variables útiles para la selección de clones de yuca con cierta tolerancia al ataque de plagas de importancia agronómica, y promisorias para encaminarse a programas de mejoramiento genético.

Por otro lado, la floración, el polen y las frutas se presentaron en un 36.36 % del germoplasma. A propósito, los clones de yuca con una floración temprana son preferidas por los fitomejoradores, puesto que permite realizar cruzas de manera oportuna, y con ello la obtención de nuevos genotipos. No obstante, la floración está condicionada al efecto de factores como la acumulación de grados días (Santos et al., 2024), el fotoperiodo (Pineda et al., 2020), el genotipo, e incluso inducirse por prácticas agronómicas como la técnica del injerto (Silva et al., 2018).

Índice de diversidad de Shannon-Weaver e índice de similitud de Jaccard

Es relevante mencionar que el índice de diversidad de Shannon (H') osciló entre 0.13 a 1 ($\bar{X} = 0.43$). Un índice $H' = 0.43$ indica una diversidad intermedia, misma que presentaron los morfotipos evaluados, ya que el patrón de características morfológicos es variable en las accesiones. Esto fue consistente con el coeficiente de similitud (J'), que osciló entre un 43 y 100 % ($\bar{X} = 69\%$) de índice de similitud en 22 de los caracteres cualitativos evaluados, obteniendo un 41 % de variabilidad en los caracteres cualitativos (Tabla 1). Es importante precisar que los caracteres con un valor de J' igual a 1 no indican que las colectas no sean diferentes genéticamente, solo que son iguales por las clases en que se evalúa cada característica. Si se observa con atención

(Tabla 1) para la mayoría de las variables (al menos 22), el índice de diversidad Shannon es menor a 0.5, mientras que el valor de J' está en función de las clases observadas en cada variable. De esta manera, por ejemplo, variables con índice H' bajo pueden tener más del 90 % de similitud de J' debido a que solo se tienen dos clases. Estos indicadores muestran la variabilidad en los caracteres morfo-agronómicos cualitativos de las accesiones cosechadas, como color de hojas y tallos con una variante de colores diversa. Aunque la frecuencia de aparición de cada uno ellos corresponden a un 41 % de las variaciones, la cual se considera intermedia, y puede estar influenciado por factores genéticos (Collado *et al.*, 2004). La variación en los índices de H' y J' se relaciona con factores genéticos que definen linajes evolutivos heterogéneos que derivan de la retrocruza entre variedades locales o regionales, por lo que otras investigaciones deben implementarse con marcadores moleculares como el polimorfismo de un solo nucleótido (SNPs), ya que los caracteres fenotípicos determinados por genes pueden identificarse con esta herramienta. Además, su implementación es valiosa en programas de mejoramiento genético y estudios de asociación genómica (Cardoso *et al.*, 2023).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales estimó que en tres componentes se acumuló el 81 % de la variación total, con contribuciones propias del 46, 23 y 12 %; respectivamente, y valores propios mayores a 1 (Tabla 2). De esta manera, las variaciones en los datos se pueden explicar en estos componentes (Jeffers, 1996; Laila, *et al.*, 2021), y los caracteres que se encuentren en los ejes incidirán fuertemente sobre el fenotipo de las accesiones. La variación encontrada fue superior a lo reportado por Carine *et al.* (2016), al registrar un 57.56 % de la variación total en los primeros tres componentes, esto en un estudio de diversidad genética comprendida en 89 accesiones de yuca al evaluar 14 caracteres cuantitativos; asimismo con Kamanda *et al.* (2020), al dilucidar que en cinco componentes principales contenían el 70.44 % de la variación fenotípica de 183 accesiones cultivadas en Taiama, Sierra Leona, África.

Tabla 1. Distribución de frecuencias de 33 caracteres cualitativos y valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') y el coeficiente de similitud de Jaccard (J') a partir de 11 accesiones de yuca.

Carácter cualitativo	Variante	Registro	Frecuencia (%)	H'	J'
Color de la hoja apical	Verde claro	3	54.55	0.39	83
	Verde oscuro	5	36.36		
	Verde purpura	7	9.09		
	Purpura	9	0		
Pubescencia sobre la hoja apical	Ausente	0	27.27	0.25	85
	Presente	1	72.73		

Continuación

Tabla 1. Distribución de frecuencias de 33 caracteres cualitativos y valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') y el coeficiente de similitud de Jaccard (J') a partir de 11 accesiones de yuca.

Carácter cualitativo	Variante	Registro	Frecuencia (%)	H'	J'
Forma del lóbulo central	Ovoide	1	0	0.58	96
	Elíptico-lanceolado	2	27.27		
	Obovado-lanceolado	3	18.18		
	Oblongo-lanceolado	4	0		
	Lanceolado	5	36.36		
	Recto o lineal	6	0		
	Pandurado	7	0		
	Lineal-piramidal	8	0		
	Pandurado-lineal	9	18.18		
	Lineal-hostatilobalato	10	0		
Retención de la hoja	Muy mala retención	1	0	0.44	74
	Retención inferior a la media	2	9.09		
	Retención promedio de hojas	3	9.09		
	Retención mejor que la media	4	18.18		
	Excelente retención de hojas	5	63.63		
Color del peciolo	Verde amarillento	1	27.27	0.63	91
	Verde	2	9.09		
	Verde rojizo	3	18.18		
	Rojo verdoso	5	36.36		
	Rojo	7	9.09		
	Púrpura	9	0		
Color de la hoja	Verde claro	3	54.54	0.29	99
	Verde oscuro	5	45.45		
	Verde púrpura	7	0		
	Púrpura	9	0		
Margen del lóbulo	Liso	3	18.19	0.2	68
	Rugoso	7	81.81		
Color de la nervadura de la hoja	Verde	3	100	1	1
	Verde rojizo en menos de la mitad del lóbulo	5	0		
	Verde rojizo en más de la mitad del lóbulo	7	0		
	Todo rojo	9	0		
Orientación del peciolo	Inclinado hacia arriba	1	36.36	0.54	91
	Horizontal	3	36.36		
	Inclinado hacia abajo	5	9.09		
	Irregular	7	18.19		

Continuación

Tabla 1. Distribución de frecuencias de 33 caracteres cualitativos y valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') y el coeficiente de similitud de Jaccard (J') a partir de 11 accesiones de yuca.

Carácter cualitativo	Variante	Registro	Frecuencia (%)	H'	J'
Floración	Ausente	0	63.64	0.28	0.95
	Presente	1	36.36		
Polen	Ausente	0	63.36	0.28	0.95
	Presente	1	36.36		
Prominencia de las cicatrices foliares	Semiprominente	3	100	1	1
	Prominente	5	0		
Color de la corteza del tallo	Naranja	1	9.09	0.4	85
	Verde claro	2	45.45		
	Verde oscuro	3	45.45		
Color de la epidermis del tallo	Crema	1	45.45	0.45	94
	Café claro	2	18.19		
	Café oscuro	3	0		
	Naranja	4	36.36		
Color exterior del tallo	Naranja	3	0	0.38	63
	Verdoso-amarillento	4	9.09		
	Dorado	5	9.09		
	Café claro	6	0		
	Plata	7	72.73		
	Gris	8	9.09		
	Café oscuro	9	0		
Hábito de crecimiento del tallo	Recto	1	100	1	1
	Zig- zag	2	0		
Distancia entre las cicatrices foliares	Corto ($\leq 8\text{cm}$)	3	0	0.29	99
	Mediano (8-15 cm)	5	45.46		
	Largo ($\geq 15\text{ cm}$)	7	54.54		
Color de las ramas terminales de la planta adulta	Verde	3	100	1	1
	Verde-purpura	5	0		
	Purpura	7	0		
Margen de la estípula	Entera	1	72.73	0.25	84
	Dividida o bifurcada	2	27.27		
Longitud de las estípulas	Cortas	3	90.9	0.13	43
	Largas	5	9.10		
Fruta	Ausente	0	36.36	0.28	94
	Presente	1	63.64		

Continuación

Tabla 1. Distribución de frecuencias de 33 caracteres cualitativos y valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') y el coeficiente de similitud de Jaccard (J') a partir de 11 accesiones de yuca.

Carácter cualitativo	Variante	Registro	Frecuencia (%)	H'	J'
Semilla	Ausente	0	45.46	0.29	99
	Presente	1	54.54		
Hábito de ramificación	Erecto	1	27.27	0.37	78
	Dicotómico	2	9.09		
	Tricotómico	3	63.64		
	Tetracotómico	4	0		
Forma de la planta	Compacta	1	36.36	0.47	99
	Abierta	2	27.28		
	Sombrilla	3	36.36		
	Cilíndrica	4	0		
Extensión del pedúnculo radicular	Sésil	0	54.55	0.39	83
	Pedunculado	3	36.36		
	Mixto	5	9.09		
Constricción radicular	Poco o ninguna	1	36.36	0.45	94
	Alguna	2	45.45		
	Muchas	3	18.19		
Forma de la raíz	Cónica	1	0	0.29	99
	Cónica-cilíndrica	2	45.45		
	Cilíndrica	3	0		
	Irregular	4	54.56		
Color externo de la raíz de almacenamiento	Blanco o crema	1	9.09	0.48	80
	Amarillo	2	54.55		
	Café claro	3	27.27		
	Café oscuro	4	9.09		
Color de la pulpa	Blanca	1	9.09	0.32	69
	Crema	2	72.73		
	Amarilla	3	18.18		
	Naranja	4	0		
	Rosa	5	0		
Color de la corteza de la raíz	Blanco o crema	1	45.45	0.4	85
	Amarillo	2	9.10		
	Rosa	3	45.45		
	Morado	4	0		
Facilidad de pelado de la corteza	Fácil	1	54.54	0.29	99
	Difícil	2	45.46		
Textura de la epidermis de la raíz	Lisa	3	9.10	0.37	78
	Intermedio	5	63.63		
	Rugosa	7	27.27		
Sabor de la raíz	Dulce	1	4	0.39	0.83
	Intermedia	2	6		
	Amarga	3	1		
Media general				0.43	0.83

La contribución de los caracteres en un componente principal se identifica al encontrar cargas cercanas a la unidad (Bhanupriya *et al.*, 2014). Las variables que indicaron una contribución significativa en el PC1 fueron el ancho de la hoja (WCLL) con una carga de 0.370, peso total de la raíz (ROOTW) con 0.358, longitud del pecíolo (PETL) con 0.340, grosor de la corteza (CORT) con un valor de 0.334, mientras RELAHOJ exhibió una carga negativa (-0.283). Estas variables se relacionan con las dimensiones de la hoja y el rendimiento. En el PC2 el NLL (0.433), LCLL (0.315), PLAH (0.356), HBRAN (0.454), mostraron contribuciones significativas, en tanto, una carga negativa se observó en los LBR (-0.408) y CROOT (-0.290). El PC3 estuvo influenciado por la variable NSROOT (0.424), DMC y STC (0.396), catalogados como parámetros de productividad e indicadores de calidad. De lo anterior, en un estudio de diversidad, conducido por Daemo *et al.* (2023) estimaron que el PCI se asoció con el ancho del lóbulo de la hoja, la longitud del pecíolo, la altura de la planta, el diámetro del tallo, la biomasa aérea y el rendimiento fresco de la raíz de almacenamiento, en tanto, el PC2 se relacionó con la longitud del lóbulo foliar, el ancho del lóbulo foliar, el número de raíces de almacenamiento, la longitud de la raíz de almacenamiento y la biomasa aérea.

Tabla 2. Valores propios y varianza explicada y acumulada en 3 componentes principales de 11 clones de *M. esculenta* procedentes de la región Las Montañas, Veracruz, México.

Carácter	CP1	CP2	CP3
Número de lóbulos de la hoja (NLL)	0.074	0.433	-0.246
Largo del lóbulo central de la hoja (LCLL)	0.277	0.315	0.148
Ancho del lóbulo central de la hoja (WCLL)	0.370	0.085	0.022
Relación largo/ancho de la hoja (LLWRA)	-0.283	0.238	0.225
Longitud del pecíolo (PETL)	0.340	0.176	0.162
Altura de la planta (PLAH)	0.193	0.356	0.096
Altura a la primera ramificación HBRAN)	0.019	0.454	-0.046
Niveles de ramificación (LBR)	0.222	-0.408	0.093
Ángulo de ramificación (ABR)	-0.211	-0.019	-0.523
Número de raíces de almacenamiento (NSROOT)	0.246	-0.119	0.424
Peso de la raíz (ROOTW)	0.358	-0.130	0.005
Número de raíces comerciales (CROOT)	0.177	-0.290	-0.173
Grosor de la corteza (CORT)	0.334	-0.054	-0.154
Contenido de materia seca (DMC)	-0.247	-0.021	0.396
Contenido de almidón (STC)	-0.247	-0.021	0.396
Valores propios	6.84	3.48	1.80
Varianza explicada (%)	0.46	0.23	0.12
Varianza acumulada (%)	0.46	0.69	0.81

Los caracteres y las accesiones se graficaron en un biplot para visualizar las contribuciones relativas a la variación total. Del gráfico de distribución del PC1 con PC2 (Figura 3), las variables vinculadas positivamente con el primer eje y correlacionadas por la separación angular de sus proyecciones fueron la HBRAN, NLL, PLAH, LCLL, PETL y WCLL, característicos de los clones MMEXV5 y MMEXV2, las cuales alcanzaron una mayor dimensión. También se encontró que MMEXV3, MMEXV8 y MMEXV13, son accesiones que presentan una mayor altura de la rama.

Por otro lado, al graficar el PC1 con PC3, se observó una correlación negativa entre CROOT con LLWRA, DMC y STC, al respecto, aunque las accesiones MMEXV1, MMEXV2 y MMEXV5 se caracterizaron por un mayor rendimiento en campo, resultaron con pobre contenido DMS y STC, dando lugar a que los materiales con alto rendimiento agrícola no necesariamente conseguirán un alto valor industrial. Mientras tanto, las accesiones MMEXV1, MMEXV3, MMEXV6, MMEXV7 y MMEXV8, se caracterizaron por ser plantas con ángulos de rama abierto, que al relacionarse de manera negativamente con RALM, indica que las accesiones con hábito de ramificación tricotómica y tetracotómica presentarán un menor NSROOT (Figura 4).

La longitud y el rendimiento de la raíz de almacenamiento son caracteres de alta heredabilidad y avance genético, lo que sugiere la existencia de genes de efectos aditivos (Daemo *et al.*, 2023), lo mismo ocurre con los parámetros de calidad, es decir, el contenido de almidón y la materia seca. De esta manera, la cuantificación de la heredabilidad orienta al fitomejorador en la obtención de nuevos genotipos con alto rendimiento en una población heterogénea (Sivan *et al.*, 2023). En este sentido, la variabilidad encontrada indica que existen caracteres de interés, lo que en un futuro permitirá la elección de combinaciones de parentales para incrementar la ganancia genética en la selección, el avance y posiblemente la liberación de clones elite (Kamanda *et al.*, 2020; Laila *et al.*, 2021); además, al identificar la variabilidad genética de los materiales colectados en diferentes zonas geográficas se espera que estas regiones tengan un impacto significativo en la promoción de la conservación y utilización del germoplasma.

Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados clasificó en cuatro grupos a los 11 genotipos de yuca basados en los 15 caracteres cuantitativos (Figura 5). El primer grupo corresponde a las accesiones MMEXV2, MMEXV5 y MMEXV11, que alcanzaron una mayor altura de la planta (2.12 a 3.21 m), característica de utilidad para implementarse en sistemas de cultivos asociados, ya que frecuentemente son plantas de porte erecto con poco desarrollo en al diámetro de dosel, por esto es un rasgo usado para definir la densidad de población (Rós *et al.*, 2011). Existen reportes de una amplia diversidad fenotípica relacionada con la altura de la planta, la cual varía desde clones de porte bajo; es decir los 0.65 m (Kamanda *et al.*, 2020), hasta aquellas cercanas a los 5 m (Wooding & Payahua, 2022). También se encontró que este grupo se caracteriza por un mayor grosor de la corteza (3.11 a 3.55 mm). El segundo grupo se formó por MMEXV8 y MMEXV13, las cuales se caracterizaron por una mayor LLWRA (6.94 a 7.46), pero un menor NBR (1.50 a 2.60).

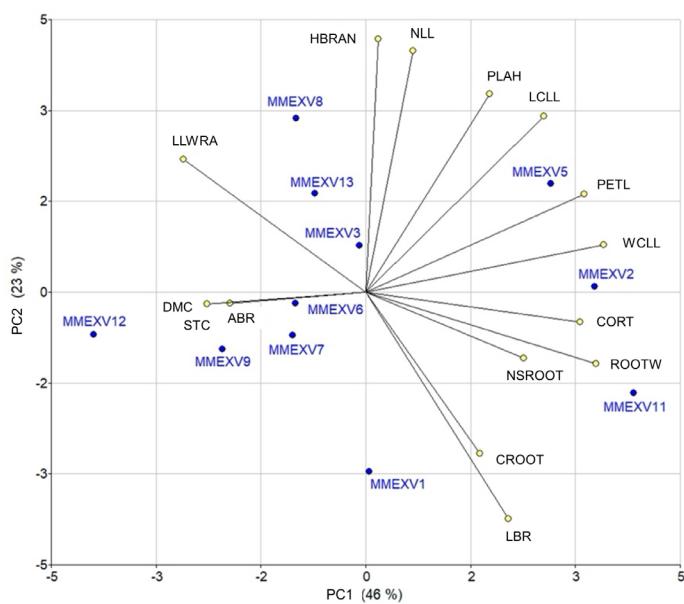


Figura 3. Biplot de 15 caracteres cuantitativos contra 11 accesiones de yuca (PC1 y PC2).

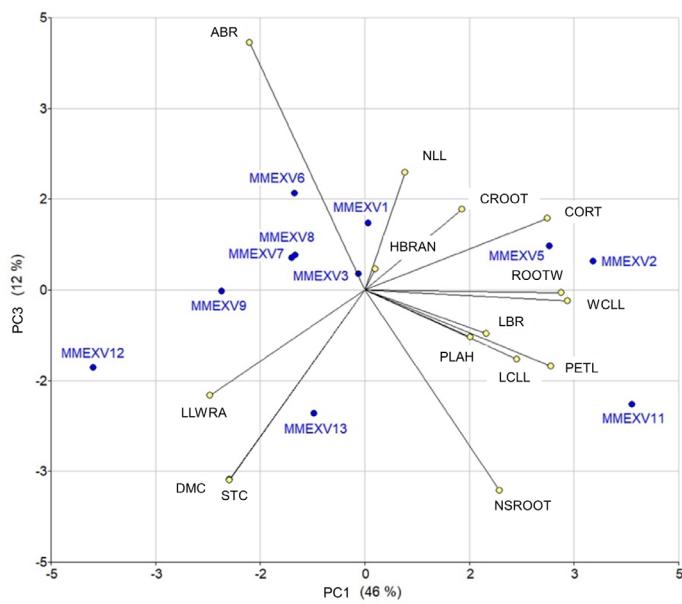


Figura 4. Biplot de 15 caracteres cuantitativos contra 11 accesiones de yuca (PC3 y PC4).

En el tercer grupo se identificaron a las colectas MMEXV3, MMEXV6, MMEXV7, MMEXV9 y MMEXV12 asociados a altos contenidos de materia seca (31.16 a 43.36 %) y almidón (16.25 a 24.89 %). La importancia de lo anterior es que, para posibles aplicaciones en la alimentación humana y la agroindustria, las variables que eficientizan la selección de genotipos son el tamaño, número raíces totales y materia seca (Adetoro *et al.*, 2021). Además, estas accesiones son plantas de porte bajo (1.96 a 2.72 m), con entre 1.5 a 3.6 ramas, dimensiones de hoja pequeña al registrar 19.52 y 28.64 cm para la LCLL y 2.86 a 4.12 cm para WCLL; no obstante, obtuvieron un menor peso de sus raíces tuberosas comparadas con los demás materiales (1.08 a 5.36 kg). De lo antes dicho, los resultados coinciden con el estudio de caracterización de 30 genotipos de yuca en la India, al indicar una correlación negativa entre el rendimiento de la raíz tuberosa con el contenido de materia seca y almidón (Sivan *et al.*, 2023), situación que conlleva a un desafío en la obtención de variedades mejoradas.

El cuarto grupo se formó por MMEXV1, una accesión que resalta por un mayor número de ramas y ángulo cerrado, con grandes dimensiones de la hoja, peciolos largos, y además de una mayor cantidad de raíces de almacenamiento, características que se relacionaron con un alto rendimiento (11.37 kg).

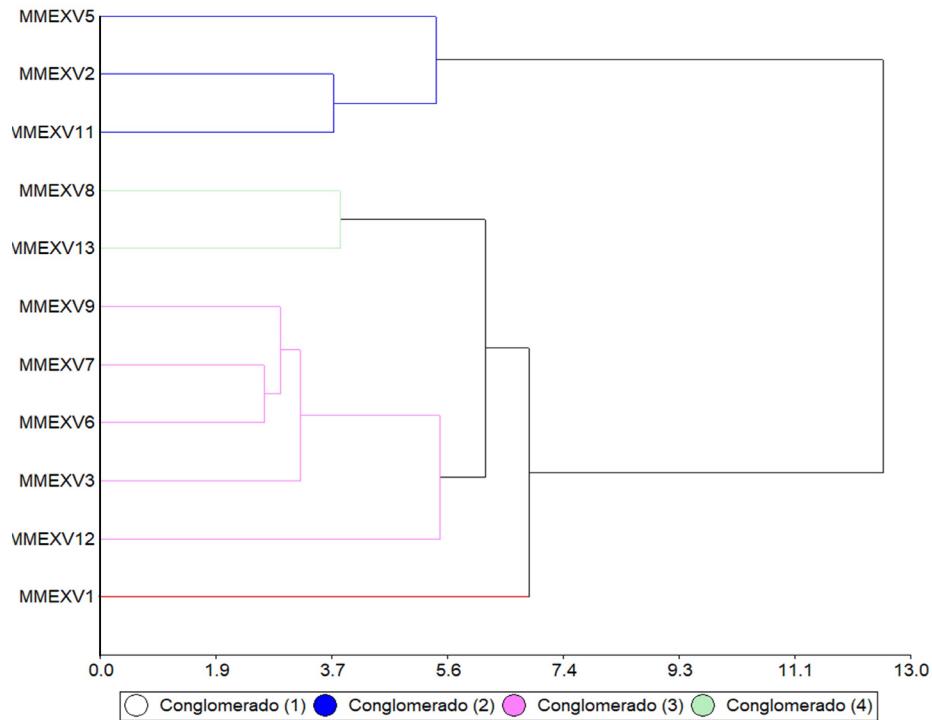


Figura 5. Dendograma de 11 colectas de yuca en la región Las Montañas, Veracruz, México.

Conclusiones

Existe un acervo de diversidad genética de yuca en la región Las Montañas, Veracruz, que se refleja en caracteres de interés morfo-agronómico como el rendimiento, dimensiones y forma de la hoja, la floración, altura de planta y la coloración del parénquima, entre otras, las cuales son de importancia para su consideración en programas de conservación y mejoramiento genético.

Es de resaltar que estudios exploratorios como esta investigación, dilucidan materiales con potencial desconocido, al respecto, se detectaron colectas para uso alimentario tanto para el sector pecuario como el humano, con posiblemente alto perfil nutrimental, lo que en un futuro abriría pauta para su promoción en pro de la seguridad nutricional; además, de coadyuvar en la diversificación de los sistemas de producción locales.

Contribución de los autores

Desarrollo experimental y conceptualización del trabajo, José Luis Del Rosario–Arellano; escritura y preparación del manuscrito, Otto Raúl Leyva–Ovalle; validación experimental, Rafael Antonio Verdejo–Lara; análisis de resultados y manejo de software, Pablo Andrés–Meza; redacción, revisión y edición, Isaac Meneses–Márquez; manejo de software y análisis de datos, Ricardo Serna–Lagunes; desarrollo experimental y registro de datos, Félix Zahid Cruz–Moreno; redacción, revisión y edición, Carlos Regulo Llarena–Hernández.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias por el apoyo técnico y la aprobación del proyecto “Colecta, caracterización y valorización de germoplasma de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la zona centro del estado de Veracruz” del cual formó parte esta investigación. Un profundo agradecimiento a los estudiantes de las experiencias educativas de Cultivos Básicos e Industriales, Fitomejoramiento y Agrobiodiversidad por el mantenimiento del banco de germoplasma.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Adetoro, N. A., Oworu, O. O., Nassir, A. L., Bello, A., Parkes, E., Ogunbayo, S. A., Akinwale, M. G., Ains. O. O., Afolabi, A., liuebbey, P., Sanni, L. O., Maziya-Dixon, B., & Kulakow, P. (2021). Evaluation of improved cassava genotypes for yield and related traits for a better breeding strategy under different agroecologies in Nigeria. *Euphytica*, 217(4), 73. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02798-9>
- Afonso, S. D. J., Alfredo, T. J. D. C., Canário, J. A., de Oliveira, A. N. A., & Abrantes, A. T. (2020). Genetic diversity of cassava varieties (*Manihot esculenta* Crantz) in the agro-morphological conditions of Malanje, Angola. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 13(4), 36-44. <https://doi.org/10.9790/2380-1304023644>
- Aguilar-Rivera, N. (2024). Life cycle assessment of valorization of root and tuber crop wastes for bio-commodities and biofuels: Cassava as a case study. In Ray, R.C. Roots, tubers, and bulb crop wastes: Management by biorefinery approaches. (pp. 333-350). Ed. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8266-0_15
- Andrés-Meza, P., Aguilar-Rivera, N., Meneses-Márquez, I., Del Rosario-Arellano, J. L., Bolio-López, G. I., & Leyva-Ovalle, O. R. (2024). Cassava cultivation; current and potential use of agroindustrial co-products. *AIMS Environmental Science*, 11(2), 248-278. <https://doi.org/10.3934/environsci.2024012>
- Bhanupriya, D. B., Satyanarayana, N. H., Mukherjee, S., & Sarkar, K. K. (2014). Genetic diversity of wheat based on principal component analysis in gangetic alluvial soil of West Bengal. *Journal of Crop and Weed*, 10(2), 104-107. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20163278869>
- Cardoso, dos S. C., Braatz, de A. L. R., Dias, do C. C., & de Oliveira, E. J. (2023). Development of cassava core collections based on morphological and agronomic traits and SNPs markers. *Frontiers in Plant Science*, 14. Article 1250205. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1250205>
- Carine, T. N., Igwacho, M. B., & Francis, N. A. (2016). Agro-morphological characterization of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) collected in the humid forest and Guinea savannah agro-ecological zones of Cameroon. *Greener Journal Agricultural Sciences*, 6, 209-225. <http://doi.org/10.15580/GJAS.2016.8.062716107>
- Carvajal-Yepes, M., Ospina, J. A., Aranzales, E., Velez-Tobon, M., Correa, A. M., Manrique-Carpintero, N. C., & Wenzl, P. (2024). Identifying genetically redundant accessions in the world's largest cassava collection. *Frontiers in Plant Science*, 14. Article 1338377. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1338377>
- Cock, J. H. (2018). Cassava: new potential for a neglected crop. CRC Press LLC, Milton. https://www.researchgate.net/publication/38978736_Cassava_New_Potential_for_a_Neglected_Crop
- Collado, L. A., Arroyo, M., Riesco, A., & Servia, J. L. C. (2004). Experiencias sobre la diversidad de los cultivos y aspectos económicos de la conservación *in situ* en la Amazonía central peruana. In Chávez-Servia, J. L., Tuxill, J., Jarvis, D. I. Manejo de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales, 188. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. (pp. 188-198). Ed. IPGRI. <http://hdl.handle.net/10625/43653>
- Daemo, B. B., Yohannes, D. B., Beyene, T. M., & Abtew, W. G. (2023). Genetic variability and

- divergence analysis in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) accessions for storage root yield and other agronomic characters. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. Article 100874. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100874>
- Del Rosario-Arellano, J. L., Aguilar-Rivera, N., Leyva-Ovalle, O. R., Andrés-Meza, P., Meneses-Márquez, I., & Bolio-López, G. I. (2022b). Zonificación edafoclimática de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) para la producción sostenible de bioproductos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 81, 361-383. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022022000100361>
- Del Rosario-Arellano, J. L., Bolio-López, G. I., Valadez-González, A., Zamora-Pereido, L., Aguilar-Rivera, N., Meneses-Márquez, I., Andrés-Meza, P., & Leyva-Ovalle, O. R. (2022a). Exploration of cassava clones for the development of biocomposite films. *AIMS Materials Science*, 9(1), 85-104. <https://doi.org/10.3934/matersci.2022006>
- Del Rosario-Arellano, J. L., Meneses-Márquez, I., Andrés-Meza, P., Rosas-González, X., Becerra-Leor, E. N., Leyva-Ovalle, O. R., Vázquez-Hernández, A., Galindo-Tovar, M. E., Cebada-Merino, M., Núñez-Pastrana, R. (2017). In Pérez, F., Figueroa, E., García, R., & Godínez, L. Ciencias de la Biología, Agronomía y Economía. (pp. 60-72). Ed. ECORFAN, https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Biología%20Agronomía%20y%20Economía%20T-I/HCBAE_TI.pdf
- Del Rosario-Arellano, J. L., Serna-Lagunes, R., Andrés-Meza, P., Leyva-Ovalle, O. R., Cebada-Merino, M., & Capetillo-Burela, Á. (2024). Estado actual y condiciones ecogeográficas de *Manihot esculenta* Crantz en la región Las Montañas, Veracruz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3). Article e3975. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.3975>
- Desheva, G., & Valchinova, E. (2023). Morpho-agronomic assessment of genetic diversity among rye accessions using multivariate analyses. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 29(2), 338-350.
- Devi, B., Kumar, M. N., Chutia, M., & Bhattacharyya, N. (2022). Abiotic and biotic stress challenges of cassava in changing climate and strategies to overcome: A review. *Scientia Horticulturae*, 305. Article 111432. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111432>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020 [software]. <http://www.infostat.com.ar>
- Dong, Y. S., Zhao, L. M., Liu, B., Wang, Z. W., Jin, Z. Q., & Sun, H. (2004). The genetic diversity of cultivated soybean grown in China. *Theoretical and Applied Genetics*, 108, 931-936. <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1503-x>
- Ferguson, M. E., Ntawuruhunga, P., Fouad, M. O., Hassane, O. K. M. A., Charmila, M. A., Hamza, A. A., Mohamed, N. A., Dieng, I., Njukwe, E., & Shah, T. M. (2024). Collection and characterization of cassava germplasm in Comoros. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(1), 341-361. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01626-4>
- Ferguson, M. E., Shah, T., Kulakow, P., & Ceballos, H. (2019). A global overview of cassava genetic diversity. *PLoS ONE*, 14(11). Article e0224763. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224763>
- Fukuda, W. M. G., Guevara, C. L., Kawuki, R., Ferguson, M. E. (2010). Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1834215>
- García, A. E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen: para

- adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Guidoti, D. T., Gonela, A., Vidigal, M. C. G., Conrado, T. V., & Romani, I. (2018). Interrelationship between morphological, agronomic and molecular characteristics in the analysis of common bean genetic diversity. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40. Article e33032. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.33032>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. & Lister, D. H. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hoogerheide, E. S. S., & Tiago, A. V. (2023). Ethnobotany and characterization of cassava varieties of central Brazil. A case study. In Cereda, M. P., & Vilpoux, O. F. Varieties and Landraces: Cultural Practices and Traditional Uses. (pp. 211-224). Ed. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02178-X>
- Imarhiagbe, O., Ogwu, M. C., Ikponmwosa, B. O., Mukah, F. E., Akemu, S. E., & Ohiaba, E. E. (2024). Threats to cassava cultivation, production, and processing: Global status and sustainable management strategies. In Ogwu, M. C., Izah, S. C., Alves, A. A. C., & Babu, S. C. Sustainable cassava, strategies from production through waste management. Plant biology, sustainability and climate change. (pp. 75-97). Ed. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21747-0.00016-3>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2022, enero 05). Geografía y medio ambiente. Edafología. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Jeffers, J. N. R. (1996). Two case studies in the application of principal component analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 16(3): 225-236. <https://doi.org/10.2307/2985919>
- Kamanda, I., Blay, E. T., Asante, I. K., Danquah, A., Ifie, B. E., Parkes, E., Kulakow, P., Rabbi, I., Conteh, A., Kamara, J. S., Mensah, H. K., Whyte, J. B. A. & Sesay S. (2020). Genetic diversity of provitamin-A cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Sierra Leone. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67, 1193-1208. <https://doi.org.ezproxy.uv.mx/10.1007/s10722-020-00905-8>
- Khumaida, N., Maharani, S., & Ardie, S.W. (2015). The leaf color performance on several lines of cassava and its relation with tuber yield as early reference. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.007>
- Laila, F., Zanetta, C. U., Karuniawan, A., & Waluyo, B. (2021). Classifying cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) clones based on principal component analysis of specific characters for use as selection criteria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 911(1). Article 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/911/1/012007>
- Le, D. P., Labarta, R. A., de Haan, S., Maredia, M., Becerra, L. A., Nhu, L. T., Ovalle, T., Nguyen, V. A., Pham, N. T., Nguyen, H. H., Nguyen, H. T., Le, K. Q., & Le, H. H. (2019). Characterization of cassava production systems in Vietnam. Working Paper. CIAT Publication No. 480. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Hanoi, Vietnam. <https://hdl.handle.net/10568/103417>
- Li, Y., Ding, F., Hao, M., Chen, S., Jiang, D., Fan, P., Qian, Y., Zhuo, J., & Wu, J. (2023). The implications for potential marginal land resources of cassava across worldwide under climate change challenges. *Scientific Reports*, 13(1), 15177. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-19000-1>

42132-y

- Meneses, I., Vázquez, A., Rosas, X., & Becerra, E. (2014). Colecta y conservación *ex situ* de germoplasma de yuca en el estado de Veracruz. In Martínez-Herrera, J. La innovación tecnológica para la seguridad alimentaria. (pp.426-431). Ed. INIFAP. https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Herrera-19/publication/310828417_XXVI_Reunion_Cientifica_Tecnologica_Forestal_y_Agropecuaria_Tabasco_2014_La_Innovacion_tecnologica_para_la_seguridad_alimentaria_ISBN_978-607-606-212-8/links/583890aa08ae3d91723ddda5/XXVI-Reunion-Cientifica-Tecnologica-Forestal-y-Agropecuaria-Tabasco-2014-La-Innovacion-tecnologica-para-la-seguridad-alimentaria-ISBN-978-607-606-212-8.pdf
- Mezette, T. F., Blumer, C. G., & Veasey, E. A. (2013). Morphological and molecular diversity among cassava genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48, 510-518.
- Mtunguja, M. K., Ranjan, A., Laswai, H. S., Muzanila, Y., Ndunguru, J., & Sinha, N. R. (2017). Genetic diversity of farmer-preferred cassava landraces in Tanzania based on morphological descriptors and single nucleotide polymorphisms. *Plant genetic resources*, 15(2), 138-146. <https://doi.org/10.1017/S1479262115000453>
- Mutoni, C. K., Nzuve, F. M., Miano, D. W., Kivuva, B. M., Obare, I. J., Shah, T. M., & Ferguson, M. E. (2023). Genetic diversity of cassava landraces and documentation of farmer's knowledge in Lamu, Kenya. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, 2189-2201. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01710-9>
- NASA. (2024). NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). Data Access Viewer (DAV) v2.4.0. [software]. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nogueira, A. F., Moda-Cirino, V., Delfini, J., Brandão, L. A., Mian, S., Constantino, L. V., Zeffa, D. M., dos Santos, N. J., & Azeredo Goncalves, L. S. (2021). Morpho-agronomic, biochemical and molecular analysis of genetic diversity in the Mesoamerican common bean panel. *Plos one*, 16(4). Article e0249858. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249858>
- Obare, I. J., Charimbu, M. K., Mafurah, J., Mutoni, C. K., Woyengo, V. W., Shah, T., & Ferguson, M. E. (2023). Collection of cassava landraces and associated farmers' knowledge, genetic diversity and viral incidence assessment in western Kenya. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, 2449-2466. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01764-9>
- Obayelu, O. A., Akintunde, O. O., & Obayelu, A. E. (2015). Determinants of on-farm cassava biodiversity in Ogun State, Nigeria. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(4), 298-308. <https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1071282>
- Ogbonna, A. C., Braatz, de A. L.R., Mueller, L. A., Oliveira, E. J., & Bauchet, G. J. (2021). Comprehensive genotyping of a Brazilian cassava (*Manihot esculenta* Crantz) germplasm bank: insights into diversification and domestication. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1343-1362. <https://doi.org.ezproxy.uv.mx/10.1007/s00122-021-03775-5>
- Pastório, M. A., Hoshino, A. T., Kitzberger, C. S., Bortolotto, O. C., De Oliveira, L. M., Dos Santos, A. M., Lima, W. F., Menezes Junior, A. D., & Androcigli, H. G. (2023). The leaf color and trichome density influence the whitefly infestation in different cassava cultivars. *Insects*, 14(1), 1-9. <https://doi.org/10.3390/insects14010004>
- Pérez, D., Mora, R., & López-Carrascal, C. (2019). Conservación de la diversidad de yuca en los sistemas tradicionales de cultivo de la Amazonía. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 202-212. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.75428>
- Pierre, N., Wamalwa, L. N., Muiru, W. M., Simon, B., Kanju, E., Ferguson, M. E., Ndavi, M. M.,

- Tumwegamire, S. (2022). Genetic diversity of local and introduced cassava germplasm in Burundi using DArTseq molecular analyses. *PLoS ONE* 17(1). Article e0256002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256002>
- Pineda, M., Morante, N., Salazar, S., Cuásquer, J., Hyde, P. T., Setter, T. L., Ceballos, H. (2020). Induction of earlier flowering in cassava through extended photoperiod. *Agronomy*, 10. Article 1273. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091273>
- Rós, A. B., Hirata, A. C. S., de Araújo, H. S., & Narita, N. (2011). Cassava cultivars growth, phenology and yield. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41(4): 552-558. <https://doi.org/10.5216/pat.v4i4.11075>
- Salinas-Cach, G. A., González-Valdivia, N. A., Arcocha-Gómez, E., Burgos-Campos, M. A., García-Sánchez, A. S., Baizabal-Zapata, R. (2019). Caracterización de accesiones de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la Península de Yucatán, México. In Cetzel-Ix, W., Casanova-Lugo, F., Chay-Canul, A.J., & Martínez-Puc, J.F. Agroecosistemas tropicales: conservación de recursos naturales y seguridad alimentaria. México. (pp. 91-96). Ed. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chiná- Instituto Tecnológico de la Zona Maya. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Casanova-Lugo/publication/331354885_AGROECOSISTEMAS_TROPICALES_CONSERVACION_DE_RECURSOS_NATURALES_Y_SEGURIDAD_ALIMENTARIA/links/5c9ea9a4299bf11169501572/AGROECOSISTEMAS-TROPICALES-CONSERVACION-DE-RECURSOS-NATURALES-Y-SEGURIDAD-ALIMENTARIA.pdf
- Santos, A. D., e Sousa, M. B., Alves, A. A. C., & de Oliveira, E. J. (2024). Environmental factors influence the production of flowers and fruits of cassava. *Scientia Horticulturae*, 323. Article 112498. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112498>
- Silva, S.L., Diniz, R. P., Neves, R. D. J., Alves, A. A. C., & Oliveira, E. J. D. (2018). Grafting as a strategy to increase flowering of cassava. *Scientia Horticulturae*, 240, 544-551. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.070>
- Singh, R., Semwal, D. P., & Bhatt, K. C. (2016). Genetic variability and diversity pattern for agromorphological traits in Indian mustard germplasm. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*, 29(1), 52-58. <https://doi.org/10.5958/0976-1926.2016.00009.7>
- Sivan, S., Arya, K., Sheela, M. N., Revathi, B. S., Krishnan, P., & Muthusamy, S. K. (2023). Genetic diversity analysis of Indian cassava (*Manihot esculenta* Crantz) accessions using morphological and molecular markers. *South African Journal of Botany*, 161, 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.027>
- Thiele, G., Friedmann, M., Campos, H., Polar, V., & Bentley, J. W. (2022). Root, tuber and banana food system innovations: Value creation for inclusive outcomes. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92022-7>
- Tize, I., Fotso, A. K., Nukenine, E. N., Masso, C., Ngome, F. A., Suh, C., Lendzemo, V. W., Nchoutnji, I., Manga, G., Parkes, E., Kulakow, P., Kouebou, C., Fiaboe, K. K., & Hanna, R. (2021). New cassava germplasm for food and nutritional security in Central Africa. *Scientific Reports*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86958-w>
- Tovar, E., Bocanegra, J. L., Villafañe, C., Fory, L., Velásquez, A., Gallego, G., & Moreno, R. (2016). Diversity and genetic structure of cassava landraces and their wild relatives (*Manihot* spp.) in Colombia revealed by simple sequence repeats. *Plant Genetic Resources*, 14(3), 200-210. <https://doi.org/10.1017/S1479262115000246>

- Wooding, S. P., & Payahua, C. N. (2022). Ethnobotanical diversity of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the Peruvian Amazon. *Diversity*, 14(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/d14040252>
- Zaiontz, C. (2023). Real Statistics Using Excel. Shannon's Diversity Index [software]. <https://real-statistics.com/descriptive-statistics/diversity-indices/shannons-diversity-index/>
- Zambrano, A. Y., Demey, J. R., Fuenmayor, F., Segovia, V., & Gutiérrez, Z. (2003). Diversidad genética de una colección de yuca a través de marcadores moleculares RAPDs. *Agronomía Tropical*, 53(2), 155-174.