



El rastrojo como eje de resiliencia forrajera: Índices sintéticos y productividad pecuaria en la Frailesca, Chiapas, México †

[Stover as a core element of forage resilience: Synthetic indices and livestock productivity in Frailesca, Chiapas, Mexico]

Ernesto Javier Gómez-Padilla¹, Francisco Guevara-Hernández^{2*},
 Manuel Alejandro La O-Arias², José Roberto Aguilar-Jiménez³,
 René Pinto-Ruiz² and Ingrid Abril Valdivieso-Pérez³

¹ Universidad Autónoma de Chiapas. Programa doctoral en Ciencias Agropecuarias y Sustentabilidad. Boulevard Laguitos No. 424, Col. Los Laguitos, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29020. E mail: ernesto.gomez54@unach.mx

² Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V. Carretera Ocozocoautla–Villaflores Km. 84.5, Villaflores, Chiapas, C.P. 30470. E mail: francisco.guevara@unach.mx*; manuel.arias@unach.mx; rene.pinto@unach.mx; jmfy@unach.mx

³ Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Campus II, Carretera Emiliano Zapata Km. 8, Ejido Terán, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas C.P. 29060. E mail: joseraguilar@unach.mx

⁴ Instituto Tecnológico de Conkal. Avenida Tecnológico s/n, Conkal, Yucatán C.P. 97345. E mail: abril.vp@conkal.tecnm.mx

* Corresponding author

SUMMARY

Background. Corn stover functions as a temporary agroecosystem in the Frailesca region of Chiapas and represents a strategic resource to sustain livestock during prolonged dry periods. **Objective.** To characterize the forage resilience of the stover-based temporary agroecosystem in Frailesca, Chiapas, through the construction and application of synthetic indices, and to analyze its relationship with livestock productivity in order to identify the factors that determine its functional stability and guide its sustainable management. **Methodology.** Sixty agricultural, livestock, and mixed production units were evaluated in the municipalities of Villaflores, Villa Corzo, and La Concordia through semi-structured interviews and production records that integrated 84 variables from both the crop and livestock subsystems. Three synthetic indices were constructed: the Forage Resilience Index (FRI), which expresses the effective availability of biomass; the Adjusted Forage Resilience Index (FRIadj), which incorporates off-farm access and stocking rate; and the Seasonal Resilience Index (SRI), which reflects the temporal orientation of the resource. Data were analyzed using descriptive statistics, correlation analyses, and generalized linear regression models (GLM Gamma-log). **Results.** Bale storage and access to external stover areas were the main determinants of resilience, whereas animal density and days of stover availability during the dry season were not significant. Increases in FRIadj were associated with higher meat and milk yields, which confirms this index as an operational indicator of resilience.

Implications. Livestock resilience in the Frailesca region depends less on the total amount of stover and more on its management through storage and territorial exchange networks. The FRIadj provides a practical tool for evaluating forage stability and anticipating meat and milk productivity, offering theoretical, methodological, and applied bases to strengthen the sustainability of tropical agroecosystems. **Conclusions.** Forage resilience in the Frailesca region relies primarily on bale storage and access to external stover sources, rather than on traditional variables such as animal density or gross availability. These results highlight that livestock stability during the dry season depends on active resource management and on the territorial organization of producers.

Key words: Tropical agroecosystems; forage resilience; maize stover; livestock productivity; synthetic indices.

† Submitted August 3, 2025 – Accepted November 6, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6485>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
 ISSN: 1870-0462.

ORCID = E.J. Gómez-Padilla: <https://orcid.org/0000-0002-3055-8203>; F. Guevara-Hernández: <https://orcid.org/0000-0002-1444-6324>; M.A. La O-Arias: <https://orcid.org/0000-0002-6491-2063>; I.A. Valdivieso-Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-8033-8666>; R. Pinto-Ruiz: <https://orcid.org/0000-0003-1962-6874>; R. Aguilar-Jiménez: <https://orcid.org/0000-0003-3826-9331>

RESUMEN

Antecedentes. El rastrojo se manifiesta como un agroecosistema temporal en la región Frailesca de Chiapas y constituye un recurso estratégico para sostener la ganadería durante los prolongados períodos de sequía. **Objetivo.** Caracterizar la resiliencia forrajera del agroecosistema rastrojo en la Frailesca, Chiapas, mediante índices sintéticos y analizar su relación con la productividad pecuaria para identificar los factores que determinan su estabilidad funcional y orientar su manejo sostenible. **Metodología.** Se trabajó con 60 unidades de producción agrícola, pecuaria o mixtas en Villaflor, Villa Corzo y La Concordia, mediante entrevistas semiestructuradas y registros productivos que integraron 84 variables de los subsistemas agrícola y pecuario. Se construyeron tres índices: el de Resiliencia Forrajera (IRF), que expresa la disponibilidad efectiva de biomasa; el IRF ajustado (IRFaj), que incorpora acceso externo y carga animal; y el Índice de Resiliencia Estacional (REst), que refleja la orientación temporal del recurso. El análisis se realizó mediante estadística descriptiva, correlaciones y modelos de regresión lineal generalizados (GLM Gamma-log). **Resultados.** El acopio de pacas y el acceso a superficies externas de rastrojo fueron los principales determinantes de la resiliencia, mientras que la densidad animal y los días de rastrojo en estiaje no resultaron significativos. Incrementos en el IRFaj se asociaron con mayores rendimientos de carne y leche, lo que confirma este índice como un indicador operativo de resiliencia. **Implicaciones.** La resiliencia pecuaria en la Frailesca depende menos de la cantidad de rastrojo y más de su gestión mediante acopio y redes territoriales. El IRFaj se propone como herramienta útil para evaluar la estabilidad forrajera y anticipar la productividad de carne y leche, aportando bases para fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales. **Conclusiones.** La resiliencia forrajera en la Frailesca se sostiene en el acopio de pacas y el acceso a rastrojo externo, más que en variables tradicionales como la densidad animal o la disponibilidad bruta. Estos resultados subrayan que la estabilidad pecuaria durante la sequía depende de la gestión activa del recurso y de la organización territorial de los productores.

Palabras clave: Agroecosistemas tropicales; resiliencia forrajera; rastrojo de maíz; productividad pecuaria; índices sintéticos.

INTRODUCCIÓN

En México, el maíz es un cultivo estratégico, tanto por su aporte alimentario como por los volúmenes de biomasa que genera. Además de los más de 26 millones de toneladas de grano anuales, se estima que se producen entre 27 y 33 millones de toneladas de rastrojo, según la ecuación de Borja-Bravo *et al.* (2013) y los reportes del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2024).

En Chiapas, este volumen alcanza de 2.5 a 3 millones de toneladas y, dentro del estado, la región Frailesca concentra alrededor de 235 mil toneladas, lo que refleja la magnitud del recurso y su papel estratégico para la ganadería en los meses de sequía, dada la estrecha vinculación entre la agricultura de temporal y la producción pecuaria (SIAP, 2025). No obstante, pese a su abundancia y relevancia para la subsistencia campesina, el rastrojo aún suele considerarse un subproducto, más que un componente esencial de los agroecosistemas tropicales.

La mayoría de las estadísticas agrícolas y estudios académicos han centrado su atención en el grano y relegado al rastrojo por su bajo valor nutricional (Desta, 2023; Shah *et al.*, 2025). Gran parte de la literatura lo describe como un material con alto contenido de fibra y baja digestibilidad, lo que ha sobredimensionado sus limitaciones y ha reducido su función como recurso clave para la alimentación del ganado y para la reproducción social de las familias campesinas durante la estación seca (Guerrero-Rodríguez *et al.*, 2023).

En este sentido, el rastrojo no puede entenderse únicamente como una práctica de aprovechamiento puntual, sino como un agroecosistema temporal que emerge en los meses secos y desaparece con el inicio de las lluvias (Gómez-Padilla *et al.*, 2025b). Esta condición le confiere un carácter dinámico y complejo, vinculado tanto a la temporalidad agrícola como a las decisiones de manejo. A partir de esta conceptualización, estudios recientes demostraron la existencia de tres temporalidades del agroecosistema rastrojo y su correspondencia con tipologías de productores en la región Frailesca (Gómez-Padilla *et al.*, 2025a), lo que evidencia la complejidad funcional del sistema y su relevancia para comprender la sostenibilidad productiva en contextos tropicales.

A pesar de esta importancia práctica, los estudios disponibles han analizado variables específicas como la carga animal, la producción de grano o la disponibilidad de biomasa, sin integrarlas en un marco que permita comprender de manera conjunta la resiliencia y la productividad. Esta fragmentación limita la generación de criterios operativos capaces de orientar estrategias diferenciadas según la diversidad de productores y sus formas de acopio, conservación y acceso territorial.

Para responder a este vacío, se requieren métodos que interpreten de forma integradora las múltiples interacciones del agroecosistema. Una alternativa es la construcción de índices sintéticos, en línea con la visión de Cabell y Oelofse, (2012) quienes los plantearon como estrategia metodológica para captar de manera más integral las relaciones dentro de los agroecosistemas. En este estudio, esta aproximación

permite relacionar la temporalidad del rastrojo con su disponibilidad, las prácticas de manejo y sus efectos sobre la producción pecuaria durante la estación seca.

Asimismo, aplicaciones recientes en otros sistemas agropecuarios muestran que condensar variables productivas, forrajeras y territoriales en indicadores comparables constituye un instrumento robusto para evaluar la estabilidad del agroecosistema en los períodos de escasez y, al mismo tiempo, un lenguaje común entre investigadores, productores y responsables de políticas públicas (Sietz *et al.*, 2019).

Por estas razones, resulta necesario avanzar en la búsqueda de evidencia empírica y herramientas operativas que fortalezcan tanto la reflexión académica como la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales. En este marco, el objetivo de este artículo es caracterizar la resiliencia forrajera del agroecosistema temporal rastrojo en la Frailesca, Chiapas, mediante la construcción y aplicación de índices sintéticos, y analizar su relación con la productividad pecuaria durante el estiaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y enfoque epistemológico

La investigación se desarrolló entre enero y diciembre de 2023 en tres municipios de la región Frailesca de Chiapas, México: Villaflores, Villa Corzo y La Concordia. El estudio se enmarcó en el paradigma sistémico sustentado en la Teoría General de Sistemas (von Bertalanffy, 1968, 1975), con un enfoque interdisciplinario, no experimental y de tipo exploratorio-descriptivo.

Unidades de análisis y base de datos

Se trabajó con 60 unidades productor-predio seleccionadas mediante entrevistas semiestructuradas, complementadas con registros productivos. La base de datos integró 84 variables relacionadas con el funcionamiento del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería, abarcando los subsistemas agrícola y pecuario. Las variables se organizaron en cuatro grupos principales: disponibilidad de rastrojo (días de rastrojo en estiaje, DRE; pacas producidas, P; área de rastrojo off-farm, AO_f), carga animal (densidad animal, DA_n), producción agropecuaria (carne, leche y grano) y contexto físico (altitud y precipitación anual), estos últimos tomados de información oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (INEGI, 2024; CONAGUA, 2024).

Construcción de índices de resiliencia y productividad

La complejidad del agroecosistema temporal rastrojo exige métricas que vayan más allá del análisis de variables aisladas y permitan captar de forma integrada la interacción entre manejo, resiliencia y productividad. Con este propósito se diseñaron índices sintéticos, entendidos como indicadores compuestos que sintetizan múltiples dimensiones en valores operativos y comparables (Nardo *et al.*, 2005). A partir de esta lógica metodológica se construyeron las ecuaciones adaptadas al contexto específico de la Frailesca, donde el rastrojo constituye un recurso crítico en la estación seca.

El Índice de Desfase (ID) y la coincidencia de lluvias (%) expresan la sincronía entre el ciclo agrícola y la temporada de precipitaciones (Tabla 1). El Índice de Resiliencia Forrajera (IRF) refleja la disponibilidad efectiva del recurso en períodos críticos, mientras que el IRF ajustado (IRFaj) incorpora factores de gestión (densidad animal, DA_n) y acceso territorial (área off-farm, AO_f), aportando una medida más precisa de la resiliencia pecuaria. De manera complementaria, el Índice de Resiliencia Estacional (REst) expresa la proporción del periodo de rastrojo coincidente con el estiaje, considerado el momento más crítico de escasez.

En conjunto, estos índices permiten relacionar el manejo del rastrojo con la resiliencia productiva del agroecosistema durante la sequía. Este enfoque se sustenta en propuestas recientes que promueven métricas multidimensionales para evaluar la resiliencia en sistemas agropecuarios (Cleves *et al.*, 2022; Cleves-Leguizamo *et al.*, 2020), así como en evidencias de la propia Frailesca, donde se han identificado dimensiones clave del uso del rastrojo asociadas con la temporalidad agrícola (Gómez-Padilla *et al.*, 2025).

Ecuaciones para la determinación de los índices relacionados con la resiliencia

A continuación, se presentan las ecuaciones operativas de los índices utilizados en el estudio. Cuando corresponde, las variables se estandarizaron mediante z-score y se reescalaron al rango [0,1] para su integración.

1) Índice de desfase entre lluvia-siembra (ID)

$$ID = FSi - FIP$$

Donde:

FSi: fecha de inicio de las siembras de maíz

FIP: fecha de inicio de las precipitaciones (época de temporal)

Tabla 1. Índices para la evaluación de la interacción manejo–resiliencia–productividad del agroecosistema.

Categoría	Variable / Índice	Descripción
Desempeño climático-productivo	Índice de desfase entre lluvia y siembra (ID)	Proporción del ciclo agrícola que ocurre fuera del periodo lluvioso regional
	Coincidencia de precipitaciones CPre (%)	Porcentaje de días del ciclo dentro del periodo lluvioso
Resiliencia del rastrojo	Índice de Resiliencia Forrajera (IRF)	Disponibilidad efectiva de rastrojo para el hato
	Índice de Resiliencia Forrajera ajustada (IRFaj)	Capacidad del sistema para sostener el rastrojo en estiaje, ajustado por estacionalidad, accesos externos y demanda animal
	Rastrojo en estiaje (REst)	Porcentaje del periodo de rastrojo que coincidió con la estación seca, indicador de orientación temporal del recurso
Variables operativas asociadas	Rastrojo días totales (DTR)	Duración total de disponibilidad de rastrojo en el predio
	Rastrojo días en estiaje (DRE)	Tiempo de disponibilidad de rastrojo específicamente dentro de la estación seca
	Pacas (kg ha^{-1})	Producción de pacas por hectárea
	Área off-farm (AOf)	Superficie de rastrojo fuera del predio usada por el ganado (ha)
Producción ganadera	Densidad cabezas (ha)	Número de cabezas por hectárea
	Carne ($\text{kg peso vivo año}^{-1}$)	Producción anual de carne
	Leche en estiaje (L dia^{-1})	Producción diaria de leche

Interpretación: valores positivos indican siembra posterior al inicio de lluvias; negativos, siembra previa; cercanos a 0, alta sincronía.

2) Coincidencia de precipitaciones (Cpre)

$$\text{CPre}(\%) = 100 \times (\text{DDPP} / \text{DCi})$$

Donde:

DDPP: Días dentro del periodo de precipitaciones

DCi: Días del ciclo

3) Índice de Resiliencia forrajera (IRF)

Se integra a partir de componentes de disponibilidad efectiva de rastrojo.

$$\text{IRF}^* = z(P) + z(DRE)$$

$$\text{IRF} = (\text{IRF}^* - \min(\text{IRF}^*)) / (\max(\text{IRF}^*) - \min(\text{IRF}^*))$$

Donde:

IRF*: Puntaje compuesto previo al reescalado

P: Producción de pacas por hectárea (kg ha^{-1})

DRE: Días de rastrojo disponibles durante el estiaje

$z(x) = (x - \bar{x}) / s_x$: estandarización (media = 0, desviación estándar = 1) respecto a la muestra.

Interpretación:

$\text{IRF} \approx 1$: alta resiliencia forrajera; alta disponibilidad efectiva de rastrojo en la estación seca (Índice cercano al máximo del rango [0,1]).

$\text{IRF} \approx 0$: baja resiliencia forrajera; baja disponibilidad efectiva en estiaje (índice cercano al mínimo del rango [0,1])

4) Índice de Resiliencia Forrajera Ajustada (IRFaj)

Incluye factores de acceso y gestión.

$$\text{IRFaj} = \text{IRF}^* + z(AOf) + z(DAn)$$

$$\text{IRFaj} = (\text{IRF}^*_{aj} - \min(\text{IRF}^*_{aj})) / (\max(\text{IRF}^*_{aj}) - \min(\text{IRF}^*_{aj}))$$

Donde:

IRF^*_{aj} : puntaje compuesto previo al reescalado del IRF base

AOf=Área de rastrojo usada fuera del predio (ha), (off-farm)

$z(x) = (x - \bar{x}) / s_x$ = estandarización (media = 0, desviación estándar = 1) respecto a la muestra.

DAn=densidad animal (cabezas ha^{-1})

Interpretación:

$\text{IRFaj} \approx 1$: mayor resiliencia forrajera ajustada (índice cercano al máximo del rango [0,1])

$\text{IRFaj} \approx 0$: menor resiliencia forrajera ajustada (índice cercano al mínimo del rango [0,1])

Nota metodológica. Cada componente se incorporó estandarizado (media = 0, desviación estándar = 1) para evitar ponderaciones a priori y estimar empíricamente su aporte relativo. AOf se concibe como posible reforzador de la disponibilidad; DAn se

específica como marcador de presión de demanda. La dirección y magnitud de estas asociaciones se presentan en la sección Resultados.

5) Rastrojo en estiaje (REst)

$$\text{REst}(\%) = 100 \times (\text{DRE} / \text{DTR})$$

Donde:

DTR=días totales de disponibilidad del rastrojo

Interpretación:

$\text{REst} \approx 0\%$: agotamiento temprano; vulnerabilidad o uso intensivo inicial que deja al sistema sin soporte en la sequía.

$\text{REst} \approx 40\text{--}70\%$: cobertura en gran parte de la sequía, refleja un manejo estratégico.

$\text{REst} \approx 100\%$: presencia del rastrojo durante toda la sequía; puede indicar alta conservación, pero también baja carga o subutilización (no implica eficiencia productiva por si sola).

Procesamiento estadístico

Se verificaron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (Levene). Cuando correspondía, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para distribuciones no normales. Las asociaciones entre variables se evaluaron mediante correlaciones de Pearson o Spearman, según cumplimiento de supuestos. La multicolinealidad se comprobó mediante el Variance Inflation Factor (VIF), adoptando $\text{VIF} < 5$ como criterio; para la comparación de efectos se emplearon predictores centrados/estandarizados cuando fue pertinente. Todas las pruebas fueron bilaterales y se reportaron IC95%.

El IRFaj se modeló mediante regresión múltiple por mínimos cuadrados ordinarios con errores estándar robustos HC3 (MacKinnon y White, 1985). Se inspeccionaron residuos, leverage y distancia de Cook para detectar observaciones influyentes.

La producción de carne y leche se analizó en función del IRFaj mediante modelos lineales generalizados (GLM) con distribución Gamma y enlace log, adecuados para variables positivas y asimétricas. Se verificó la positividad de las respuestas, se evaluó la dispersión a través del parámetro de escala y se reportaron Deviance, AIC y pseudo-R² como métricas de ajuste. Se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con notación * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ y *** $p < 0.001$.

Los análisis se realizaron con Statistica v.10 para Windows (StatSoft, 2014) y con librerías de Python para el procesamiento de datos, modelado y visualización: *pandas* (McKinney, 2010), *numpy* (Harris *et al.*, 2020), *statsmodels* (Seabold y Perktold, 2010) y *matplotlib* (Hunter, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización general del agroecosistema. Resultados de la estadística descriptiva

Las variables clave del agroecosistema mostraron marcada heterogeneidad entre productores de la Frailesca (Tabla 2). En promedio, se registraron 82.8 días de disponibilidad de rastrojo en estiaje (rango: 0–210), con diferencias atribuibles a estrategias contrastantes de conservación y uso. La producción de pacas presentó también una dispersión amplia (0–478.6 kg ha⁻¹), con coeficiente de variación superior al 200 %, indicador de la desigual capacidad de acopio.

El área de rastrojo utilizada fuera del predio para alimentar el ganado (off-farm) promedió 3.3 ha. Mientras algunos productores no accedieron a superficies externas, otros llegaron a disponer de hasta 30 ha, lo que resalta la existencia de acuerdos y redes de acceso a recursos forrajeros como el rastrojo en la región. La densidad animal fue, en media, 1.9 cabezas ha⁻¹, con valores extremos de hasta 16 cabezas ha⁻¹, lo que confirma la coexistencia de diversas formas de intensidad productiva (Tabla 2).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de variables clave relacionadas con temporalidad, resiliencia forrajera y producción en agroecosistemas de la Frailesca (n = 60).

Variable	Media ± DE	Min-Máx	CV (%)
DRE (días)	82.8 ± 69.4	0–210	83.7
P (kg ha ⁻¹)	46.0 ± 99.9	0–478.6	217.2
AOf (ha)	3.3 ± 5.9	0–30	175.6
DAñ (cabezas ha ⁻¹)	1.9 ± 2.8	0–16	146.9
Carne (kg peso vivo año ⁻¹)	1302 ± 1665	0–8000	127.9
Leche en estiaje (L día ⁻¹)	23.5 ± 41.6	0–150	177.1
IRF (0–1)	0.23 ± 0.19	0–0.96	82.8
IRFaj (0–1)	0.16 ± 0.17	0–0.75	103.4

Nota. DE, desviación estándar; CV, coeficiente de variación. DRE, días de rastrojo en estiaje; P, producción de pacas (kg ha⁻¹); AOf, área de rastrojo fuera del predio (ha); DAñ, densidad animal (cabezas ha⁻¹). IRF, índice de resiliencia forrajera; IRFaj, índice de resiliencia forrajera ajustada (reescalados a [0,1]). Leche, L día⁻¹ en estiaje.

En términos productivos, la carne reportó un promedio de 1302 kg peso vivo por año, con alta variabilidad ($CV=127.9\%$), mientras que la leche alcanzó 23.5 litros diarios en promedio, aunque con un rango de 0 a 150 litros, lo que refleja una marcada diferenciación entre unidades orientadas a carne o a doble propósito (Tabla 2).

Finalmente, los índices derivados mostraron también una elevada variabilidad: el IRF promedió 0.23 (rango 0–0.96) y el IRFaj 0.16 (rango 0–0.75), con coeficientes de variación superiores al 80 %. Estos resultados ponen de manifiesto la heterogeneidad del agroecosistema y la pertinencia de emplear índices sintéticos para captar la capacidad de resiliencia forrajera frente a condiciones de estiaje (Tabla 2).

La heterogeneidad observada en P, AOy y DAn, con asimetrías y rangos amplios, refleja estrategias de manejo contrastantes entre predios, probablemente influenciadas por diferencias en capacidad de acopio, acceso a superficies externas y orientación productiva. La dispersión de P y AOy anticipa su papel como fuentes clave de variación en la resiliencia, especialmente en aquellos productores que gestionan forraje durante el estiaje como estrategia de sostenibilidad. Por su parte, los valores extremos de DAn corresponden a pocos predios con carga animal elevada.

El análisis descriptivo mostró alta variabilidad entre productores, con coeficientes de variación elevados y asimetrías marcadas en carne, leche y P (pacas) (Tabla 3). Este patrón refleja la coexistencia de predios sin producción junto con otros de alta intensidad, lo que explica la discrepancia entre medias altas y medianas bajas en dichos indicadores. En contraste, DAn, AOy y los índices (IRF e IRFaj) presentaron menor asimetría. En conjunto, estos resultados son consistentes con una

estructura heterogénea del agroecosistema, donde difieren las estrategias de acopio, el acceso a superficies externas, la tenencia de animales y la carga animal, con efectos directos sobre la disponibilidad y gestión del rastrojo en el estiaje.

Relación entre las variables. Análisis de las correlaciones

El análisis de correlaciones de Spearman reveló que la resiliencia forrajera ajustada (IRFaj) se asocia estrechamente con las prácticas de manejo del rastrojo y con los resultados pecuarios (Tabla 4). En particular, IRFaj mostró correlaciones positivas de alta magnitud con los días de rastrojo en estiaje (DRE), la producción de pacas (P), el área off-farm (AOy) y la densidad animal (DAn). Este patrón confirma que prolongar la disponibilidad del forraje, reforzarla con recursos externos y equilibrarla con la carga animal constituye la base de la resiliencia del sistema.

Asimismo, IRFaj se vinculó de manera consistente con la producción de carne y de leche, lo que evidencia que el desempeño animal depende directamente de la gestión del rastrojo y no únicamente del área agrícola disponible. En contraste, el IRF en su forma base mostró asociaciones similares, pero de menor magnitud, resaltando el valor de incorporar la demanda animal y el periodo crítico de estiaje en el cálculo ajustado.

Estos resultados muestran que la resiliencia forrajera no es un atributo aislado, sino un proceso integrado de almacenamiento (pacas), extensión temporal del rastrojo y acceso externo, que se traduce en mayores rendimientos pecuarios. Por ello, IRFaj emerge como un eje integrador de la resiliencia dentro del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería.

Tabla 3. Medidas robustas de tendencia central y dispersión complementarias a la estadística descriptiva general (n = 60).

Variable	Media ± DE	Mediana [IQR]
Días de rastrojo en estiaje (DRE, días)	82.83 ± 69.36	—
Producción de pacas (P, kg ha ⁻¹)	45.98 ± 99.86	0.00 [0.00–43.75]
Área de rastrojo off-farm (AOy, ha)	3.33 ± 5.85	—
Densidad animal (DAn, cabezas ha ⁻¹)	1.90 ± 2.80	—
Producción de carne (kg año ⁻¹)	1302.17 ± 1665.49	800.00 [300.00–1800.00]
Producción de leche (L día ⁻¹)	23.50 ± 41.61	0.00 [0.00–32.50]
IRF (0–1)	0.23 ± 0.19	—
IRFaj (0–1)	0.16 ± 0.17	—

Nota. Valores como media ± DE. Para variables con alta asimetría (P, carne, leche), se reporta además mediana [IQR] como medida robusta. Unidades: Dan, cabezas ha⁻¹; carne, kg año⁻¹; leche, L día⁻¹ (en estiaje). IRF e IRFaj reescalados a [0,1].

	DRE	P	AOf	DAn	Carne	Leche	IRF
P	0.46 ***						
AOf	0.34 **	0.49 ***					
DAn	0.55 ***	0.53 ***	0.63 ***				
Carne	0.68 ***	0.50 ***	0.7 ***	0.7 ***			
Leche	0.35 **	0.48 ***	0.34 **	0.45 ***	0.60 ***		
IRF	0.71 ***	0.61 ***	0.54 ***	0.59 ***	0.72 ***	0.50 ***	
IRFaj	0.67 ***	0.7 ***	0.65 ***	0.68 ***	0.75 ***	0.6 ***	0.82 ***

Tabla 4. Correlaciones de Spearman entre variables de manejo del rastrojo, resiliencia forrajera e indicadores pecuarios. Nota. Se presentan coeficientes de correlación de Spearman (ρ). Significancia: ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. DRE, días de rastrojo en estiaje; P, pacas (kg ha^{-1}); AOf, área de rastrojo off-farm (ha); DAn, densidad animal (cabezas ha^{-1}); Carne, producción de carne (kg año^{-1}); Leche, producción de leche (L día^{-1} en estiaje); IRF, índice de resiliencia forrajera base; IRFaj, índice de resiliencia forrajera ajustada.

Con el propósito de sintetizar las relaciones identificadas, se elaboró un esquema conceptual (Figura 1). En este se plantea que las prácticas de manejo y disponibilidad del rastrojo (DRE, P, AOf y DAn) actúan como factores determinantes que configuran la resiliencia forrajera del sistema. El IRFaj

emerge, así como nodo integrador, al articular la oferta forrajera con la demanda animal, y se proyecta en los resultados pecuarios (carne y leche), expresando la capacidad del agroecosistema para sostener la producción en escenarios de sequía.

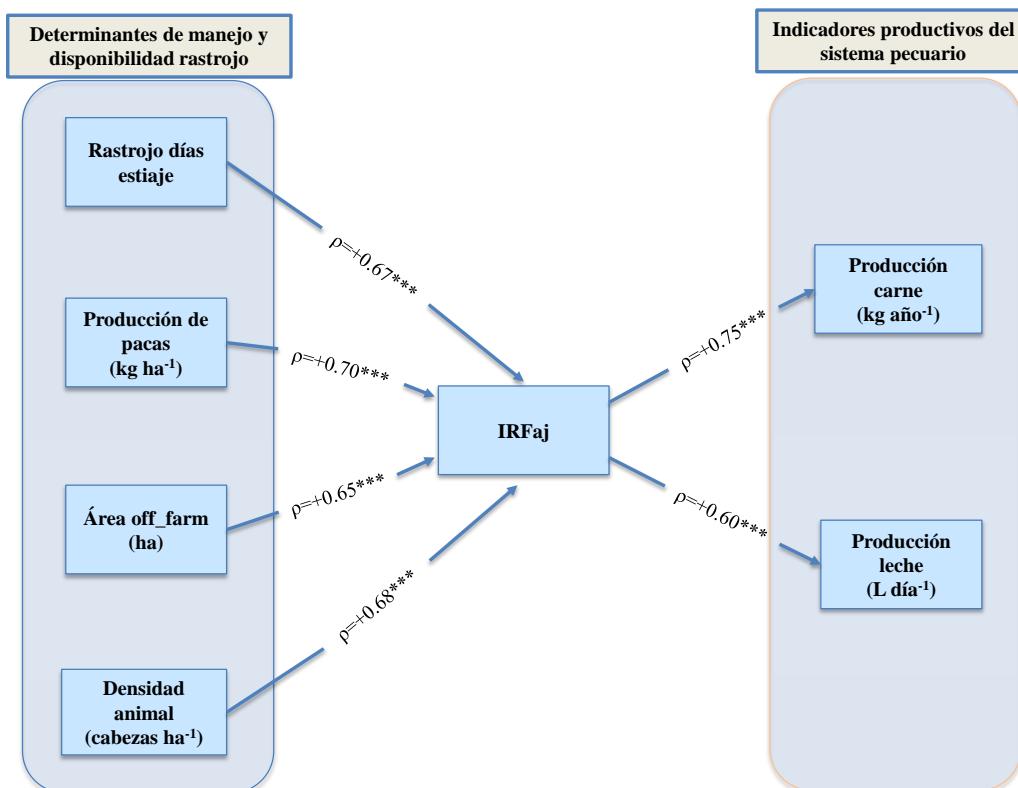


Figura 1. Esquema conceptual del vínculo entre los determinantes de manejo del rastrojo, el IRFaj y los indicadores pecuarios. Significancia: *** $p < 0.001$.

De manera integrada, la figura posiciona al IRFaj como una propiedad emergente del sistema, donde la resiliencia no depende del volumen inicial de residuos, sino de la capacidad de gestión, acopio y articulación del recurso durante el estiaje.

Efecto del Índice de Resiliencia Forrajera sobre la producción pecuaria

Modelo de regresión múltiple para IRFaj

El modelo de regresión múltiple con errores estándar robustos explicó una proporción sustancial de la variabilidad del IRFaj ($R^2 = 0.664$; $R^2_{adj} = 0.628$; $p < 0.001$) (Tabla 5). Los predictores más relevantes fueron la producción de pacas y el área off-farm, ambos altamente significativos, mientras que la densidad animal (DAn) y el rastrojo en estiaje (DRE) no mostraron efectos netos sobre el índice.

En términos prácticos, un incremento de 100 kg ha⁻¹ de pacas se asocia con ≈ 0.08 unidades adicionales en IRFaj, y cada hectárea adicional de rastrojo off-farm aporta $+0.011$ unidades al índice. Estos resultados confirman que la resiliencia depende de la biomasa efectivamente disponible y del acceso territorial, más que de la proporción bruta de rastrojo en sequía o de la presión animal considerada de forma aislada.

El hecho de que DAn no muestre un efecto significativo refuerza la idea de que aumentar cabezas sin garantizar forraje estable no conduce a resiliencia. De igual manera, el porcentaje bruto de rastrojo en estiaje pierde capacidad explicativa frente a variables operativas de manejo, lo que subraya que no basta con la disponibilidad aparente, sino con la capacidad de conservar y movilizar la biomasa.

En conjunto, la evidencia respalda la hipótesis de que el acopio y la integración territorial constituyen palancas estratégicas en la estabilidad del agroecosistema durante el estiaje.

La representación gráfica de los coeficientes con intervalos de confianza al 95 % refuerza los resultados del modelo (Figura 2). Pacas y área off-farm muestran efectos positivos y consistentes, lo que confirma su papel central en la resiliencia forrajera. En contraste, densidad animal y rastrojo en estiaje presentan intervalos que cruzan la línea de cero, lo que indica ausencia de influencia significativa en el contexto multivariable.

La figura sintetiza jerárquicamente el peso de los predictores: mientras que el acopio de biomasa y el acceso territorial emergen como factores clave, las demás variables presentan una influencia menor en el modelo. Estos hallazgos muestran que la resiliencia forrajera en la Frailesca, expresada a través del uso y manejo del rastrojo, no depende de la magnitud inicial de los residuos, sino de la capacidad de los productores para conservar, acopiar y movilizar biomasa a lo largo del estiaje.

El predominio de la producción de pacas y del acceso off-farm como predictores significativos, refleja dos estrategias contrastantes pero complementarias: por un lado, la creación de capacidades para producir y almacenar pacas; y por el otro, la articulación mediante acuerdos territoriales y redes de intercambio que integran dimensiones sociales, económicas y productivas.

Ambas prácticas explican la heterogeneidad observada entre unidades productivas y evidencian que la estabilidad ganadera frente a la sequía se sostiene más en la gestión activa de los recursos, que en la mera disponibilidad bruta de rastrojo o en el simple aumento del hato. De este modo, el IRFaj se traduce en un indicador cuantitativo de lo que en la práctica constituye una propiedad emergente del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería: la resiliencia como resultado de la organización, el manejo y la integración territorial.

Tabla 5. Modelo OLS múltiple para IRFaj.

Variable	Coef.	EE (HC3)	t(z) robusto	p	IC95% (bajo)	IC95% (alto)	VIF
Constante	0.1391	0.0654	2.126	0.034	0.0109	0.267	-
Pacas (kg ha ⁻¹)	0.0008	0.0001	6.851	0.001	0.0005	0.001	1.55
Rastrojo en estiaje (%)	-0.00001	0.0006	-0.009	0.993	-0.0012	0.001	1.91
Área off-farm (ha)	0.01102	0.0022	5.008	0.001	0.0067	0.015	1.79
Densidad animal (cabezas/ha)	-0.0036	0.0084	-0.429	0.668	-0.0201	0.013	1.59

Nota. Coeficientes en escala original. Valores muy pequeños se muestran con cuatro decimales o notación científica. Errores estándar robustos (HC3). VIF, factor de inflación de varianza. DAn se incorporó al IRFaj como marcador estandarizado de presión de demanda, sin imponer signo a priori; su contribución se evaluó empíricamente y no resultó significativa ($p = 0.668$).

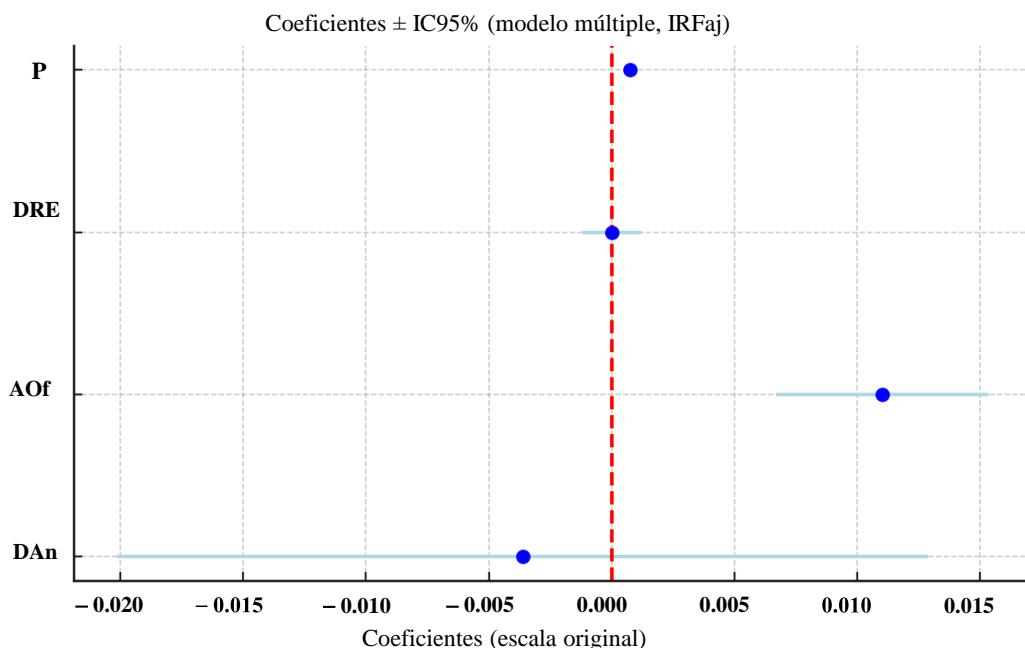


Figura 2. Coeficientes del modelo múltiple de IRFaj (\pm IC95%). Nota. La línea roja discontinua indica ausencia de efecto (0). P, pacas (kg ha^{-1}); DRE, días de rastrojo en estiaje; AOOf, área de rastrojo off-farm (ha); DAN, densidad animal (cabezas ha^{-1}); IRFaj, índice de resiliencia forrajera ajustada. Modelo ajustado con $n = 43$, $R^2 = 0.664$, $R^2_{\text{aj}} = 0.628$; $F(4,38) = 13.54$; $p < 0.001$; errores estándar robustos (HC3).

Modelos Gamma-log para resultados pecuarios

Los modelos univariados ajustados con distribución Gamma y enlace log mostraron efectos positivos y altamente significativos del IRFaj sobre la producción de carne y leche (Tabla 6). En carne (kg peso vivo/año), el coeficiente fue claramente positivo ($p < 0.001$), indicando que incrementos en IRFaj se traducen en aumentos proporcionales de la producción anual. El multiplicador estimado sugiere que un incremento de 0.1 unidades en IRFaj eleva en promedio 2.16 veces la producción de carne.

En el caso de leche (L día^{-1}) en época seca, el efecto también fue positivo y altamente significativo ($p < 0.001$). Aunque el ajuste presentó mayor variabilidad residual que en carne, la dirección del efecto se

mantuvo robusta: un incremento de 0.1 unidades en IRFaj aumenta en promedio 10.5 veces la producción de leche esperada en estiaje.

Estos resultados confirman que el IRFaj no solo capta estabilidad forrajera en términos de biomasa disponible, sino que además se traduce en productividad pecuaria tangible. El modelo Gamma-log se mostró adecuado para este análisis al manejar respuestas estrictamente positivas con dispersión creciente respecto a la media. En términos prácticos, la evidencia respalda que mejorar el IRFaj mediante acopio de pacas y acceso territorial a biomasa, repercute directamente en la disponibilidad de carne y leche en sequía, lo que fortalece la seguridad alimentaria de las familias y la estabilidad del agroecosistema.

Tabla 2. Modelos Gamma-log para resultados de Carne y Leche.

VD	α	β (IRF)	IC95% β (bajo)	IC95% β (alto)	$p(\beta)$	Deviance	Multiplicador $\Delta\text{IRF}=0.1$
Carne (kg año^{-1})	5.376	7.688	5.881	9.496	7.62e-17	1441.41	2.16×
Leche (L/día)	-2.752	23.525	17.486	29.564	2.26e-14	3049.04	10.51×

Nota: Modelos ajustados con distribución Gamma y enlace log. El multiplicador expresa el cambio proporcional en la variable dependiente (VD) ante un incremento de 0.1 en el Índice de Resiliencia Forrajera (IRF). $p < 0.001$ indica alta significancia estadística. VD = variable dependiente; α = intercepto; β = coeficiente del IRF; IC95% = intervalo de confianza al 95 %.

El mayor efecto del IRFaj sobre la leche en comparación con la carne refleja diferencias fisiológicas y de manejo entre ambos productos. La producción de leche responde de forma inmediata a la disponibilidad y calidad del forraje: durante el estiaje, un déficit se traduce en caídas rápidas del ordeño diario. En contraste, la carne expresa una acumulación anual, donde los animales pueden compensar pérdidas temporales de peso durante la época de lluvias. Este comportamiento explica que la leche muestre un multiplicador más alto en relación con la carne.

En el contexto de la Frailesca, donde muchos productores dependen del doble propósito, este hallazgo subraya la vulnerabilidad de la producción de leche en sequía y la importancia de estrategias de acopio y acceso territorial que garanticen continuidad en la oferta de biomasa. Por ello, el IRFaj no solo emerge como indicador de resiliencia forrajera, sino también como herramienta práctica para anticipar la estabilidad productiva de sistemas ganaderos bajo condiciones de variabilidad climática.

Predicciones gráficas: carne y leche en función del IRF

La curva ajustada con un modelo Gamma-log mostró una relación positiva y creciente entre el IRFaj y la producción anual de carne ($t \text{ año}^{-1}$) (Figura 3). El coeficiente estimado fue altamente significativo ($p < 0.001$), y un incremento de 0.1 unidades en el índice se

asocia con un aumento promedio de 2.16 veces en la producción de carne.

La forma exponencial de la curva indica que los beneficios de la resiliencia no son lineales: en valores bajos de IRFaj los incrementos tienen un impacto marginal, pero a partir de niveles intermedios los efectos se intensifican. En particular, al superar 0.40 unidades de IRFaj la producción prácticamente se duplica respecto a predios ubicados en el cuartil inferior, y hacia 0.53 unidades alcanza un crecimiento cercano a tres veces. Esto confirma la existencia de umbrales críticos de resiliencia, donde el sistema transita de la vulnerabilidad a la estabilidad productiva. Bajo esta lógica, la gestión del rastrojo no debe enfocarse solo en aumentar el índice de manera incremental, sino en garantizar que los productores crucen esos niveles mínimos que aseguran retornos visibles en la productividad.

La dispersión de los puntos alrededor de la curva refleja la heterogeneidad estructural de las unidades productivas: aun con valores semejantes de IRFaj, algunas alcanzan mayores rendimientos que otras debido a factores complementarios como la genética del hato, la suplementación alimentaria, la disponibilidad de agua o la infraestructura de manejo. Esto evidencia que el IRFaj es un predictor robusto de resiliencia pecuaria, aunque sus efectos están modulados por condiciones locales y prácticas adicionales.

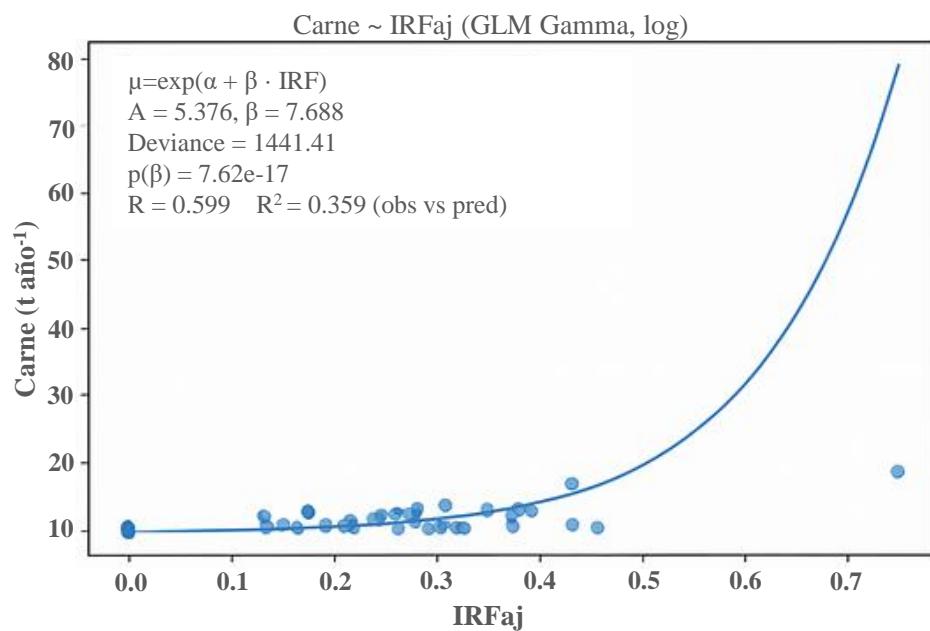


Figura 3. Curva de predicción de la producción de carne ($t \text{ año}^{-1}$) en función del Índice de Resiliencia Forrajera ajustada (IRFaj), ajustada mediante modelo Gamma con enlace log. Se muestran los valores observados y la curva estimada con IC95%. El coeficiente de IRFaj fue significativo ($p < 0.001$); un incremento de 0.1 unidades se asocia con un aumento promedio de 2.16× en la producción. Umbráles analíticos indican que la producción se duplica a partir de $\text{IRFaj} \approx 0.40$ y se triplica cerca de $\text{IRFaj} \approx 0.53$

En términos aplicados, la trayectoria ascendente confirma que los sistemas con mayor resiliencia forrajera sostienen una oferta más estable de nutrientes, rompen el techo de baja productividad y alcanzan rendimientos pecuarios significativamente más altos. Además, el carácter exponencial de la respuesta refuerza que las inversiones en prácticas de acopio y acceso territorial tienen retornos multiplicados una vez que se sobrepasan los niveles críticos. Esto ofrece criterios claros para orientar políticas de fomento y estrategias colectivas de almacenamiento, situando al IRFaj como una herramienta estratégica para identificar y potenciar sistemas ganaderos más estables frente a la sequía.

En el caso de la leche ($L \text{ d}ía^{-1}$), la curva Gamma-log entre IRFaj y leche mostró una relación positiva y empinada ($p < 0.001$). En promedio, +0.1 unidades en IRFaj se asociaron con un incremento $\approx 10.51 \times$ en la leche esperada, con duplicaciones ya visibles para $\Delta\text{IRFaj} \approx 0.03$. En la distribución observada, la producción se duplicó típicamente al pasar de IRFaj ≈ 0.44 a 0.47 y se triplicó alrededor de 0.50–0.53. Esta sensibilidad indica que pequeñas mejoras de resiliencia en la franja 0.45–0.55 cambian de orden los litros diarios. Consistentemente, traduciendo las palancas de manejo al índice, +50–100 kg ha^{-1} en pacas ($\approx +0.04$ –0.08 IRFaj) y +1 ha off-farm ($\approx +0.011$ IRFaj) se asocian con ≈ 2.9 – $6.6 \times$ y $\approx 1.30 \times$ más leche, respectivamente; combinadas ($\Delta \sim 0.05$ IRFaj) se observó $\approx 3.3 \times$. Las bandas de IC95% más anchas reflejan la mayor sensibilidad de la producción de

leche a factores complementarios (estado fisiológico, agua, estrés térmico), por lo que los efectos del IRFaj tienden a amplificarse en predios con mejor manejo sanitario-ambiental. En conjunto, la evidencia posiciona $\text{IRFaj} \geq 0.50$ como una meta operativa para estabilizar y multiplicar la producción láctea en la estación seca.

En comparación con la carne, el ajuste para leche mostró mayor dispersión, lo que confirma la elevada sensibilidad de este producto a la variabilidad forrajera y a las condiciones de manejo. Sin embargo, los sistemas con mayor resiliencia lograron mantener flujos más estables de energía y proteína, lo que asegura la continuidad del ordeño bajo condiciones tropicales. Este comportamiento refuerza que la producción de leche constituye el componente más vulnerable del sistema, pero también el más dependiente de prácticas de acopio y acceso territorial.

Síntesis e implicaciones

Más allá de los coeficientes estadísticos, estos hallazgos revelan con claridad el papel estratégico del rastrojo en la Frailesca: no es un simple residuo agrícola, sino el recurso que sostiene la producción pecuaria durante la estación seca. Su gestión expresa la capacidad de los productores para adaptarse, ya sea incorporando la ganadería en predios donde no existía o fortaleciendo la alimentación en hatos ya establecidos.

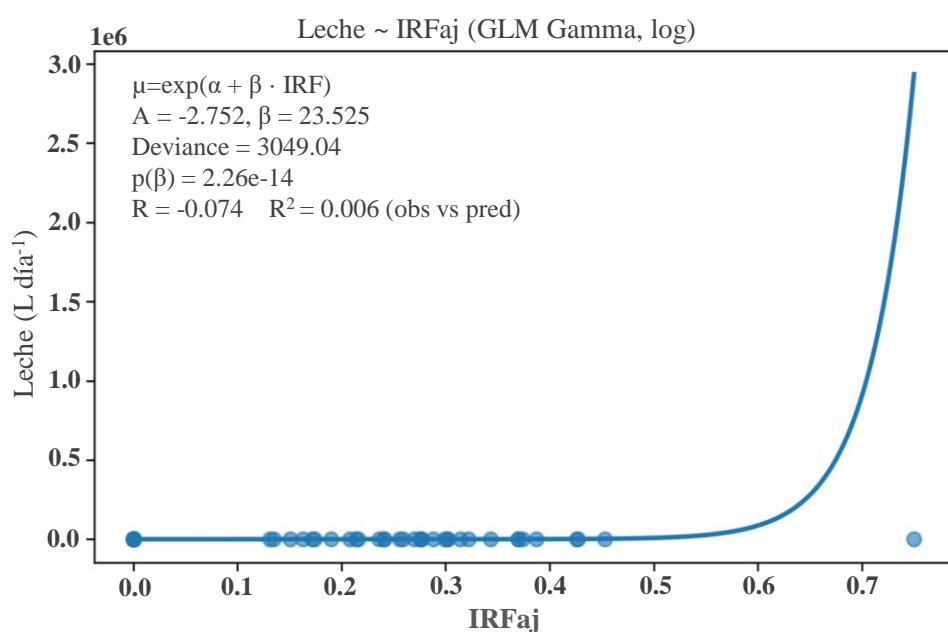


Figura 4. Curva de predicción de la producción de Leche ($L \text{ d}ía^{-1}$) en función del IRFaj, ajustada mediante modelo Gamma con enlace log. Se muestran valores observados, curva ajustada e intervalos de confianza al 95 %. El coeficiente de IRFaj fue altamente significativo ($p < 0.001$). Incrementos de 0.1 unidades en IRFaj se asocian con $\approx 10.5 \times$ más leche, con duplicaciones visibles alrededor de IRFaj ≈ 0.45 – 0.50 .

Bajo esta perspectiva, los modelos Gamma-log para carne y leche confirman que el IRFaj constituye un indicador sensible de resiliencia pecuaria. Ambos productos respondieron positivamente al incremento del índice, aunque la magnitud del multiplicador en leche revela una vulnerabilidad superior de este rubro a la disponibilidad de forraje. Este contraste demuestra que, aunque carne y leche comparten la misma base de resiliencia, la producción láctea se convierte en el termómetro más inmediato de los desequilibrios forrajeros.

Los resultados también muestran que la resiliencia del rastrojo descansa en dos pilares fundamentales: el acopio de biomasa en pacas y el acceso a recursos forrajeros fuera del predio. Estos factores se consolidaron como determinantes en los modelos de regresión, en consonancia con estudios que subrayan el rol del almacenamiento de forrajes como garantía de sostenibilidad ganadera. Nave (2025) destaca que la integración cultivo–ganadería, basada en el aprovechamiento de residuos de cosecha y la producción de reservas (heno, ensilado), es una estrategia esencial para reducir la vulnerabilidad en contextos de estiaje prolongado. De forma complementaria, Severino da Silva (2025) enfatiza que la sostenibilidad y la resiliencia no dependen únicamente de la biomasa disponible, sino también de la capacidad de los productores para organizarse, transferir conocimiento y establecer mecanismos de intensificación sostenible que refuerzen el tejido territorial.

En la Frailesca, estas observaciones adquieren particular relevancia: el acopio de pacas asegura reservas mínimas para la alimentación animal durante la sequía, mientras que el acceso off-farm refleja no solo un intercambio material de biomasa, sino también relaciones sociales y económicas que amortiguan los impactos de la variabilidad climática. Investigaciones anteriores ya habían señalado esta centralidad del rastrojo como eje de articulación entre agricultura y ganadería (Guevara Hernández *et al.*, 2014), y como recurso aprovechado directamente por bovinos en campo para mantener la dieta en el estiaje (Arellano-Vicente *et al.*, 2016).

En contraste, ni la densidad animal ni el porcentaje de rastrojo disponible en estiaje mostraron efectos significativos. Estos resultados refuerzan lo advertido en la literatura: aumentar la carga ganadera sin respaldo en reservas forrajeras no genera resiliencia y, por el contrario, incrementa la vulnerabilidad del sistema (Ortega *et al.*, 2024).

La noción de resiliencia tiene una trayectoria consolidada en la ecología (Holling, 1973) y ha sido ampliada en el campo agroecológico para describir la capacidad de los sistemas agrícolas de mantener

funciones esenciales frente a perturbaciones (Altieri y Nicholls, 2017). En el ámbito pecuario, este enfoque ha sido aplicado a pasturas y recursos forrajeros, resaltando su papel en la productividad animal bajo sequía o variabilidad climática (Severino da Silva, 2025; Tozer *et al.*, 2021). Este trabajo propone avanzar hacia un concepto integrador aplicado al rastrojo como agroecosistema (Gómez-Padilla *et al.*, 2025): la resiliencia forrajera aplicada al rastrojo, entendida como la capacidad del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería de sostener la disponibilidad y calidad del forraje en el estiaje mediante prácticas de acopio, acceso territorial y organización del hato.

El IRFaj constituye una aproximación cuantitativa a esta noción, lo que abre una vía para operacionalizarla y situarla en debates actuales sobre resiliencia agroecológica en sistemas tropicales. En el contexto de la Frailesca, el rastrojo no solo constituye el sostén de los hatos durante la estación seca, sino que se erige como pilar de la resiliencia agropecuaria regional (Arellano-Vicente *et al.*, 2016; Guevara-Hernández *et al.*, 2013).

En conjunto, estos resultados permiten avanzar en la comprensión de la resiliencia forrajera como eje estratégico del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería. La ausencia de significancia en variables como la densidad animal o el porcentaje bruto de rastrojo no implica falta de relevancia, sino que revela la necesidad de evaluar dinámicas más complejas de gestión y organización. La resiliencia no reside en indicadores estáticos, sino en la capacidad de los productores para acopiar, movilizar y articular el recurso a través de redes de intercambio y cooperación territorial, donde intervienen tanto factores económicos como sociales. Desde una perspectiva aplicada, el IRFaj ofrece potencial para integrarse en programas públicos de fomento ganadero y en políticas de manejo sostenible de residuos agrícolas, especialmente en regiones tropicales expuestas a mayor frecuencia de sequías bajo escenarios de cambio climático. La metodología utilizada, basada en índices sintéticos y modelos Gamma-log, es replicable en otros contextos agroecológicos, aunque los factores específicos que sostienen la resiliencia pueden variar según las condiciones locales. De este modo, la gestión activa del rastrojo se posiciona como un componente estratégico de adaptación y como un aporte conceptual novedoso al formalizar la resiliencia forrajera aplicada al rastrojo como dimensión indispensable para interpretar y fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales.

CONCLUSIONES

Los resultados evidencian que la resiliencia forrajera se sustenta principalmente en dos ejes: el acopio de pacas y el acceso a superficies externas de rastrojo.

Estas prácticas definen la capacidad del agroecosistema maíz–rastrojo–ganadería para sostener la producción pecuaria en condiciones de sequía, mientras que variables tradicionalmente consideradas en el manejo, como la densidad animal o el porcentaje bruto de rastrojo disponible en estiaje, no mostraron efectos significativos. De este modo, la resiliencia se explica mejor por la gestión activa del recurso y la organización territorial que por la mera disponibilidad aparente de biomasa.

Acknowledgments

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada al primer autor para cursar los estudios de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Sustentabilidad (DOCAS) de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

Funding. This research was carried out with funding provided by the scholarship granted by the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) as part of the Doctoral Program in Agricultural and Sustainability Sciences (DOCAS) at the Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Additional support was provided by the Red de Estudios para el Desarrollo Rural A.C.

Conflict of interest statement. The authors of this work declare that they have no conflict of interest with the institution, or any person related to the proposed manuscript.

Compliance with ethical standards. Due to its characteristics, this study does not require the approval of a bioethics committee.

Data availability. Data are accessible through the author Ernesto Javier Gómez Padilla, ernesto.gomez54@unach.mx

Author contribution statement (CRediT). E.J. Gómez-Padilla – Investigation, data curation, formal analysis, visualization, writing – original draft, writing – review & editing. F. Guevara-Hernández – Conceptualization, methodology, supervision, project administration, writing – review & editing. M.A. La O-Arias – Methodology, formal analysis, supervision, writing – review & editing. R. Pinto-Ruiz – Visualization, writing – review & editing. J.R. Aguilar-Jiménez – Visualization, writing – review & editing. I.A Valdivieso-Pérez – Visualization, writing – review & editing.

REFERENCES

Altieri, M.A. and Nicholls, C.I., 2017. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic*

Change, 140(1), pp. 33–45.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>

Arellano-Vicente, I., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Hernández-Sánchez, D. and Ley-de Coss, A., 2016. Caracterización del uso directo del rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) por bovinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), pp. 1117–1129.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000501117&script=sci_abstract&tlng=pt

Borja-Bravo, M., Reyes-Muro, L., Espinosa-García, J.A. and Vélez-Izquierdo, A., 2013. Producción y consumo de rastrojos en México. In: Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T.C. and Guevara-Hernández, F. (eds.) *Rastrojos: manejo, uso y mercado en el centro y sur de México*. 1st ed. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), pp. 12–35.

Cabell, J.F. and Oelofse, M., 2012. An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society*, 17(1), p. 18.
<https://doi.org/10.5751/ES-04666-170118>

Cleves, A., Youkhana, E. and Toro, J., 2022. A method to assess agroecosystem resilience to climate variability. *Sustainability*, 14(14), pp. 85–88.
<https://doi.org/10.3390/su14148588>

Cleves-Leguizamo, J.A., Youkhana, E. and Toro-Calderon, J., 2020. Agroecosystemic Resilience Index (AgRI): A method to assess agrobiodiversity. *bioRxiv*.
<https://doi.org/10.1101/2020.12.03.409656>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2024. Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia. Gobierno de México.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

Desta, A.G., 2023. Nutritional content analysis of crop residues in three agroecologies in East Gojjam Zone. *The Scientific World Journal*, 2023, pp. 1–8.
<https://doi.org/10.1155/2023/1974081>

Gómez-Padilla, E.J., Guevara-Hernández, F., La O-Arias, M.A., Valdivieso-Pérez, I.A., Pinto-Ruiz, R., and Villareal-Fuentes, J.M. 2025a. Caracterización tipológica y temporalidad del agroecosistema rastrojo en Chiapas, México.

- Agronomía Mesoamericana*. 36, p. 418thz31.
<https://doi.org/10.15517/418thz31>
- Gómez-Padilla, E.J., Guevara-Hernández, F. and La O-Arias, M.A., 2025b. De prácticas aisladas a la perspectiva agroecosistémica: la transformación conceptual del rastrojo de maíz en la región Frailesca, Chiapas. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 5, pp. 1–15.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.05.04>
- Guerrero-Rodríguez, J.D.D., Muñoz-Tlahuiz, F., López, P.A., López-Sánchez, H., Hernández-Guzmán, J.A. and Gil-Muñoz, A., 2023. Digestibilidad del rastrojo de variedades locales de maíz en el altiplano Poblano-Tlaxcalteca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 29, pp. 1–13.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i29.3527>
- Guevara-Hernández, F., Rodríguez Larramendi, L.A., Ocaña Grajales, M.J., Cruz, J.O., Pinto Ruiz, R., La O Arias, M.A., Gómez Castro, H. and Ortiz Pérez, R., 2014. El rastrojo de maíz en la relación maíz–ganadería bovina del trópico seco de Chiapas, México. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 22(1–2), pp. 37–42.
https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?cod_igo=5069408
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N.J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M.H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J.F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Cohlke, C. and Oliphant, T.E., 2020. Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), pp. 357–362.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), pp. 1–23.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science and Engineering*, 9(3), pp. 90–95.
<https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024. Geografía y medio ambiente. Mapas climatológicos. <https://n9.cl/pfc87>
- MacKinnon, J.G. and White, H., 1985. Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, 29(3), pp. 305–325.
[https://doi.org/10.1016/0304-4076\(85\)90158-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90158-7)
- McKinney, W., 2010. Data structures for statistical computing in Python. In: *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 56–61.
<https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A. and Giovannini, E., 2005. Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. *OECD*.
<https://doi.org/10.1787/533411815016>
- Nave, R.L.G., 2025. Sustainable forage production in crop–livestock systems. *Agronomy*, 15(3), p. 657.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15030657>
- Ortega, G., Berberian, N. and Chilibroste, P., 2024. The effects of stocking rate, residual sward height, and forage supplementation on forage production, feeding strategies, and productivity of milking dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, 5, p. 1319150.
<https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1319150>
- Seabold, S. and Perktold, J., 2010. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python. In: *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 92–96.
<https://conference.scipy.org/proceedings/scipy2010/seabold.html>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2024. Panorama agroalimentario: La ruta de la transformación agroalimentaria 2018–2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2025. Producción agrícola municipal: Maíz grano en Villaflor, Villa Corzo y La Concordia, Chiapas. Cierre agrícola año agrícola (OI+PV), 2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agrico_la/

Severino da Silva, L., 2025. Enhancing climate resilience of forage ecosystems through sustainable intensification and educational knowledge transfer in the southeastern USA. *Crops*, 5(4), p. 42. <https://doi.org/10.3390/crops5040042>

Shah, A.M., Zhang, H., Shahid, M., Ghazal, H., Shah, A.R., Niaz, M., Naz, T., Ghimire, K., Goswami, N., Shi, W., Xia, D. and Zhao, H., 2025. The vital roles of agricultural crop residues and agro-industrial by-products to support sustainable livestock productivity in subtropical regions. *Animals*, 15(8), p. 1184. <https://doi.org/10.3390/ani15081184>

Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P. and Václavík, T., 2019. Archetype analysis in sustainability research: Methodological portfolio and analytical frontiers. *Ecology and Society*, 24(3), p. 34. <https://doi.org/10.5751/ES-11103-240334>

StatSoft Inc., 2014. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 10. [online] <https://www.statistica.com> [Accessed 16 November 2024].

Tozer, K., Douglas, G., Dodd, M. and Müller, K., 2021. Vegetation options for increasing resilience in pastoral hill country. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, p. 550334. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.550334>

von Bertalanffy, L., 1968. *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller. https://monoskop.org/File%3AVon_Bertalanffy_Ludwig_General_System_Theory_1968.pdf

von Bertalanffy, L., 1975. *Perspectives on General System Theory: Scientific-philosophical Studies*. George Braziller. <https://archive.org/details/perspectivesonge00obert>