



DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.420>

*Evaluación de la perturbación ecosistémica e interacciones vegetales en zonas no tradicionales de cultivo de quinua (*chenopodium quinoa*) mediante índices de diversidad y modelos de aprendizaje automático: cantón de orinoca, oruro*

Milton Robert Pérez Lovera

fcan_uto_perez@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0005-2672-8475>

Universidad Técnica de Oruro

Investigador Museo de Historia Natural. FCAN – UTO
Bolivia

Alfredo Ancasi Mamani

alam_fcavp@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-0556-5418>

Universidad Técnica de Oruro

Investigador Museo de Historia Natural. FCAN – UTO
Bolivia

Cesar Beltrán Vásquez

cesarbelt67@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-6713-1717>

Universidad Técnica de Oruro

Investigador Unidad de Servicios técnicos especializado FCAN – UTO
Bolivia

Erick Martin Moron Galarza

frombolivatoworld@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-9039-1072>

Universidad Técnica de Oruro

Investigador Museo de Historia Natural. FCAN – UTO
Bolivia



RESUMEN

El estudio, desarrollado en el Cantón de Orinoca (municipio Santiago de Andamarca), en 2023 - 2024, evaluó las interacciones competitivas de comunidades vegetales en zonas no tradicionales de cultivo de quinua. La distribución, composición y diversidad presentan perturbaciones y estrés, producto de actividad agrícola, siendo diferente la similitud florística y afectando las interacciones competitivas (distribución NO Normal), generando procesos de degradación. Los transectos T3=Orinoca-Calavillca, T2=Orinoca-Rosapata y T1=Orinoca-Mara Mara, muestran perturbación - estrés (fenómenos naturales - edáfico). Este fenómeno suscitado, es por la actividad agrícola, como consecuencia directa, reducción del tamaño poblacional de especies en simpatria (en una misma área), siendo especies no dominantes; en comparación a especies alopatricas (diferentes áreas y que no se solapan), siendo especies competidoras dominantes. Los cambios de nicho y la depresión de los respectivos tamaños poblacionales es además función de la eficiencia competitiva de cada especie, lo que refleja que *Stipa ichu* (T1=Orinoca-Mara Mara), *Tetraglochin cristatum* (T1=Orinoca-Mara Mara y T2=Orinoca-Rosapata), y *Parastrephia lepidhopilia* (T2=Orinoca-Rosapata) tienen estas características. Por tanto, la actividad agrícola es un factor importante para el comportamiento y modificación de las interacciones competitivas de comunidades vegetales. El uso de transectos variables Foster, 2005, índices de diversidad y análisis de distribución normal, ayuda a entender el comportamiento de comunidades vegetales, como base para proponer proyectos de manejo y conservación de suelos y praderas nativas, en zonas de actividad agrícola. Se aplicó un enfoque de modelos de aprendizaje automático (Machine Learning) mediante la metodología OSEMN, empleando Análisis Discriminante Lineal (LDA) para modelar la perturbación ecosistémica y generar escenarios de comparación con sitio no muestreados.

Palabras claves: Perturbación ecosistémica, cultivo de quinua, índices de diversidad, distribución normal



Evaluation of ecosystem disturbance and plant interactions in non-traditional quinoa (chenopodium quinoa) cultivation areas using diversity indices and machine learning models: orinoca canton, oruro

ABSTRACT

The study, conducted in the Orinoca Canton (Santiago de Andamarca municipality) in 2023-2024, evaluated the competitive interactions of plant communities in non-traditional quinoa cultivation areas. The distribution, composition, and diversity of these communities show disturbances and stress resulting from agricultural activity. Floristic similarity differs, and competitive interactions are affected (non-normal distribution), leading to degradation processes. Transects T3 (Orinoca-Calavillca), T2 (Orinoca-Rosapata), and T1 (Orinoca-Mara Mara) exhibit disturbance and stress (natural and edaphic phenomena). This phenomenon is directly caused by agricultural activity, resulting in a reduction in the population size of sympatric species (those within the same area), which are non-dominant species, compared to allopatric species (those in different, non-overlapping areas), which are dominant competitors. Niche shifts and the resulting decline in population sizes are also a function of each species' competitive efficiency, reflecting the characteristics of *Stipa ichu* (T1=Orinoca-Mara Mara), *Tetraglochin cristatum* (T1=Orinoca-Mara Mara and T2=Orinoca-Rosapata), and *Parastrephia lepidhopilia* (T2=Orinoca-Rosapata). Therefore, agricultural activity is a significant factor in the behavior and modification of competitive interactions within plant communities. The use of variable transects (Foster, 2005), diversity indices, and normal distribution analysis helps to understand the behavior of plant communities, providing a basis for proposing management and conservation projects for native soils and grasslands in areas of agricultural activity. A machine learning approach was applied using the OSEMN methodology, employing Linear Discriminant Analysis (LDA) to model ecosystem disturbance and generate comparison scenarios with unsampled sites.

Keywords: Competitive interactions, quinoa cultivation, diversity indices, normal distribution



INTRODUCCIÓN

Los paisajes constituyen sistemas dinámicos y cada especie vegetal es un sistema complejo de estudiar. Distintos autores han interpretado que los patrones observados en la naturaleza y los procesos de cambio, son producto de la acción de factores que actúan e interactúan a diferentes escalas espaciales y temporales en una forma relativamente jerárquica (*Delcourt et al., 1983; Forman y Godron, 1986; Zonneveld, 1995; Kandus P., 2000, mencionado en Pérez L. M. R. 2009*).

En particular, desde el punto de vista de la ecología vegetal, los cambios en cuanto a los patrones de distribución de las plantas y la composición de comunidades en el tiempo y de las especies vegetales que la conforman, fueron señalados históricamente como un fenómeno natural y común por diferentes autores (*Miles, 1987*). Desde mediados de la década del 70 (siglo XX), dos tendencias conceptuales dominaron el campo de la investigación acerca de la dinámica de la vegetación. Por una parte, se produjo un reemplazo de explicaciones holísticas por aproximaciones reduccionistas - mecanicistas que enfatizan las causas próximas para explicar cambios de la vegetación, relacionadas con el enfoque de la ecología de poblaciones. En segundo término, se reemplazan los paradigmas de equilibrio por los de no equilibrio, entrando a la ecología de comunidades. Estos procesos se expresan a través de mecanismos resultantes de propiedades individuales como capacidad de colonización, competencia o atributos vitales (*Bazzaz, 1979; Grubb, 1986; Horn, 1981; Tilman, 1987, 1988; Drury y Nisbet 1973; Pickett, 1976; Grime, 1979; Noble y Slatyer, 1980; Kandus P., 2000. mencionado en Pérez L. M. R. 2009*), y también mecanismos derivados de la interacción entre especies, en particular, los modelos de facilitación, inhibición y tolerancia propuestos por Connell y Slatyer (1977). Todavía no se conoce del todo las complejas relaciones existentes de las especies entre sí y entre las especies y el ambiente. Sin embargo, cada día es más evidente que la destrucción de un gran número de especies reducirá la diversidad, y dejará tras de sí un mundo biológico diferente al que habitó en sus orígenes.

Una de las regiones más estudiadas desde su potencial forrajero, así como también en sus aspectos sociales y su influencia en el uso de la tierra. Abarca la región oeste del país (altiplano de Bolivia). La topografía es irregular, suelos diferentes (entisoles e inceptisoles), regímenes pluviométricos variables, desde 200 mm hasta 700 mm, con mayores precipitaciones en el norte y este, que disminuyen a



medida que uno se aleja hacia el sud y el oeste. En esta zona, se identifican cuatro ecoregiones. Y la de importancia para el presente estudio es la ecoregión puna semiárida y árida (altiplano central), que presenta comunidades vegetales climáticas y edáficas con diferentes potenciales productivos que van disminuyendo de norte a sud, paralelamente a la disminución de la precipitación pluvial. Varios autores han clasificado a estas comunidades vegetales desde el punto de vista de la distribución, densidad y clase de rumiantes que las pastorean, pero no han efectuado una clasificación basada en la metodología de ordenamiento de pradera y menos estudios enfocados al manejo y conservación de praderas nativas. Sin embargo, son datos útiles y vigentes, se puede mencionar, entre otros, a (Barrientos, 2005; Ayala, 1999; Alzérreca, 1982; Cárdenas, 1972, Posnansky 1971, Blanco 1971, Cardozo, 1970 y Braun, 1964). Por lo tanto, en la medida que se realice estudios con un enfoque de funcionalidad, en especial de especies vegetales, tendremos alternativas de aprovechamiento de los recursos naturales para el manejo y conservación de suelos y con este el desarrollo de las localidades rurales.

Para tal efecto el objetivo central fue *“Evaluación de la perturbación ecosistémica e interacciones vegetales en zonas no tradicionales de cultivo de quinua (Chenopodium quinoa) mediante índices de diversidad y modelos de aprendizaje automático”*. Entendiendo si *“La distribución, composición y diversidad de comunidades vegetales presentan perturbaciones y estrés (producto de la actividad agrícola introducida en especial el del cultivo de la quinua, Chenopodium quinoa), reflejado en la diferencia de similitud (índices de diversidad), por lo cual las interacciones competitivas se ven afectadas al no tener un comportamiento Normal y con este aumentando los procesos de degradación de las comunidades vegetales”*. Dada la complejidad de las interacciones vegetales, el trabajo de investigación no solo se limita a la estadística descriptiva y cálculo de índices, sino que integra modelos de aprendizaje automático para predecir la resiliencia del ecosistema frente al avance de la frontera agrícola, permitiendo una evaluación cuantitativa de la salud ambiental en zonas no muestreadas.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó al sur del departamento de Oruro (Bolivia), en la 1ra Sección de la provincia Sur Carangas, del Municipio Santiago de Andamarca. En el cantón de Orinoca (localidades de Orinoca,



Mara Mara, Rosapata y Calavillca), ubicada a 67°15' LW y 18°58' LS, a una altitud promedio de 3840 msnm, en las gestiones 2023 y 2024. Para la evaluación de la *flora silvestre* se estudió los aspectos descriptivos de asociaciones vegetales, se enmarco en la sociología de plantas, utilizando el transecto variable (*Foster et. al 1995*), (figura 1) y cuadrantes mínimos (*Braun Blanquet, 1979*). Son métodos que ayudan a estudiar tanto la riqueza como la abundancia de la flora presente en la zona, así como la diversidad florística. El objeto es poder identificar que especies tienen un comportamiento en simpatria o alopatría, muy importante para entender las interacciones competitivas en las comunidades vegetales. También se evaluó las estrategias y formas de vida (método propuesto por *Grime*, mencionado en *Pérez, 2009*).

Las formaciones vegetales –transectos– (figura 1), su *diversidad florística*, se evaluaron por medio de los índices de diversidad de Shanon-Wiener ($H' = - \sum_{i=1}^S P_i * \ln P_i$; S número de especies (riqueza de especies), P_i proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos (es decir la abundancia relativa de la especie $i = n_i/N$; n_i número de individuos de la especie i , N número de todos los individuos de todas las especies), se midió el cambio de una comunidad con stress, su aplicabilidad se ve manifestado en las evaluaciones de comunidades vegetales con perturbaciones las de tipo agrícola y pecuario (*Magurran, 1988; Schaefer, 1995; Pérez, 2010*). El análisis de datos se estructuró bajo la metodología OSEMN: 1) Obtain: Recolección de datos fitosociológicos en campo; 2) Scrub: Limpieza y normalización de datos; 3) Explore: Cálculo de índices de diversidad y correlaciones; 4) Model: Implementación de Análisis Discriminante Lineal (LDA) como clasificador supervisado en Python; y 5) iNterpret: Evaluación de escenarios predictivos de resiliencia.



El Índice de Equitatividad o Evenness ($E = \frac{H'}{H_{max}}$; H' = Diversidad encontrada en el lugar (se usa el índice de Shannon - Wiener), H_{max} = Logaritmo (Ln) de la riqueza de especies (familias encontradas en la zona de estudio), evaluó la equivalencia que existe entre la abundancia de especies, relación que existe entre la diversidad encontrada y la diversidad esperada (*Magurran, 1988*), índice de Kothè,

denominado índice de ausencia de especies, se trabajó en base a un lugar de referencia y usa la cantidad de especies faltantes en comparación con el lugar de referencia como indicador de calidad biológica. La cantidad de especies en el lugar de referencia se define como el 100% de especies presentes y en base a este valor se calcula el porcentaje de especies encontradas en las otras estaciones de monitoreo.

El uso del índice de Morisita-Horn ($C = \frac{2 \sum_i^n p_{ij} p_{ik}}{\sum_i^n p_{ij} [(n_{ij}-1)/(N_j-1)] + \sum_i^n p_{ik} [(n_{ik}-1)/(N_k-1)]}$; p_{ij} , p_{ik} proporción de recurso i de todos los recursos usados por especie j o k . n_{ij} , n_{ik} número de individuos de especie j o k que usan recurso i . N_j , N_k número total de individuos de cada especie en muestra), considera la abundancia relativa de especies, abundancia proporcional de especies vegetales, asimismo, la equivalencia que existe entre la abundancia encontrada y la esperada, además de ver las especies ausentes. Lo mencionado ayuda a entender el o los cambios de estructura de una comunidad con stress (Schaefer, 1995) y/o perturbaciones (actividades antropogénicas; agropecuario), (Pérez, 2010).

Se evaluó los transectos, mediante análisis de conglomerados (algoritmos matemáticos que tiene por objeto la búsqueda de las formaciones vegetales de similares características y de las variables – riqueza y abundancia– con comportamiento similar), para medir la distancia entre especies vegetales y de las formaciones vegetales, se trabajó con la matriz de datos $n \times p$ siendo transformada en una matriz de proximidad o de similitud: ($n \times n$) que mide la semejanza o la distancia entre pares de individuos i y i' para $i, i' = 1, \dots, n$; y ($p \times p$) que mide la semejanza o la distancia entre pares de variables j y j' para $j, j' = 1, \dots, p$. La organización de datos en forma de una matriz con n filas (casos: especies vegetales) conteniendo las p características (variables: riqueza, abundancia; siendo el factor los transectos evaluados) registradas sobre un mismo individuo (datos de p variables –riqueza y abundancia– observadas en cada uno de n especies vegetales, se colectaron en una matriz X , $n \times p$) (tabla 1):



Tabla 1. Organización de datos en la evaluación de transectos

Individuos	V_1	V_2	V_j		V_p	
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1p}
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2p}
			...		...	
			...		...	
n	X_{n1}	X_{n2}	...	X_{nj}	...	X_{np}

La evaluación de los índices de diversidad, se realizó con análisis de discriminación, con el objeto de construir una regla para predecir la probabilidad de pertenencia a un grupo –formación vegetal–, mediante la asignación de nuevos individuos a grupos preexistentes (los transectos evaluados), para determinar si las variables consideradas –riqueza, abundancia, índices de diversidad– son suficientes para discriminar entre grupos de individuos y con este evaluar la pertenencia de un individuo a uno de los grupos –transectos: formaciones vegetales– se utilizó la función discriminante canónica: $S_i = C_i + W_{i1}X_1 + W_{i2}X_2 + \dots + W_{ip}X_p$; i denota el grupo X las variables –riqueza, abundancia, índices de diversidad–, S_i es el valor resultante que se utiliza para la clasificación, se decide asignarlo a aquel grupo con el que presente menor diferencia (mayor probabilidad de parecerse al perfil multivariado que lo caracteriza –formación vegetal–). Y el uso de un modelo lineal (completamente al azar) al 95% de confiabilidad (error tipo I), $(Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}; Y_{ij}$ variable de estudio –índices de diversidad–, μ media población de la diversidad de especies vegetales; α_i iésimo nivel de formación vegetal –índices de diversidad–; ε_{ij} termino de error asociado a la variable de estudio Y_{ij}).

Las pruebas para observar el *comportamiento de Distribución Normal* de las comunidades vegetales en los tres transectos en estudio (T1= Orinoca-Mara Mara; T2= Orinoca-Rosapata; T3= Orinoca-Calavilla), se utilizó el modelo de vecindad Lognormal; entendiendo que el rango de la variable en estudio –diversidad biológica–, a través de la riqueza y abundancia en un sistema natural es elevado,



se procedió con el uso de logaritmos a los datos generados de las variables), (*Uriarte et al.* 2005, *Gómez-Aparicio et al.* 2008, mencionado en *Pérez, 2009*), siendo la expresión:

$$NI = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^n \lambda_j DBH_{ji}^{\alpha} \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{\ln \left(\frac{distancia_{ji}}{\beta} \right)}{\gamma} \right]^2$$

Donde:

DBH y *distancia* describen el tamaño y la distancia al árbol vecino *i* –especie vegetal–; α , γ y β son parámetros estimados usando MMV (modelo de vecindad ó llamado modelo de máxima verosimilitud) que describen como el efecto de los vecinos (especies vegetales de transectos evaluados), varía con el tamaño del árbol (α –transectos–) y la distancia (γ y β –riqueza y abundancia–); y λ es un parámetro calculado (valor constante) para cada tipo de vecino *j* que permite comparar los efectos per capita de individuos de distintas especies vegetales sobre un mismo proceso (interacciones competitivas en las formaciones vegetales). El NI (índice de vecindad) se suma sobre todas las especies vegetales *i* de las *j* especies vecinas (transectos en estudio).

Para la evaluación de distribución log-normal de las especies vegetales en las formaciones vegetales (transectos) se utilizó las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wild, a una confiabilidad del 95% (error tipo I). También se evaluó la Homoscedasticidad de varianzas, mediante la prueba de Levene, 95% de confiabilidad.

El procesamiento y modelado de la perturbación ecosistémica se realizó utilizando el lenguaje Python, estructurado en cuatro fases críticas:

Preparación y Estructuración de Datos: En esta fase se emplean las librerías Pandas para la manipulación de estructuras de datos tabulares, Numpy para operaciones vectoriales y Matplotlib/Seaborn para la generación de la arquitectura visual. Se cargan los índices de diversidad (Kothé, Evenness, Shannon) vinculados a sus respectivos transectos.

Código: Carga de datos

```
X = df[['Kothé', 'Evenness', 'Shanon-Winer']] # Variables predictoras
y = df['Transectos'] # Variable objetivo
```



División de Conjuntos de Entrenamiento y Prueba: Utilizando la librería Scikit-Learn (sklearn), se divide el conjunto de datos original. Se reserva un 70% para el entrenamiento del modelo y un 30% para la validación externa.

Código: División del conjunto de datos

```
# División 70/30 para validación cruzada
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.30, random_state=42, stratify=y
)
```

Implementación del Modelo Discriminante Lineal (LDA): Se entrena el algoritmo de Análisis Discriminante Lineal (LDA). El modelo busca encontrar la combinación lineal de los índices de diversidad que maximice la separación entre los estados de conservación.

Código: Ajuste del modelo con datos de campo

```
lda = LinearDiscriminantAnalysis()
lda.fit(X_train, y_train)
```

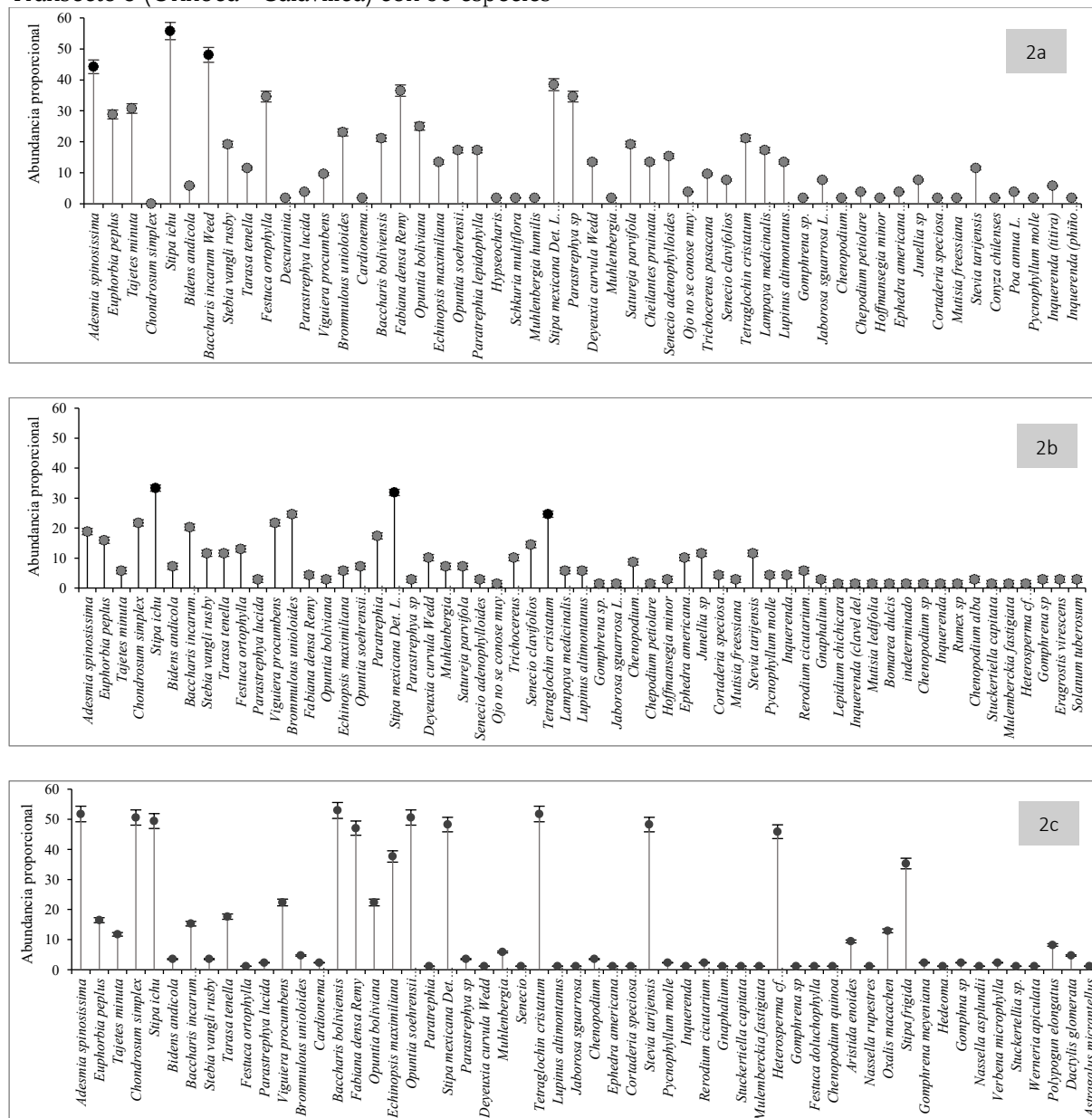
RESULTADOS

En la evaluación de la flora silvestre, se encontró 85 especies vegetales, de las cuales se clasificó 81 y 4 especies están en proceso de identificación. Las zonas de estudio, el Transecto 2 (Orinoca - Rosapata), es el que presenta mayor riqueza de especies en total 59, seguido del Transecto 3 (Orinoca - Calavillca) con 56 especies, y el Transecto 1 (Orinoca - Mara Mara) con 52 especies (figura 2).

Esta heterogeneidad florística está condicionada a la predominancia de algunas especies vegetales como: *Stipa ichu* (paja suave), seguido de las especies, *Baccharis incarum* Weed (ñaca-tola), *Adesmia spinosissima* (añawaya), *Stipa mexicana* Det. L. Torrico (tasa paqu), *Tetraglochin cristatum* (canalli), *Brommulous unioides* (cebadilla), *Baccharis boliviensis* (supu-tola), *Chondrosum simplex* (paso bandera), *Heterosperma cf. Nana* Serff (jisca muni), *Fabiana densa* Remy (tara-tara), *Opuntia soehrensii* Britton (ayrampu).



Figura 2. Zonas de estudio con presencia de actividad agrícola del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*). Riqueza florística (eje horizontal) y abundancia proporcional (eje vertical), **2a** Transecto 1 (Orinoca - Mara Mara) con 52 especies; **2b** Transecto 2 (Orinoca - Rosapata), con 59 especies; **2c** Transecto 3 (Orinoca - Calavilla) con 56 especies



Lo que indica que, en la zona, existe un proceso de amplitud de nicho de las 11 especies dominantes antes mencionadas con respecto a las demás especies, existiendo una sobre posición de nicho. Otro aspecto a tomar en cuenta son las interacciones entre las especies dominantes y las no dominantes, estas últimas afectadas adversamente en su tamaño población, sobrevivencia y adecuación biológica (Mac Arthur 1968, Cody 1974, Schoener 1977, Pianka 1981, Toft 1985, Keddy 1989). Estos efectos



adversos ocurren por recursos coseados por las poblaciones de especies vegetales, que son relativamente escasos (baja relación disponibilidad/demanda).

La competencia entre especies, genera distintas predicciones de acuerdo a si se trata del nivel intra o interespecífico. A nivel intraespecífico, el Principio de Equioportunidad se traduce en que los individuos usan distintas partes de los gradientes de recursos de acuerdo a la disponibilidad/demanda versus competencia con los demás individuos de su población. Este principio predice que una población que está en expansión numérica, los primeros individuos debieran usar solo los recursos óptimos, pero a medida que aumenta la densidad, los individuos deberían tender a ocupar recursos subóptimos o periféricos; o mayores porciones del eje de recursos, dependiendo del componente intra o interfenotípica del nicho. En cualquier caso, la competencia intraespecífica debiera aumentar la amplitud de nicho, tal el caso de las 11 especies vegetales predominantes en la zona en estudio.

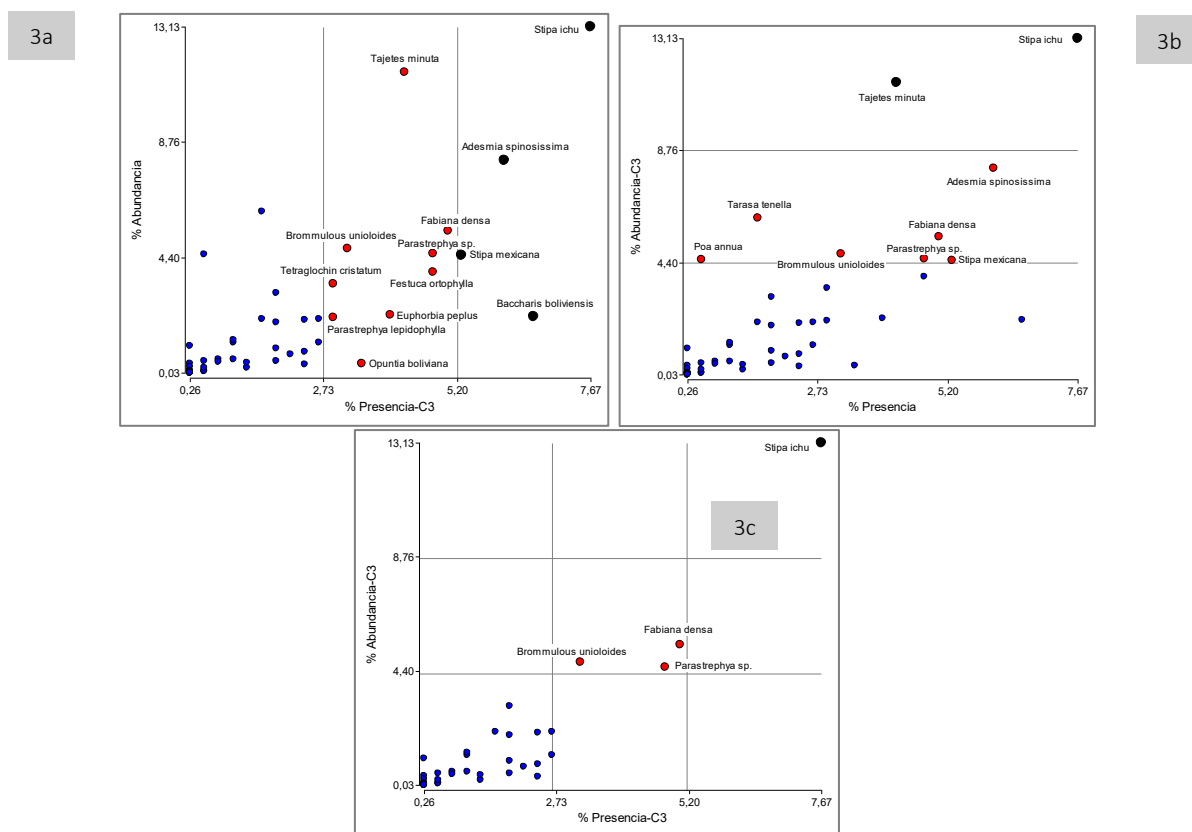
A nivel interespecífico la Hipótesis de Competencia predice que de acuerdo a la intensidad de la competencia interespecífica debiera cambiar la posición de las especies sobre el eje de recursos (reduciéndose la sobreposición de nicho) y/o la amplitud de nicho de dichas especies (*MacArthur & Levins 1964, 1967*). Esto porque los individuos de una especie que usan recursos subóptimos, debieran ser excluidos competitivamente por aquellos individuos de la otra especie para lo cual los mismos recursos son más cercanamente óptimos (figuras 3a y 3b).

Consecuencia directa de este fenómeno es la reducción del tamaño poblacional de las especies en simpatria (que tiene lugar en una misma área), que son las especies no dominantes; en comparación a su situación solitaria o de alopatría (que tiene diferentes áreas de distribución geográfica y que no se solapan), tal el caso que ocurren en las zonas en estudio con las especies competidoras dominantes (figura 3c). La magnitud de los cambios de nicho y la depresión de los respectivos tamaños poblacionales es además función de la eficiencia competitiva de cada especie, lo que refleja que *Stipa ichu* (T1=Orinoca-Mara Mara), *Tetraglochin cristatum* (T1=Orinoca-Mara Mara y T2=Orinoca-Rosapata), y *Parastrephia lepidhopilia* (T2=Orinoca-Rosapata) tendrían estas características.



Haciendo una evaluación de toda la zona en estudio se evidencia que existen especies vegetales dominantes ya sea por su presencia y/o su abundancia (*Stipa ichu*, *Fabiana densa*, *Parastrephia* sp., *Brommulous unioides*), lo que hace que exista una disminución poblacional de otras especies y con este, el riesgo de pérdida de la diversidad florística en la zona, siendo un factor preponderante el uso de los suelos de las praderas nativas por la agricultura principalmente por el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*), al ser ampliado su frontera agrícola, reduce el área física de las especies vegetales potencialmente no dominantes en la zona que son una mayoría de las especies encontradas y dando lugar a la dominancia de pocas especies como se evidencia en la figura 3c.

Figura 3. **3a** Presencia de especies vegetales (riqueza); **3b** Abundancia de especies vegetales; **3c** Presencia y abundancia (diversidad) de especies vegetales. Se identifica que *Stipa ichu*, *Fabiana densa*, *Parastrephia* sp., *Brommulous unioides*, son las especies dominantes en la zona de estudio



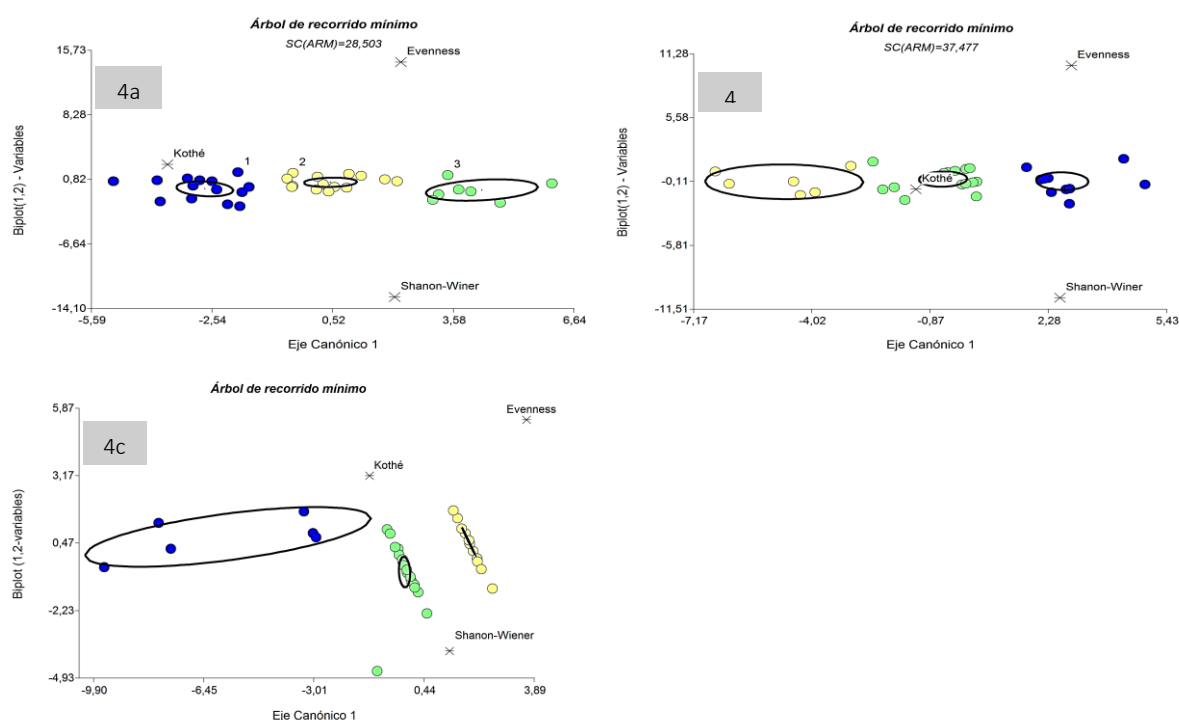
Lo que respecta a la diversidad florística, en el transecto 1 (T1= Orinoca-Mara Mara), se identificaron 52 especies en 36 estaciones de monitoreo, se evidencia diferenciación en cuanto a sus índices de diversidad, generándose 3 grupos los cuales por sus características particulares muestran una elipse de confianza diferente entre los grupos (figura 4a); en el mismo sentido el transecto 2 (T2= Orinoca-Rosapata), existe 59 especies en 37 estaciones (figura 4b). En relación al transecto 3 (T3= Orinoca-



Calavillca), se evaluó 56 especies vegetales, monitoreados en 51 estaciones, al igual que los otros transectos, se evidencia diferenciación en cuanto a sus índices de diversidad, generándose 3 grupos, que muestran elipses de confianzas diferentes entre los grupos observados (figura 4c).

Se advierte en la figura 4, que el transecto T1 Orinoca - Mara Mara, en relación a los otros transectos en estudio (T2 Orinoca - Rosapata, T3 Orinoca - Calavillca), sus índices de diversidad está menos dispersos con un comportamiento de equilibrio, mostrando una estructura comunitaria menos perturbada (figura 4a). Los otros transectos, el T3 Orinoca - Calavillca, al contrario del T1, sus índices de diversidad están en no equilibrio, mostrando una falta de estructura comunitaria (mayor perturbación) (figura 4c). El T2 Orinoca - Rosapata, sus índices de diversidad muestran una dispersión y con esto una posible perturbación (figura 4b). Entendiendo que estos comportamientos en las zonas de estudio puedan deberse a la diferenciación que tienen en la actividad agrícola en especial el cultivo de quinua que es más intensa en los transectos T2 Orinoca - Rosapata y T3 Orinoca - Calavillca, reflejarían el efecto causado por dicha actividad a la estructura comunitaria de especies vegetales.

Figura 4. Elipses de confianza de conglomerados (tres) a partir de índices de diversidad (Khoté, Evenness, Shanon-Wiener), mediante análisis discriminante. **4a** Transecto 1 (T1= Orinoca-Mara Mara); **4b** Transecto 2 (T2= Orinoca-Rosapata); **4c** Transecto 3 (T3= Orinoca-Calavillca)



Evaluando los índices de diversidad por estación de monitoreo –transecto–, en el transecto 1 (T1= Orinoca-Mara Mara), los índices de Shanon-Wiener, Evenness y Kothè, muestran una coincidencia, de zonas perturbadas, por actividad agrícola. Mostrando amplia diferencia entre los índices, siendo el valor menor de Shanon Wiener $SW= 0,7$; Khote $E= 0,2$; y Equitatividad $K= 92,9$; y de mayor diversidad respecto a las demás estaciones $SW= 2,5$; $E= 0,7$; $K= 80,0$. Respecto al transecto 2 (T2= Orinoca-Rosapata), los índices de diversidad menores son $SW= 0,3$; $E= 0,1$; $K= 97,6$; y el de mayor valor a las demás estaciones es $SW= 2,4$; $E= 0,7$; $K= 78,8$. El transecto 3 (T3= Orinoca-Calavillca), los índices de diversidad menores es $SW= 0,5$; $E= 0,1$; $K= 95,3$; y de mayor diversidad a las demás estaciones es $SW= 2,4$; $E= 0,6$; $K= 81,2$.

La riqueza y abundancia proporcional de especies vegetales estudiadas, asimismo, la equivalencia que existe entre la abundancia encontrada y la esperada, además de ver las especies ausentes, a través de los índices de diversidad, evidencian que los transectos (T1 Orinoca - Mara Mara, T2 Orinoca - Rosapata, T3 Orinoca - Calavillca) son diferentes entre ellos y en algunos casos diferentes al interior de cada transecto, principalmente en los transectos T2 Orinoca - Rosapata y T3 Orinoca - Calavillca. Estas diferencias muestran una estructura comunitaria perturbada principalmente por la actividad productiva en especial la ampliación de la frontera agrícola del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*) en zonas que no son tradicionales para ese rubro. Los cambios ocasionados en las estructuras de las comunidades vegetales, reflejadas en la diferenciación de sus índices de diversidad (Shanon Wiener –SW–, Khote –K–, Evenness –SW–), manifiestan una alta perturbación principalmente en los transectos T2 Orinoca - Rosapata, T3 Orinoca - Calavillca, y menos perturbada el T1 Orinoca - Mara Mara. Lo mencionado ayuda a entender el o los cambios de estructura de las comunidades vegetales estudiadas.

Los Índices de diversidad por transecto y similitud de abundancia florística entre transectos, muestran que las comunidades vegetales, tienen una característica común entre los transectos T2 (Orinoca-Rosapata) y T3 (Orinoca-Calavillca), reflejando una baja diversidad, corroborado por los tres índices evaluados (figura 5), los transectos antes mencionado, tienen la peculiaridad de ser zonas que en los últimos años, se ha intensificado la actividad agrícola, principalmente el cultivo de quinua



(*Chenopodium quinoa*), lo que repercute en los valores encontrados de índices de diversidad bajos. Por otra parte, el transecto T1 (Orinoca-Mara Mara), refleja índices de diversidad con valores por encima de los transectos T2 y T3. Mostrando que esta zona tiene mayor diversidad florística, es de importancia mencionar que esta zona no tiene actividad agrícola intensa como en el caso de las otras zonas en estudio. Por tanto, se evidencia el efecto de la perturbación por actividades antropogénicas en los transectos T2 y T3, en especial por la ampliación de la frontera agrícola con el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*).

Sin embargo, el transecto T1 al igual que los otros transectos T2 y T3, tienen influencias de estrés, principalmente edáficas, repercutiendo en la presencia de pocas especies (baja riqueza) y debido a la frecuencia de especies dominantes, su índice de diversidad es mayor con respecto a los otros transectos (T2 y T3). Por tanto, se indica que los transectos T2 y T3, tienen el efecto de perturbación, principalmente la agrícola y el transecto T1, tiene el efecto de estrés, principalmente edáfico. Siendo diferentes las zonas en estudio en cuanto a sus índices de diversidad (Shanon-Wiener: $F_{(2, 121)} = 23,206$; $p < 0,001$), (Evenness: $F_{(2, 121)} = 13,888$; $p < 0,001$), (Kothè: $F_{(2, 121)} = 14,067$; $p < 0,001$).

Es importante aclarar que el objeto del presente estudio no es cuestionar las actividades que realizan los productores, sino, evaluar en qué condición se encuentra las comunidades vegetales e identificar el o los posibles factores que inciden en la baja diversidad florística. Entendiendo que la zona evaluada se caracterizaba por ser potencialmente ganadero (llamuno) y en estos últimos años, hubo un cambio en el rubro, a la parte agrícola (cultivo de quinua), principalmente la zona de Calavillca (T1) y Rosapata (T2) y aclarando que el clima y los suelos son similares en las zonas en estudio. Lo cual indica que un factor potencial para la disminución de la diversidad florística y con este el cambio en su estructura comunitaria, es la actividad agrícola. Como se verifica, cuando se compara la similitud florística de las zonas en estudio, a través del índice de Morisita – Horn, evidencia una similitud muy elevada en los dos transectos (T2-T3), mayor al 70% (zonas con influencia de agricultura, en especial el cultivo de quinua), con respecto al transecto 1 (no se evidencia una actividad intensa de la agricultura), que tiene una similitud de 53% (transectos T1-T3) y una similitud de 36% (transectos T1-T2), (figura 6).



Figura 5. Diversidad de los transectos en estudio (T1 Orinoca-Mara Mara, T2 Orinoca Rosapata, T3 Orinoca-Calavillca)

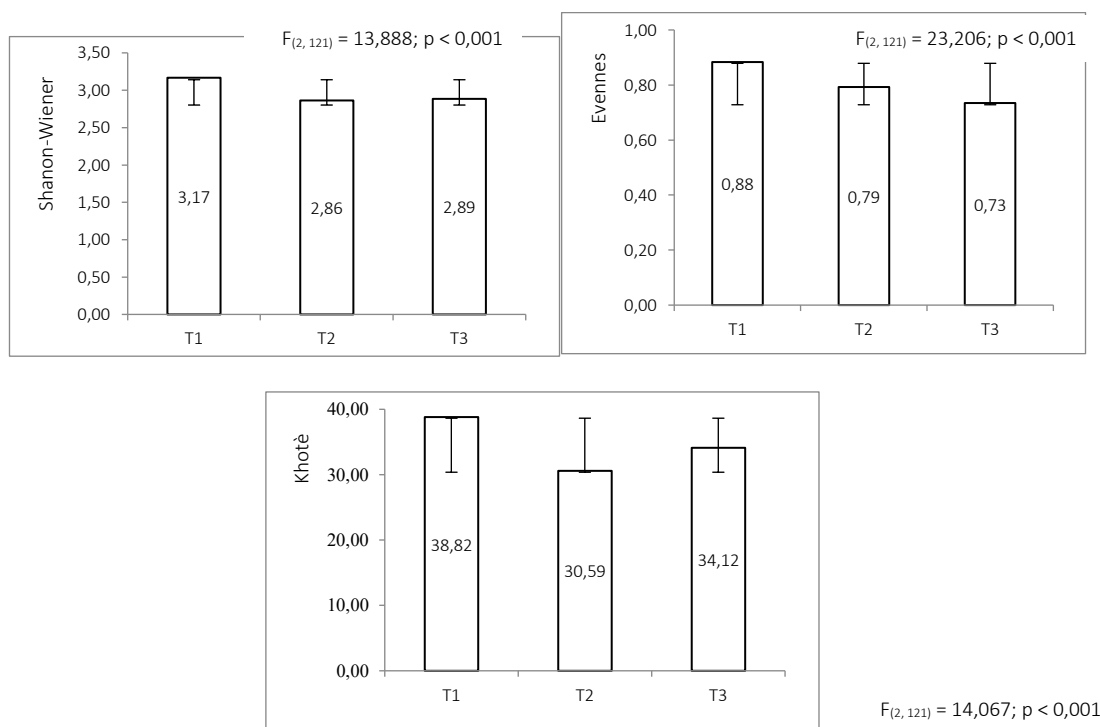
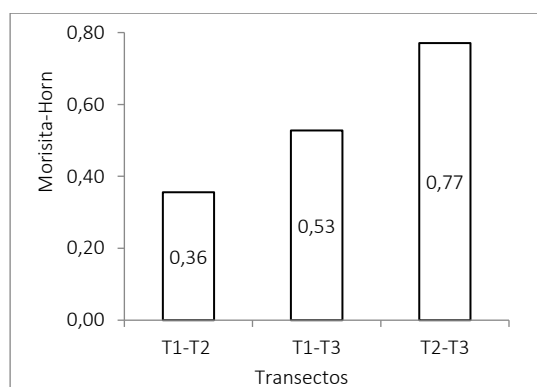


Figura 6 . Similitud de abundancia florística en las zonas en estudio (Índice de Morisita-Horn), (T1 Orinoca-Mara Mara, T2 Orinoca Rosapata, T3 Orinoca-Calavillca)



Los sistemas, sea cual sea, si lo conforman organismos vivos, y están fundadas en interacciones competitivas, el cual, si no existen perturbaciones y estrés de magnitudes mayores, dichos organismos tendrán un **comportamiento de Distribución Normal**. Por otra parte, los índices de diversidad, reflejan dicha relación (interacciones competitivas) entre especies que conforman comunidades vegetales. El índice de Shanon-Wiener, se utilizó para evaluar la riqueza y abundancia de especies, el uso del logaritmo neperiano (Ln) implica una disminución en el rango de los datos generados, siendo

aplicable para el estudio de comportamiento de distribución log-normal para T1 Orinoca-Mara Mara, T2 Orinoca-Rosapata, T3 Orinoca-Calavillca, (tabla 2), resaltando que T3= Orinoca-Calavillca, no tiene un comportamiento de distribución log-normal ($KS_{51}=0,244$; $p<0,001$ y $SW_{51}= 0,716$; $p<0,001$). Al contrario de los otros transectos evaluados. Las otras zonas, reflejan una log-normalidad esperada comparada con los datos registrados, T1=Orinoca-Mara Mara, ($KS_{36}=0,160$; $p<0,02$ y $SW_{36}= 0,947$; $p=0,085$) y T2=Orinoca-Rosapata, ($KS_{37}=0,104$; $p<0,20$ y $SW_{37}= 0,907$; $p=0,336$), (tabla 2).

Tabla 2. Resultados estadísticos de distribución log-normal y la Homoscedasticidad de varianzas

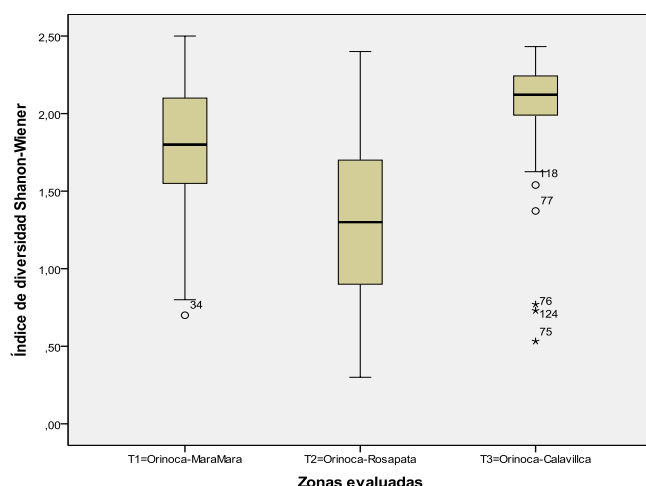
Zonas de estudio	Shanon-Wiener
T1 = Orinoca - Mara Mara	$KS_{36}=0,160$; $p = 0,020$ $SW_{36}=0,947$; $p = 0,085$
T2 = Orinoca - Rosapata	$KS_{37}=0,104$; $p = 0,200$ $SW_{37}=0,967$; $p = 0,336$
T3 = Orinoca = Calavillca	$KS_{51}=0,244$; $p < 0,001$ $SW_{51}=0,716$; $p < 0,001$
Prueba de Homoscedasticidad	$L_{(2, 121)} = 5,776$; $p = 0,004$

También se debe mencionar, que el transecto (T3= Orinoca-Calavillca), refleja sus datos (índices de diversidad), fuera de los cuartiles (figura 7), entendiendo que los datos de campo (riqueza y abundancia), tuvo un comportamiento de no equilibrio entre especies vegetales, posiblemente, producto de la perturbación (actividad agrícola del cultivo de quinua) de la zona.

Asimismo, se refleja una dispersión muy elevada en el T2 Orinoca-Rosapata, teniendo valores por debajo de 0,5 según el índice de Shanon-Wiener, lo que refleja que existen zonas muy perturbadas a lo largo del transecto 2.



Figura 7. Distribución de Índices de diversidad Shanon-Wiener en cuartiles de las zonas en estudio



En la figura 8, se observa la “*distribución log-normal*” del T1= Orinoca-Mara Mara, la distribución fue construida en base al índice de Shanon-Wiener (riqueza y abundancia) calculado para las 36 estaciones de monitoreo, se evidencia que no está perturbado, lo cual hace que tenga una distribución log-normal ($KS_{36}=0,160$, $p=0,02$; $SW_{36}=0,947$, $p=0,085$), siendo la prueba de SW la más robusta en comparación que KS. Por tanto, la zona de Orinoca-Mara Mara (T1), si bien existe actividad agrícola del cultivo de quinua, esta no representa una perturbación mayor para que afecte a la estructura comunitaria vegetal. La figura 9, muestra la “*distribución log-normal*” del T2= Orinoca-Rosapata, en base al índice de Shanon-Wiener (riqueza y abundancia), donde se evidencia que está perturbado, a razón de no mostrar una distribución log-normal. Sin embargo, los estadísticos muestran lo contrario ($KS_{37}= 0,104$, $p= 0,200$; $SW_{37}= 0,967$, $p=0,336$). Dichos valores contradictorios encontrados pueden deberse a la diferencia elevada que tiene sus índices de diversidad (figura 7), en el transecto, se evidencio zonas con alta perturbación (actividad agrícola, cultivo de quinua).

Figura 8. Distribución log-normal, Índice de diversidad Shanon-Wiener
T1 = Orinoca - Mara Mara

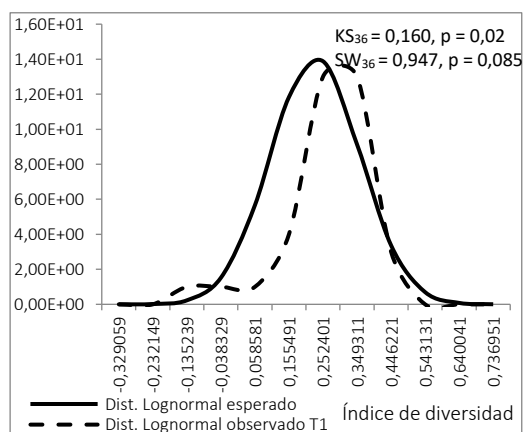
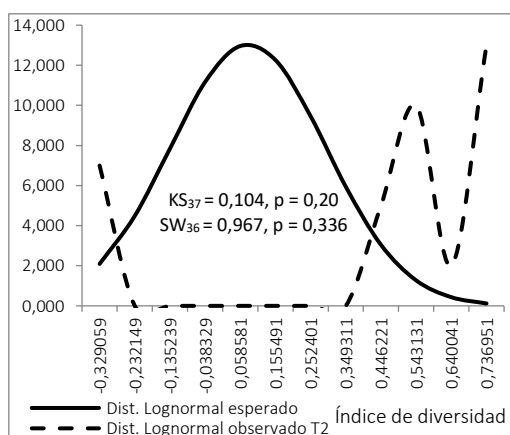
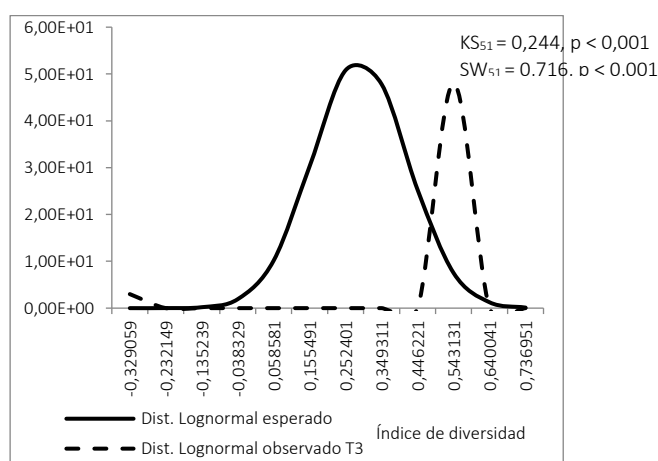


Figura 9. Distribución log-normal, Índice de diversidad Shanon-Wiener,
T2 = Orinoca - Rosapata.



La figura 10, se observa la “*distribución log-normal*” del T3= Orinoca-Calavillca, la distribución fue construida en base al índice de Shanon-Wiener (riqueza y abundancia), se evidencia que no tiene una distribución lognormal ($KS_{51}=0,244$, $p<0,001$; $SW_{51}=0,716$, $p<0,001$), por tanto, teniendo indicios de una perturbación elevada, reflejado en sus índices de diversidad que presentan un comportamiento de no equilibrio entre especies vegetales.

Figura 10. Distribución Lognormal, Índice de diversidad Shanon-Wiener, T3 = Orinoca - Calavilla



El análisis de escenarios revela que el Escenario de Transición Intermedia presenta una firma biológica híbrida. Tabla 3

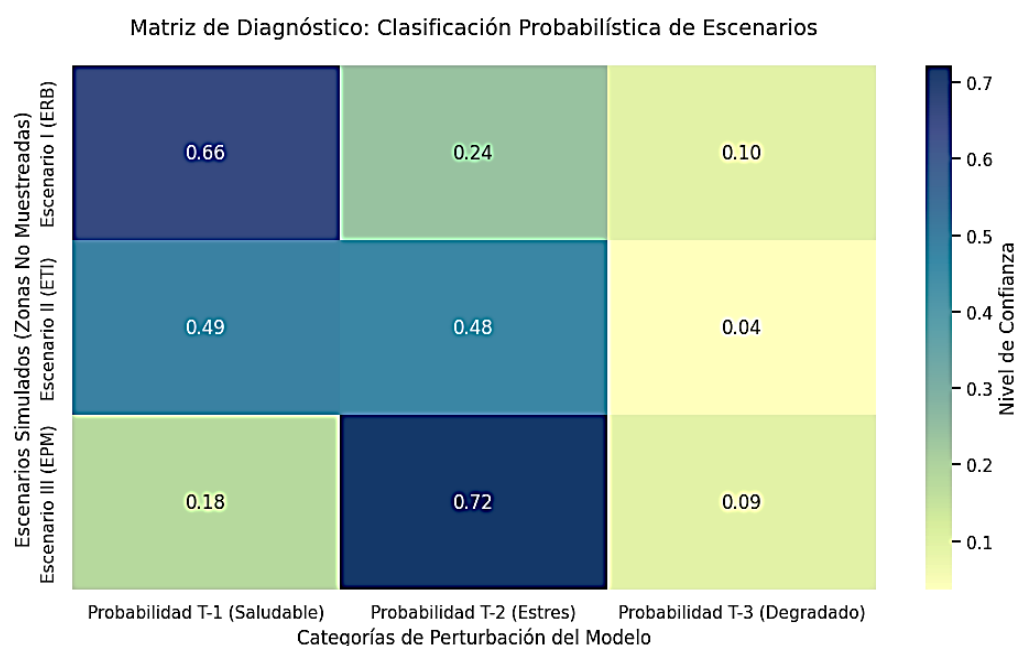
Tabla 3. Generación de escenarios virtuales

Situación	Kothé	Evenness	Shanon-Wiener
Escenario I (Sitio de referencia saludable)	82,0	0,65	2,2
Escenario II (Sitio de transición intermedia)	89,5	0,45	1,5
Escenario III (Sitio de perturbación, degradado)	95,5	0,20	0,8

Los datos de la tabla 3 representan sitios virtuales no muestreados físicamente. El modelo asigna a cada escenario una probabilidad de pertenencia, permitiendo diagnosticar el estado de salud ambiental sin intervención directa en el terreno. En el escenario 1 existe el 66% de probabilidad de pertenecer al transecto 1 (T1). El análisis probabilístico revela que la degradación ecosistémica en el área de estudio no sigue un patrón lineal simple. El Escenario 2 actúa como un punto de inflexión, donde la probabilidad de pertenencia se divide equitativamente entre el estado saludable y el de estrés ($P_{T1}=0,49$; $P_{T2}=0,48$), evidenciando una zona de transición crítica. Por otro lado, la alta afinidad del Escenario 3 con el estado de estrés ($P=0,72$) en lugar del degradado, sugiere que incluso bajo condiciones de alta presión antrópica, existen rasgos de resiliencia que el modelo identifica como característicos de la fase de alerta en transecto 2 (T2), permitiendo priorizar acciones de restauración antes del colapso total en transecto 3 (T3). (figura 11)



Figura 11. Matriz de Diagnostico probabilístico bajo tres escenarios



CONCLUSIONES

Flora silvestre

De las tres zonas de estudio, el T2 (Orinoca - Rosapata), presenta mayor riqueza de especies en total 59, seguido del T3 (Orinoca - Calavillca) con 56 especies, y el T1 (Orinoca - Mara Mara) con 52 especies.

En la zona, existe un proceso de amplitud de nicho de 11 especies dominantes: *Stipa ichu* (paja suave), seguido de las especies, *Baccharis incarum* Weed (ñaca-tola), *Adesmia spinosissima* (añawayá), *Stipa mexicana* Det. L. Torrico (tasa paqu), *Tetraglochin cristatum* (canalli), *Brommulous uniolooides* (cebadilla), *Baccharis boliviensis* (supu-tola), *Chondrosum simplex* (paso bandera), *Heterosperma* cf. *Nana* Serff (jisca muni), *Fabiana densa* Remy (tara-tara), *Opuntia soehrensii* Britton (ayrampu).

Las interacciones entre las especies dominantes y las no dominantes, afectan adversamente en el tamaño población, sobrevivencia y adecuación biológica de las especies no dominantes. Efectos generados por recursos cousados por las poblaciones de especies vegetales introducidas, y principalmente por la reducción de superficie utilizado por la actividad agrícola (cultivo de quinua).

La competencia intraespecífica en la zona tiende a aumentar la amplitud de nicho población, tal el caso de las 11 especies identificadas como predominantes en la zona. Y la reducción del tamaño



poblacional de especies en simpatria (que tiene lugar en una misma área), que son especies no dominantes.

La magnitud de los cambios de nicho y la depresión de los respectivos tamaños poblacionales es función de la eficiencia competitiva de cada especie, lo que refleja que *Stipa ichu* (T1=Orinoca-Mara Mara), *Tetraglochin cristatum* (T1=Orinoca-Mara Mara y T2=Orinoca-Rosapata), y *Parastrephia lepidhopilia* (T2=Orinoca-Rosapata) tendrían estas características.

En la zona se evidencia que existen especies dominantes ya sea por su presencia y/o su abundancia (*Stipa ichu*, *Fabiana densa*, *Parastrephia sp.*, *Brommulous unioides*), lo que hace que exista una disminución poblacional de otras especies y con este, el riesgo de pérdida de diversidad florística, siendo un factor preponderante el uso de los suelos de las praderas nativas por la agricultura principalmente el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa*).

Diversidad florística

La riqueza y abundancia de especies estudiadas, asimismo la equivalencia que existe entre la abundancia encontrada y la esperada, además de ver las especies ausentes, a través de los índices de diversidad, evidencian que los transectos en estudio (T1 Orinoca - Mara Mara, T2 Orinoca - Rosapata, T3 Orinoca - Calavillca) son diferentes entre ellos y en algunos casos diferentes al interior de ellos, principalmente en los transectos T2 y T3.

El transecto T1 Orinoca - Mara Mara, en relación a los otros transectos (T2 Orinoca - Rosapata, T3 Orinoca - Calavillca), sus índices de diversidad está menos dispersos con un comportamiento de equilibrio, mostrando una estructura comunitaria menos perturbada, reflejando el efecto negativo que causa la actividad agrícola a la estructura comunitaria de especies vegetales en este caso a los T2 Orinoca - Rosapata y T3 Orinoca - Calavillca. Un factor potencial para la disminución de la diversidad florística y con este el cambio en su estructura comunitaria, es la actividad agrícola.

Comportamiento de distribución log-normal

La “distribución log-normal observado” del T1= Orinoca-Mara Mara, en comparación con la “distribución lognormal esperado” es un medio para indicar que la zona no presenta perturbación, lo cual hace que tenga una distribución log-normal ($KS_{36}=0,160$, $p=0,02$; $SW_{36}=0,947$, $p=0,085$). Si bien



existe actividad agrícola en especial el cultivo de quinua, esta no representa una perturbación mayor para que afecte a la estructura comunitaria de las especies vegetales.

Respecto al T2= Orinoca-Rosapata, está perturbado, a razón de no mostrar una distribución lognormal. Sin embargo, los estadísticos muestran lo contrario ($KS_{37}= 0,104$, $p= 0,200$; $SW_{37}= 0,967$, $p=0,336$). Esta contradicción se debe a la diferencia elevada en sus índices de diversidad, por el hecho que el transecto, se encuentra en una zona con alta perturbación (actividad agrícola, cultivo de quinua).

En el T3= Orinoca-Calavillca, no presenta una distribución log-normal ($KS_{51}=0,244$, $p<0,001$; $SW_{51}=0,716$, $p<0,001$), por tanto, teniendo indicios de una perturbación elevada, reflejado en sus índices de diversidad que presentan un comportamiento de no equilibrio entre especies vegetales.

Por tanto, podemos concluir que el uso de metodologías como el transecto variable propuesto por Foster, 2005, el uso de índices de diversidad y realizar un análisis de Distribución Normal, ayuda a entender el comportamiento de comunidades vegetales, como base para proponer y elaborar proyectos de manejo y conservación de suelos y praderas nativas, frente a la actividad agroproductiva.

Modelos de aprendizaje automático

La construcción de la Matriz de Diagnóstico Probabilístico trasciende la descripción estática de los transectos. Esta herramienta permite proyectar la salud de zonas no muestreadas físicamente, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones. La existencia de un punto de equilibrio precario donde la probabilidad de pertenencia se divide casi equitativamente entre el estado saludable (0,49) y el estado de estrés (0,48). Este resultado identifica matemáticamente el umbral de resiliencia del ecosistema, sugiriendo que la degradación estructural de la comunidad vegetal ocurre de manera silenciosa antes de que la pérdida de especies sea total.

Paquetes computarizados utilizados

STIMATE - 7.5.1; Statistical estimation of species Richness and Shared species from samples

Statconn DCOM y el software estadístico [R]

Python



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alandia C. y Lescano A. 2004. Proyecto Conservación de Biodiversidad en el Sistema TDPS. Autoridad Binacional Autónoma del Sistema TDPS. La Paz. 83 pag.
- Black, C. A. 1975. Relaciones suelo - planta. Trad. de la 1^{ra} edición inglesa por Armando Rabuffeti. México. Ed. Centro Regional de Ayuda Técnica. Tomo I, 444 pag.
- Blanco, H. 1999. Apuntes inéditos "Conservación de Suelos", FCAP - UTO, Oruro - Bolivia, 125 pag.
- Carter D. 1981. Salinity and plant productivity. Chemical Rubber Co., Series in Nutrition and Food.
- FAO, ISRIC y SICS. 1999. Base referencial Mundial del Recurso Suelo. SIN 1020-430X. 90 pag.
- Franken M. 2005. Calidad Ambiental, Conceptos Generales (Doc. inédito). Trad. Elke Kalkowski. 85 p.
- Gudynas E., 1998. Conservación, sustentabilidad ecológica y la articulación entre comercio y ambiente. Ciencias Ambientales, Costa Rica. pp 48 - 57.
- Hederá I. A. 1994. Botánica Ambiental Aplicada, Las plantas y el equilibrio ecológico de nuestra tierra, España, 205 pag.
- IPCC, 1997. Impactos Regionales del Cambio Climático, Evaluación de la Vulnerabilidad, Cap. 6. América Latina, UNEP, 53 pag.
- Jaksic F. 2001 Ecología de Comunidades. Universidad Católica de Chile. 233 pag.
- Jaksic, F. M. & P. FEINSINGER. 1998. Biodiversity in Fluctuating Dry-Land Environments: Basic and Applied Aspects. En: Rundel et al. (eds.). Landscape Degradation and Biodiversity in Mediterranean-Type Ecosystems. Ecological Studies vol.136. Springer-Verlag. Heidelberg.
- Leff E. 2000. Saber Ambiental. 2da. Edición. Edit. Siglo Veintiuno. México. 285 pag.
- Mansilla H.C.F. 1992. La percepción social de fenómenos ecológicos en América Latina. 2da. Edición, Imp. Huellas S.R.L. Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios. La Paz, Bolivia. 124 pag.
- Montero J.C., MUELLER R. 2005. Mapa de la Vegetación de los Bosques Nativos Andinos de Bolivia, Santa Cruz - Bolivia. PROBONA. 55 pag.
- Montoya CH. J. C., PEREZ L. M. R. 2009. Lago Uru Uru: Evaluación de la Calidad del Agua, Sedimentos y Totorá. Primera edición, Editorial Latinas. Oruro - Bolivia. 155 p.



- Mostacedo B. y Todds Fredericksen. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz - Bolivia. 60 pag.
- OEA/UNEP 1996. Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú.
- Pérez L. M. 2009. Apuntes inéditos "Ecología y RRNN", FCAPV-UTO, Oruro-Bolivia, 95 pag.
- Pérez L. M. 2010. "Fertilidad de Suelos y Fertilizantes", FCAPV-UTO, Oruro-Bolivia, 295 pag.
- Peter Feinsinger. 2004. El Diseño de Estudios de Campo para la Conservación de la Biodiversidad, Trad. de la 1^{ra} edición inglesa por Gustavo Catan y Carolina Murcia (WCS), Ed. FAN, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia, 242 pag.
- Rabinovich J. 1978. Ecología de Poblaciones. Centro de Ecología. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas, Venezuela. 115 pag.
- Sherman 1992. Mapa geológico del Altiplano y Cordillera Occidental, Bolivia.
- Steubing L. Godoy R. y Alberdi M. 2002. Métodos de Ecología Vegetal. Univ.Austral de Chile. 343 pag.

