

INFLUENCIA ANTRÓPICA EN LA DISMINUCIÓN DE ESPACIOS NATURALES: ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL PARQUE NACIONAL WARAIRA REPANO, 1985-2023

Autor: Alejandro Vivas, Br en Ciencias

Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Simón Bolívar

Teléfono: +58 (412) 985 59 92

Caracas, Venezuela

RESUMEN

Este estudio abordó la presión antrópica sobre el Parque Nacional Waraira Repano (PNWR), cuantificando el impacto del cambio de uso del suelo sobre sus ecosistemas en el periodo 1985–2023. La investigación tuvo como objetivo principal determinar la tasa de reemplazo anual de espacios naturales por usos humanos, identificando la correlación directa con la expansión del uso agropecuario. La metodología empleó las series históricas anuales de MapBiomás Venezuela, reclasificando las coberturas en dos macro-clases simétricas (Espacios Naturales y Usos Antrópicos). Se utilizó el lenguaje de programación Python para aplicar un modelo de regresión lineal y análisis de correlación de Pearson a la serie temporal de 39 años. Los resultados revelaron una transferencia neta de cobertura del 1.4%, equivalente a la pérdida de 1.180 hectáreas de espacios naturales. El modelo estadístico confirmó una correlación negativa perfecta ($r=-1.000$), estableciendo que la expansión opera bajo un principio de reemplazo directo, con una tasa constante de 48.1 hectáreas anuales (ha/año). Se identificó al Uso Agropecuario como el principal motor de esta presión. Se concluye que esta tendencia inercial ($R^2=0.821$), que proyecta una invasión acumulada de 4.660 ha para el año 2040, es una amenaza sostenida que compromete la capacidad del Warairareámp como fuente hídrica esencial para la region, por lo que se propone una gestión de conservación por parte de entidades gubernamentales basada en datos geoespaciales precisos.

1.Introducción

1.1 Objetivos

El Parque Nacional Waraira Repano, comúnmente conocido como El Ávila, es el principal pulmón vegetal de Caracas. Su función ecológica es fundamental para la estabilidad climática, la conservación de la biodiversidad y la obtención de recursos hídricos que abastecen a la capital venezolana. A pesar de poseer el estatus de área protegida, el parque enfrenta una presión constante por la expansión no regulada de actividades antrópicas en sus zonas de amortiguamiento y laderas.

En el presente trabajo, se quiere demostrar el impacto negativo que representa el cambio de uso del suelo sobre los ecosistemas del parque, centrándose particularmente en la expansión del uso agropecuario.

El objetivo principal de esta investigación es **cuantificar la tasa de reemplazo anual de los espacios naturales por usos antrópicos en el PN Waraira Repano (1985-2023)**, identificando la correlación directa de la pérdida de formaciones naturales con el incremento de usos agropecuarios en este período.

1.2 Contexto Histórico/ Social

El **Parque Nacional Waraira Repano**, fue oficialmente declarado en **1958**. Se encuentra localizado dentro de la Cordillera de la Costa, extendiéndose por Caracas, el norte del estado Miranda y el sur del estado La Guaira. Posee una superficie de 85.192 hectáreas (ha).

La función más importante del Waraira Repano es la **regulación hidrológica**, actuando como una fuente de agua natural. Su denso ecosistema de bosques es fundamental para la captación y filtración del agua, siendo el nacimiento de numerosos riachuelos y quebradas fundamentales para el suministro hídrico regional. Estos incluyen sistemas como La Quebrada de Cotiza, Chacaito, Anauco, Las Adjuntas, El Sebucán, Los Chorros (El Paraíso) y La Julia, entre muchos otros.

Esta red de suministro de agua es vital para la sostenibilidad regional. Los cursos de agua de la vertiente Norte aportan sus caudales a las poblaciones del Litoral Central, incluyendo La Guaira, Naiguatá y Los Caracas. Por su parte, en la vertiente Sur, el parque suministra agua directamente a la metrópolis de Caracas, así como a ciudades intermedias como Guatire y Guarenas. Además, ríos como el Río Grande y Río Chiquito han sido fuente de energía eléctrica para la región, lo que reafirma el valor estratégico y la criticidad de la conservación del Waraira Repano para la estabilidad socioeconómica de Venezuela.

2. Metodología

Para este análisis, se utilizan las series históricas anuales de cobertura y uso del suelo proporcionadas por **MapBiomás Venezuela** (1985–2023). La robustez de estos datos geospaciales, que cubren un período de 39 años, permite pasar de la observación cualitativa a la cuantificación precisa de las transformaciones territoriales.

Para validar la hipótesis de la presión humana, las categorías detalladas de MapBiomás fueron reclasificadas en dos macro-clases principales para simplificar el análisis del flujo de reemplazo:

Macro-Clase	Categorías de MapBiomás
Espacios Naturales	Formaciones Boscosas, Sabana/Herbazal, Arbustal, Río, lago u océano
Usos Antrópicos	Uso Agropecuario, Uso Urbano, Uso Minero, Áreas sin Vegetación.

Esta forma de agrupar los datos es fundamental para medir la pérdida neta de capital natural frente a la expansión de la intervención humana en el territorio del parque a lo largo de la serie temporal.

El análisis de datos se desarrolló íntegramente utilizando **el lenguaje de programación Python** y las siguientes librerías: pandas para la manipulación y estructuración de la serie temporal, matplotlib para la visualización, y scikit-learn para el modelado.

A) Modelo de Regresión Lineal (Cuantificación de la Tasa de Reemplazo)

Se aplicó un modelo de regresión lineal multivariado para cuantificar la influencia específica de las actividades humanas en la disminución de la cobertura natural. La metodología se enfocó en:

1. Variable Dependiente (y): Superficie anual de los Espacios Naturales.
2. Variables Independientes (X): Superficies anuales de Uso Agropecuario, Uso Urbano y Uso Minero.

El modelo permite obtener los coeficientes de regresión (β), los cuales indican la contribución (hectáreas naturales perdidas por hectárea ganada en un uso específico) de cada uso humano. De particular interés es el coeficiente asociado al Uso Agropecuario, que servirá para validar la correlación propuesta en el objetivo. Además, el coeficiente de determinación

(R²) indicará el porcentaje de la varianza total de la pérdida natural que es explicado por la expansión antrópica.

El modelo permite obtener los coeficientes de regresión (β), los cuales indican la contribución (hectáreas naturales perdidas por hectárea ganada en un uso específico) de cada uso humano. De particular interés es el coeficiente asociado al Uso Agropecuario, que servirá para validar la correlación propuesta en el objetivo. Además, el coeficiente de determinación (R²) indicará el porcentaje de la varianza total de la pérdida natural que es explicado por la expansión antrópica.

B) Análisis de Series de Tiempo

Se utilizó la serie temporal de 1985 a 2023 para generar un gráfico de áreas apiladas que visualiza la tendencia histórica y la magnitud del cambio en el equilibrio entre las macro-clases Espacios Naturales y Usos Antrópicos.

Para complementar la evidencia cuantitativa, se utilizaron los recursos cartográficos de MapBiomass para generar dos mapas de contraste que ilustran espacialmente la transformación: el Mapa Inicial (1985) y el Mapa Final (2023). La comparación visual permite identificar geográficamente las áreas de mayor avance de la frontera agropecuaria y urbana dentro del perímetro del parque.

3. Resultados

3.1. Balance Histórico y Cuantificación del Cambio

El análisis del periodo 1985-2023 sobre la superficie total del PN Waraira Repano (81.763 ha) revela una transferencia neta de cobertura del suelo de los espacios naturales hacia usos antrópicos.

Categoría	Superficie Inicial (1985)	Superficie Final (2023)	Cambio Neto (ha)	Cambio Neto (%)
Espacios Naturales	79.380 ha (97.1%)	78.200 ha (95.6%)	-1.180 ha	-1.4%
Usos Humanos	2.383 ha (2.9%)	3.562 ha (4.4%)	+1.180 ha	+1.4%

Se confirma que el área total del parque se mantuvo constante (desviación estándar de 0.35 ha), lo que indica que la pérdida de 1.180 hectáreas de espacios naturales se correlaciona exactamente con la ganancia de 1.180 hectáreas de usos humanos.

3.2. Análisis de Regresión y Tasa de Reemplazo

La aplicación del modelo de Regresión Lineal a la serie temporal de 38 años arrojó los siguientes parámetros clave:

- **Tasa de Cambio Anual:** El modelo predice que los Espacios Naturales disminuyeron a un ritmo constante de -48.1 ha/año, mientras que los Usos Humanos aumentaron a un ritmo simétrico de $+48.1$ ha/año.
- **Coefficiente de Determinación (R^2):** Se obtuvo un $R^2=0.821$ para ambas tendencias. Este alto valor indica que el **82.1% de la varianza** en la pérdida/ganancia de superficie se explica simplemente por la progresión lineal del tiempo, confirmando una tendencia de cambio muy estable y predecible a lo largo del periodo.

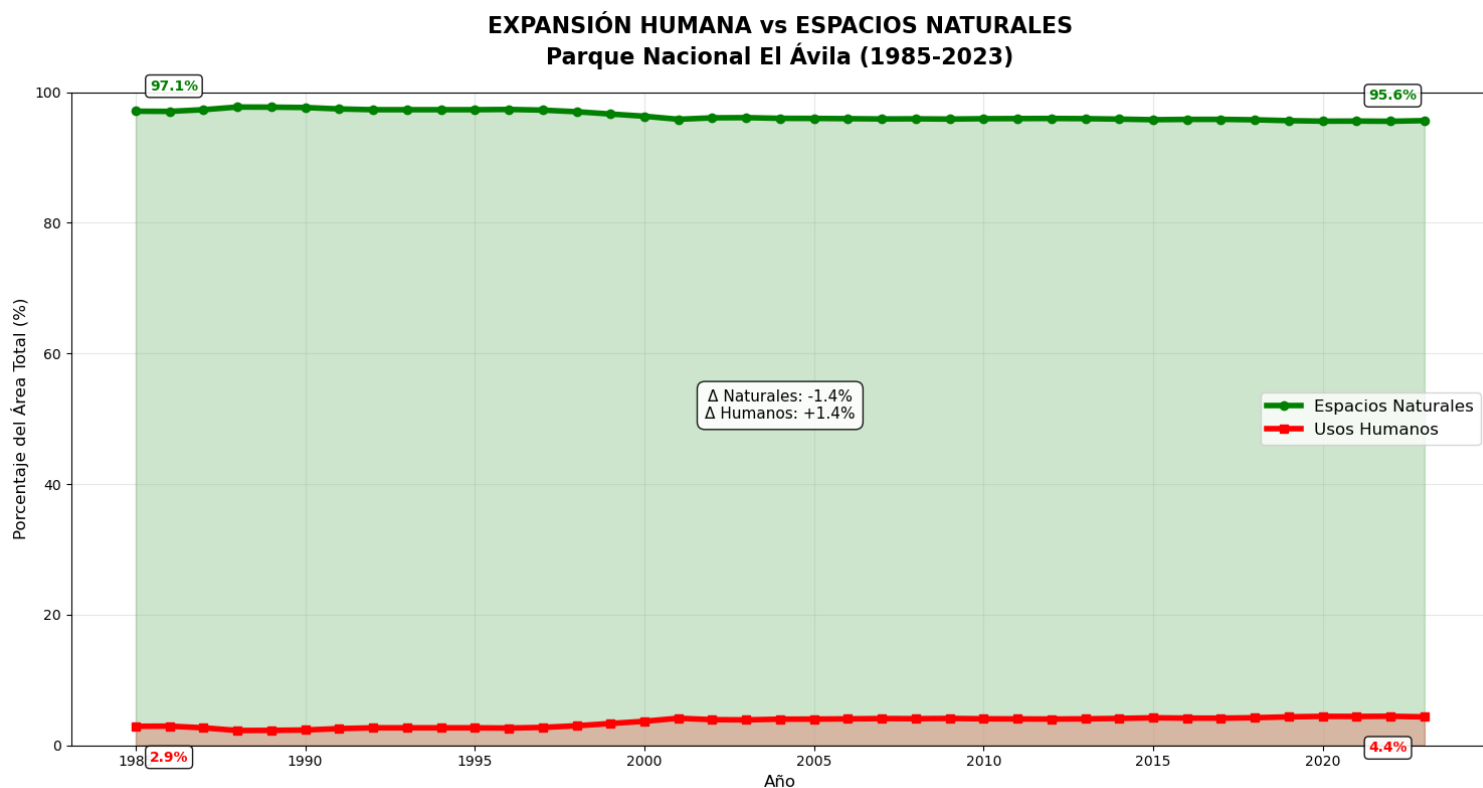
3.3. Correlación Estadística (Validación Definitiva)

El análisis de correlación de Pearson entre las series de Espacios Naturales y Usos Humanos arrojó un valor de $r=-1.000$ con un valor $-p=0.000000$.

Este resultado estadístico representa una **correlación negativa perfecta**, lo que constituye una **evidencia concluyente** de que la expansión de las actividades humanas en el PN Waraira Repano opera bajo un principio de **reemplazo directo**: toda hectárea ganada por un uso antrópico es una hectárea perdida de cobertura natural.

3.4. Análisis de los gráficos computarizados generados en Python

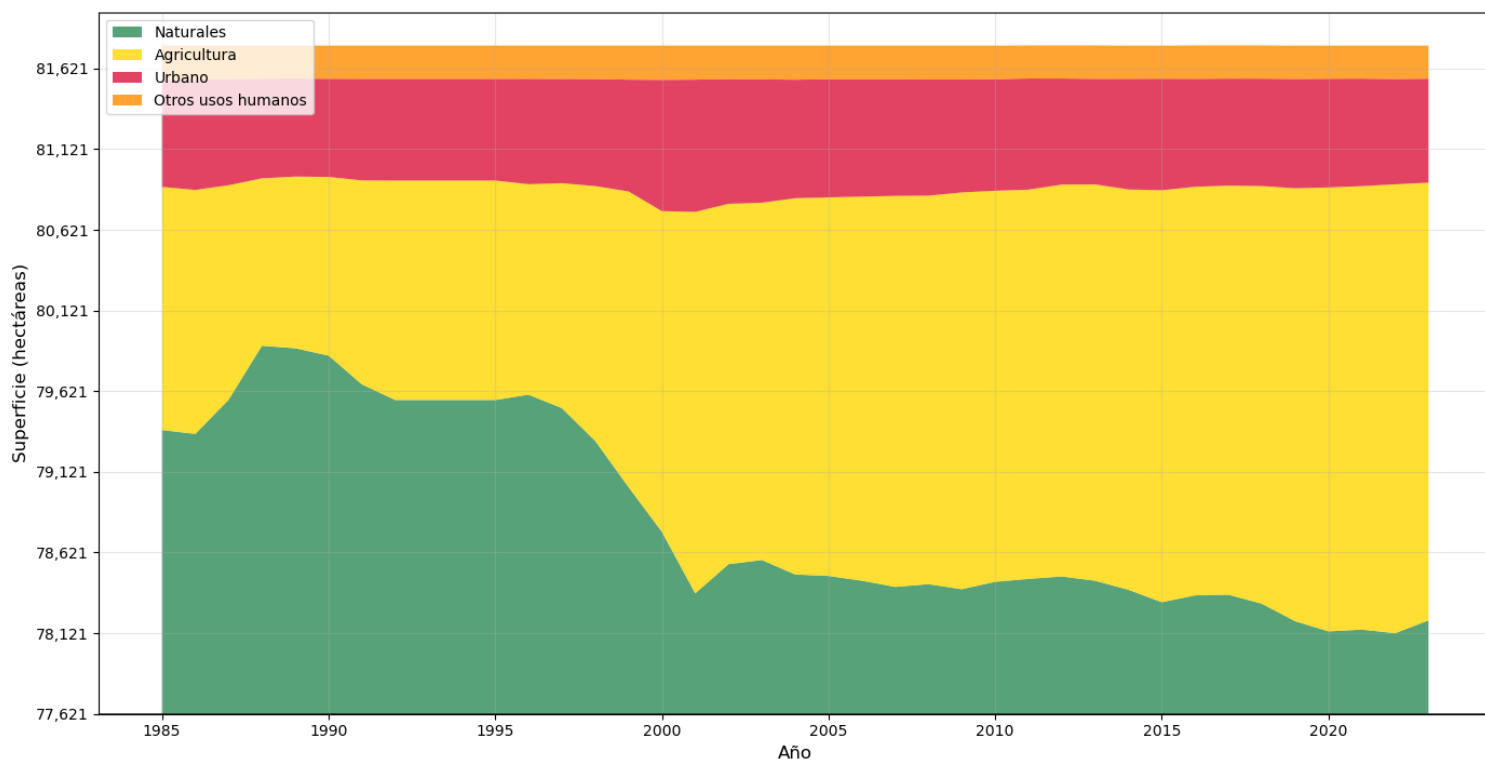
Gráfico 1: Evolución de porcentajes con líneas con sombreado.



En este grafico podemos observar que a medida que la línea verde (Espacios Naturales) desciende constantemente, la línea roja (Usos Humanos) asciende. En donde la tasa de separación de ganancia/perdida es $\Delta 1.4\%$, evidencia de clara de transferencia de cobertura de suelo y simetría.

Gráfico 2: Áreas apilada

EXPANSIÓN HUMANA - COMPOSICIÓN DE USOS Parque Nacional El Ávila (1985-2023)



En este grafico se tiene las siguientes capas:

- Verde: Espacios naturales los cuales son formaciones boscosas, sabana/herbazal, arbustal, río, lago u océano
- Amarillo: Uso agropecuario
- Rojo: Uso urbano como edificaciones y viviendas.
- Naranja: Otros usos humanos como por ejemplo de uso minero

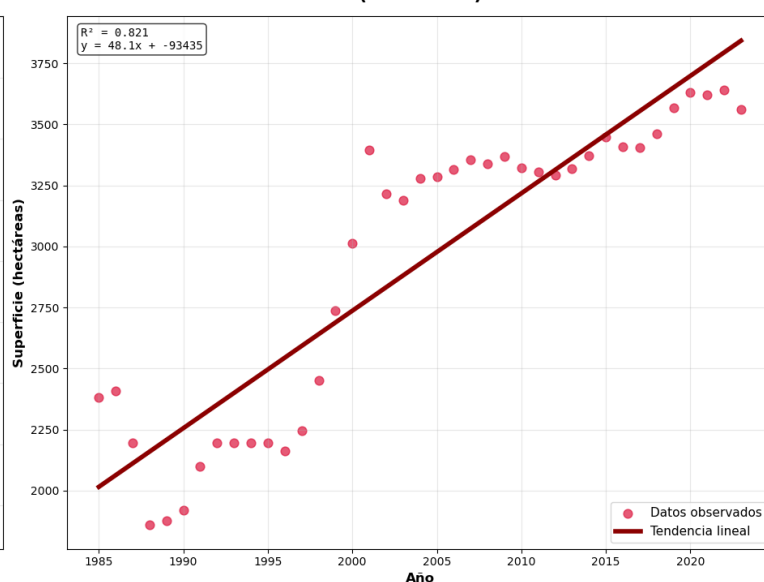
Los datos son mostrados desde una línea base ajustada (**77,620.77 ha**) para poder percibir mejor los cambios. La visualización confirma que el Uso Agropecuario es la capa de mayor extensión y crecimiento ascendente, actuando como el principal motor de la presión constante. El Uso Urbano y Otros Usos Humanos se mantienen casi constantes, lo que dirige la atención del análisis a la frontera agrícola.

Gráfico 3: Regresiones Lineales

REGRESIÓN LINEAL: Espacios Naturales
(1985-2023)



REGRESIÓN LINEAL: Usos Humanos
(1985-2023)



En este gráfico de dispersión se puede visualizar la tendencia que representa el patrón de los datos observados. En este caso, para cada año de la línea histórica 1985-2023 se representa como un punto en cada gráfica. El gráfico verde representa la regresión lineal de los espacios naturales y el gráfico rojo la regresión lineal de los usos humanos (uso agropecuario, uso urbano y cualquier otro tipo de uso humano).

El coeficiente de determinación R^2 la cual mide el coeficiente de ajuste de los modelos de regresión, da como resultado 82.1% ($R^2 = 0.821$), confirmando una tendencia de cambio muy estable y predecible a lo largo del periodo.

Obtenemos las ecuaciones de la recta de la tendencia lineal

- **Ecuación para Espacios Naturales:** $y = -48.1x + 95484$
 - Pendiente ($\beta_1 = -48.1$): Significa que los Espacios Naturales disminuyen en promedio 48.1 hectáreas por cada año que pasa.
- **Ecuación para Usos Humanos:** $y = +48.1x - 13721$
 - Pendiente ($\beta_1 = +48.1$): Esta pendiente, simétrica y positiva, confirma el reemplazo directo. Significa que los Usos Humanos aumentan en promedio 48.1 hectáreas por cada año que pasa.

Se observa perfecta simetría entre ambas gráficas obteniendo una clara relación de reemplazo de los espacios naturales por los espacios de uso humano.

3.5. Proyección de la Tendencia

Manteniendo la tendencia lineal actual de -48.1 ha/año, la proyección de pérdida de cobertura natural es la siguiente:

- **2025:** Se proyectan 77.824 ha de espacios naturales.
- **2030:** Se proyectan 77.584 ha de espacios naturales.
- **2040:** Se proyectan 77.103 ha de espacios naturales.

La tasa de pérdida, aunque porcentualmente moderada, es **constante, predecible y estadísticamente significativa**, lo que implica una amenaza sostenida a la integridad ecológica del PN Waraira Repano.

3.6. Visualización Geográfica (Imágenes de Mapas)

Esta sección esta destinada a la comparación visual del PN Warairarepano 1985 vs 2023. Con extraídos de la herramienta Biomap Venezuela.

Figura Waraira Repano 1985

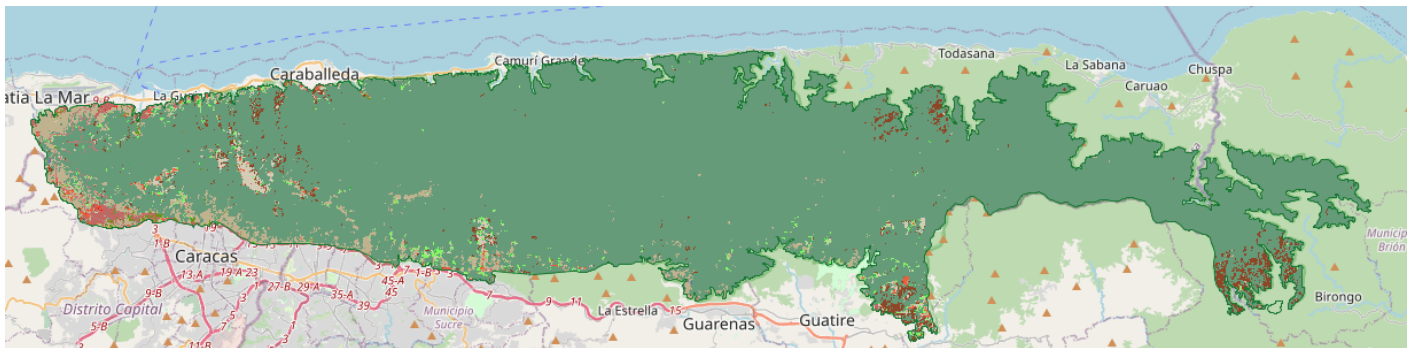
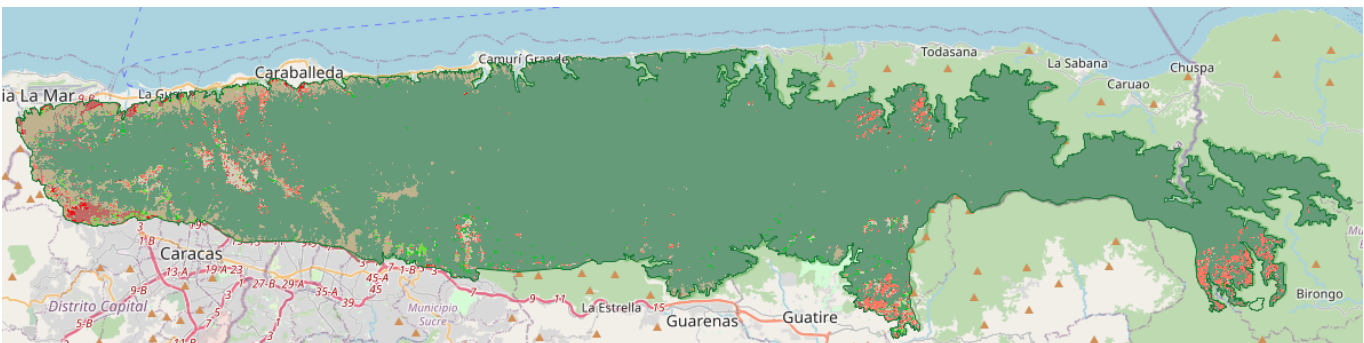


Figura Waraira Repano 2023



Es observable el remplazo de espacios naturales por uso agropecuario observando las manchas beige. Especialmente el incremento del uso agropecuario se encuentra en la parte noroeste del parque nacional, en el estado La Guaira.

4. Discusión y Conclusiones

Los resultados de este estudio validan la hipótesis inicial, demostrando la transición de uso del suelo dentro del PN Waraira Repano. La regresión lineal y el coeficiente de correlación de Pearson de $r = -1.000$ constituyen una evidencia concluyente de que la expansión de los usos humanos en el parque opera bajo un principio de **reemplazo directo** sobre las zonas naturales de formaciones boscosas, sabana/herbazal, arbustal, río o lagos

Aunque la pérdida neta de 1.4% parezca modesta en términos porcentuales, la tasa constante de 48.1 ha de invasión anual es una amenaza sostenida que compromete la integridad del parque en el largo plazo. La alta estabilidad de la tendencia, demostrada por el $R^2=0.821$, subraya que esta presión es un proceso inercial y estructural.

La tendencia de cambio observada, impulsada principalmente por la expansión agropecuaria (como evidenció el Gráfico de Áreas Apiladas), tiene implicaciones críticas que van más allá de la superficie:

1. **Riesgo Ecológico y Hídrico:** La pérdida constante de 48.1 ha anuales de cobertura vegetal reduce la capacidad del parque para captar y regular el agua, afectando directamente los servicios ecosistémicos que benefician a la población de Caracas, y aumentando la vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos.
2. **Inercia de la Degradación:** La proyección al año 2040, que estima una invasión de 4.660 ha de Usos Humanos, indica que de no haber intervención, el proceso de degradación continuará de forma predecible, llegando a un punto de no retorno.

El análisis cuantitativo de MapBiomias y el modelo de regresión proporcionan una base técnica y numérica para la gestión del parque. La solución no reside solo en detener la pérdida, sino en gestionar la tendencia de manera inteligente. Dado que la actividad agropecuaria es el principal motor de la expansión, las **políticas gubernamentales** de control y sensibilización deben ser más rigurosas en las zonas de frontera agrícola, ofreciendo alternativas económicas sostenibles a las comunidades que no impliquen la degradación del área protegida. Es urgente que las decisiones de conservación migren de la intención a la acción **basada en datos**, utilizando herramientas como **MapBiomias** para garantizar la integridad ecológica y el futuro hídrico de la región.

5. Código utilizado:

En la siguiente sección se encuentra el código de Python utilizado.

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from sklearn.linear_model import LinearRegression
4 import numpy as np
5 from scipy import stats
6
7 # --- 1. CARGAR Y PREPARAR DATOS ---
8 try:
9     df = pd.read_csv(filepath_or_buffer='datos_biomap_csv.csv', encoding='latin-1')
10 except FileNotFoundError:
11     print("Error: El archivo 'datos_biomap_csv.csv' no se encontró.")
12     exit()
13
14 # --- DEFINIR CATEGORÍAS ---
15 # Espacios Naturales
16 df['Naturales'] = df['Bosque'] + df['Sabana/Herbazal'] + df['Arbustal'] + df['Río, lago u oceano']
17 # Usos Humanos
18 df['Antropogenicos'] = df['Uso agropecuario'] + df['Uso urbano'] + df['Uso minero'] + df['Sin vegetacion']
19
20 # Verificación de datos
21 df['Total_verificado'] = df['Naturales'] + df['Antropogenicos']
22 variacion_total = df['Total_verificado'].std()
23 print(f"✅ Verificación: Desviación del área total = {variacion_total:.2f} ha")
24
25 # Calcular porcentajes
26 df['_Naturales'] = (df['Naturales'] / df['Total_verificado']) * 100
27 df['_Antropogenicos'] = (df['Antropogenicos'] / df['Total_verificado']) * 100
28
29 # --- 2. GRÁFICO 1: EVOLUCIÓN DE PORCENTAJES (Lineas con sombreado) ---
30 plt.figure(figsize=(15, 8))
31
32 # Gráfico de líneas principales
33 plt.plot(*args: df['Year'], df['_Naturales'], color='green', linewidth=4, label='Espacios Naturales', marker='o', markersize=6)
34 plt.plot(*args: df['Year'], df['_Antropogenicos'], color='red', linewidth=4, label='Usos Humanos', marker='s', markersize=6)
35
36 # Área sombreada
37 plt.fill_between(df['Year'], df['_Naturales'], alpha=0.2, color='green')
38 plt.fill_between(df['Year'], df['_Antropogenicos'], alpha=0.2, color='red')
39
40 # Personalización
41 plt.title(label='EXPANSIÓN HUMANA vs ESPACIOS NATURALES\nParque Nacional El Ávila (1985-2023)',
```

```

43 plt.ylabel(ylabel: 'Porcentaje del Área Total (%)', fontsize=12)
44 plt.xlabel(xlabel: 'Año', fontsize=12)
45 plt.legend(fontsize=12, loc='best')
46 plt.grid(visible: True, alpha=0.3)
47 plt.ylim(*args: 0, 100)
48
49 # Añadir valores
50 valores = [
51     (df['Year'].iloc[0], df['_Naturales'].iloc[0], 'green', (10, 15), f"{df['_Naturales'].iloc[0]:.1f}%"),
52     (df['Year'].iloc[-1], df['_Naturales'].iloc[-1], 'green', (-40, 15), f"{df['_Naturales'].iloc[-1]:.1f}%"),
53     (df['Year'].iloc[0], df['_Antropogenicos'].iloc[0], 'red', (10, -25), f"{df['_Antropogenicos'].iloc[0]:.1f}%"),
54     (df['Year'].iloc[-1], df['_Antropogenicos'].iloc[-1], 'red', (-40, -25), f"{df['_Antropogenicos'].iloc[-1]:.1f}%")
55 ]
56
57 for x, y, color, offset, texto in valores:
58     plt.annotate(texto, xy=(x, y), xytext=offset, textcoords='offset points',
59                 color=color, fontweight='bold', fontsize=10,
60                 bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", facecolor="white", alpha=0.9))
61
62 # Añadir cambio neto
63 cambio_nat = df['_Naturales'].iloc[-1] - df['_Naturales'].iloc[0]
64 cambio_hum = df['_Antropogenicos'].iloc[-1] - df['_Antropogenicos'].iloc[0]
65
66 plt.text(df['Year'].mean(), y: 50,
67         s: f'Δ Naturales: {cambio_nat:+.1f}%\nΔ Humanos: {cambio_hum:+.1f}%',
68         bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.5", facecolor="white", alpha=0.9),
69         ha='center', fontsize=11)
70
71 plt.tight_layout()
72 plt.show()
73
74 ##END
75
76 # --- 3. GRÁFICO 2: ÁREA APILADA ---
77 min_naturales = df['_Naturales'].min() # 500 ha desde el base_line
78 base_line_optima = min_naturales - 500 # A partir se empieza a mostrar la grafica 77,620.77 ha
79
80 plt.figure(figsize=(14, 8))

```

```

80 plt.figure(figsize=(14, 8))
81
82 # Ajustar los datos
83 naturales_ajustado = df['Naturales'] - base_line_optima
84 agropecuario_ajustado = df['Uso agropecuario']
85 urbano_ajustado = df['Uso urbano']
86 otros_ajustado = df['Uso minero'] + df['Sin vegetacion']
87
88 plt.stackplot(df['Year'],
89              *args: [naturales_ajustado, agropecuario_ajustado, urbano_ajustado, otros_ajustado],
90              labels=['Naturales', 'Agricultura', 'Urbano', 'Otros usos humanos'],
91              colors=['#2E8B57', '#FFD700', '#DC143C', '#FF8C00'],
92              alpha=0.8)
93
94 plt.axhline(y=0, color='black', linestyle='-', alpha=0.7, linewidth=2)
95 plt.title(label: f'EXPANSIÓN HUMANA - COMPOSICIÓN DE USOS\nParque Nacional El Ávila (1985-2023)',
96          fontsize=16, fontweight='bold', pad=20)
97 plt.ylabel(ylabel: f'Superficie (hectáreas)', fontsize=12)
98 plt.xlabel(xlabel: 'Año', fontsize=12)
99 plt.legend(loc='upper left')
100 plt.grid(visible: True, alpha=0.3)
101
102 # Formatear eje Y
103 plt.gca().yaxis.set_major_formatter(plt.FuncFormatter(lambda x, p: f'{x + base_line_optima:,.0f}'))
104 plt.tight_layout()
105 plt.show()
106
107 ##END
108
109 # --- 4. REGRESIÓN LINEAL (preparacion de datos)---
110 # Preparar datos para regresión (evitar warnings)
111 X = df['Year'].values.reshape(-1, 1)
112 y_naturales = df['Naturales'].values
113 y_humanos = df['Antropogenicos'].values
114
115 # Modelos de regresión
116 modelo_naturales = LinearRegression()
117 modelo_humanos = LinearRegression()
118

```

```

119 modelo_naturales.fit(X, y_naturales)
120 modelo_humanos.fit(X, y_humanos)
121
122 prediccion_naturales = modelo_naturales.predict(X)
123 prediccion_humanos = modelo_humanos.predict(X)
124
125 # --- . GRÁFICO 3: GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL (Subplots) ---
126
127 # Gráficos de regresión
128 fig, (ax1, ax2) = plt.subplots( nrows= 1, ncols= 2, figsize=(20, 8))
129
130 # Sub Gráfico 1: Espacios Naturales
131 ax1.scatter(df['Year'], y_naturales, label='Datos observados', color='#2E8B57', alpha=0.7, s=60)
132 ax1.plot(df['Year'], prediccion_naturales, color='darkgreen', linewidth=4, label='Tendencia lineal')
133 ax1.set_title('REGRESIÓN LINEAL: Espacios Naturales\n(1985-2023)', fontsize=16, fontweight='bold', pad=15)
134 ax1.set_xlabel('Año', fontsize=12, fontweight='bold')
135 ax1.set_ylabel('Superficie (hectáreas)', fontsize=12, fontweight='bold')
136 ax1.legend(fontsize=11)
137 ax1.grid(True, alpha=0.3)
138
139 r2_naturales = modelo_naturales.score(X, y_naturales)
140 ecuacion_nat = f'y = {modelo_naturales.coef_[0]:.1f}x + {modelo_naturales.intercept_[0]:.0f}'
141 ax1.text(0.02, 0.98, f'R² = {r2_naturales:.3f}\n{ecuacion_nat}',
142         transform=ax1.transAxes, verticalalignment='top',
143         bbox=dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.8),
144         fontsize=10, fontfamily='monospace')
145
146 # Sub Gráfico 2: Usos Humanos
147 ax2.scatter(df['Year'], y_humanos, label='Datos observados', color='#DC143C', alpha=0.7, s=60)
148 ax2.plot(df['Year'], prediccion_humanos, color='darkred', linewidth=4, label='Tendencia lineal')
149 ax2.set_title('REGRESIÓN LINEAL: Usos Humanos\n(1985-2023)', fontsize=16, fontweight='bold', pad=15)
150 ax2.set_xlabel('Año', fontsize=12, fontweight='bold')
151 ax2.set_ylabel('Superficie (hectáreas)', fontsize=12, fontweight='bold')
152 ax2.legend(fontsize=11)
153 ax2.grid(True, alpha=0.3)

```

```

154 r2_humanos = modelo_humanos.score(X, y_humanos)
155 ecuacion_hum = f'y = {modelo_humanos.coef_[0]:.1f}x + {modelo_humanos.intercept_:0f}'
156 ax2.text(0.02, 0.98, f'R² = {r2_humanos:.3f}\n{ecuacion_hum}',
157         transform=ax2.transAxes, verticalalignment='top',
158         bbox=dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.8),
159         fontsize=10, fontfamily='monospace')
160
161 plt.tight_layout()
162 plt.show()
163
164 # --- 5. ANÁLISIS COMPLETO ---
165 print("\n" + "="*70)
166 print("📊 ANÁLISIS COMPLETO: EXPANSIÓN HUMANA vs ESPACIOS NATURALES")
167 print("="*70)
168
169 # Cálculos básicos
170 cambio_absoluto_nat = df['Naturales'].iloc[-1] - df['Naturales'].iloc[0]
171 cambio_absoluto_ant = df['Antropogenicos'].iloc[-1] - df['Antropogenicos'].iloc[0]
172 años_totales = df['Year'].iloc[-1] - df['Year'].iloc[0]
173
174 print(f"\n • PERIODO ANALIZADO: {df['Year'].iloc[0]} - {df['Year'].iloc[-1]} ({años_totales} años)")
175 print(f" • ÁREA TOTAL: {df['Total_verificado'].mean():0f} ± {variacion_total:.1f} ha")
176
177 print(f"\n 🌱 ESPACIOS NATURALES:")
178 print(f" • 1985: {df['Naturales'].iloc[0]:0f} ha ({df['%_Naturales'].iloc[0]:.1f}%)")
179 print(f" • 2023: {df['Naturales'].iloc[-1]:0f} ha ({df['%_Naturales'].iloc[-1]:.1f}%)")
180 print(f" • Cambio: {cambio_absoluto_nat:+0f} ha (Δ{cambio_nat:+.1f}%)")
181 print(f" • Tendencia: {modelo_naturales.coef_[0]:.1f} ha/año (R² = {r2_naturales:.3f})")
182
183 print(f"\n 🏡 USOS HUMANOS:")
184 print(f" • 1985: {df['Antropogenicos'].iloc[0]:0f} ha ({df['%_Antropogenicos'].iloc[0]:.1f}%)")
185 print(f" • 2023: {df['Antropogenicos'].iloc[-1]:0f} ha ({df['%_Antropogenicos'].iloc[-1]:.1f}%)")
186 print(f" • Cambio: {cambio_absoluto_ant:+0f} ha (Δ{cambio_hum:+.1f}%)")
187 print(f" • Tendencia: {modelo_humanos.coef_[0]:.1f} ha/año (R² = {r2_humanos:.3f})")
188
189 # Correlación y significancia
190 correlacion, p_valor = stats.pearsonr(df['Naturales'], df['Antropogenicos'])
191

```



```

192 print(f"\n🔍 RELACIÓN ESTADÍSTICA:")
193 print(f"    • Correlación: {correlacion:.3f}")
194 print(f"    • Valor-p: {p_valor:.6f}")
195
196
197 # Interpretación
198 if correlacion < -0.8 and p_valor < 0.05:
199     print("    ✅ FUERTE EVIDENCIA: Expansión humana REEMPLAZA directamente espacios naturales")
200 elif correlacion < -0.6 and p_valor < 0.05:
201     print("    ✅ EVIDENCIA MODERADA: Hay reemplazo significativo")
202 else:
203     print("    ⚠️ EVIDENCIA MODERADA-BAJA: Revisar otros factores")
204
205 # Proyecciones futuras (sin warnings)
206 print(f"\n📅 PROYECCIÓN (tendencia actual):")
207 future_years = np.array([2025, 2030, 2040]).reshape(-1, 1)
208 proy_nat = modelo_naturales.predict(future_years)
209 proy_hum = modelo_humanos.predict(future_years)
210
211 for i, year in enumerate([2025, 2030, 2040]):
212     print(f"    • {year}: Naturales = {proy_nat[i]:.0f} ha, Humanos = {proy_hum[i]:.0f} ha")
213
214 # Resumen ejecutivo
215 print("\n" + "="*70)
216 print("📌 RESUMEN EJECUTIVO")
217 print("="*70)
218
219 if cambio_nat < -2: # Si pérdida mayor al 2%
220     print("    ▼ CONCLUSIÓN: EXPANSIÓN HUMANA SIGNIFICATIVA")
221     print(f"    • {abs(cambio_absoluto_nat):.0f} ha de naturales perdidas")
222     print(f"    • {cambio_absoluto_ant:.0f} ha de usos humanos ganadas")
223     print(f"    • {abs(cambio_nat):.1f}% del territorio transformado")
224     print(f"    • Tasa: {abs(modelo_naturales.coef_[0]):.1f} ha/año de pérdida natural")
225 else:
226     print("    ♦ CONCLUSIÓN: CAMBIO MODERADO")
227
228 print("="*70)

```


6.Bibliografía

1. Instituto Nacional de Parques (INPARQUES). (s.f.). *Parque Nacional Waraira Repano*. [Página web]. Recuperado el 27 de septiembre de 2025, de <https://www.inparques.gob.ve/cms/main/verGaleria/82>
2. Últimas Noticias. (s.f.). *Los poblados y caseríos del Waraira Repano, los herederos*. [Artículo de prensa en línea]. Recuperado el 27 de septiembre de 2025, de <https://ultimasnoticias.com.ve/especial/los-poblados-y-caserios-del-waraira-repano-los-herederos/>
3. Proyecto MapBiomias Venezuela – Colección 2 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Venezuela, consultada el 20/septiembre/2025 a través del enlace: <https://venezuela.mapbiomas.org/>