

Desarrollo del Soil-Based Anthropogenic Environmental Pressure Index (SAEPI) y análisis de su comportamiento socioambiental mediante modelos lineales, no lineales y Random Forest

Andrés Pacheco¹

¹Estudiante de Economía USFQ, Quito, Pichincha, Ecuador,
apacheco@estud.usfq.edu.ec

17 de diciembre de 2025

Abstract

Este estudio propone y valida el *Soil-Based Anthropogenic Environmental Pressure Index* (SAEPI), un indicador cantonal de presión ambiental antrópica basado en el uso y cobertura del suelo. El índice combina normalización espacial y agregación ponderada, y se reconstruye mediante *Random Forest* para obtener una versión suavizada. Al integrarse con la pobreza por NBI (2022) y analizarse con modelos lineales, polinómicos y de *machine learning*, se evidencian relaciones no lineales y umbrales críticos identificados con árboles de decisión, consolidando al SAEPI como herramienta útil para el análisis territorial y la planificación de políticas públicas basadas en evidencia.

Keywords: Soil-Based Anthropogenic Environmental Pressure Index (SAEPI), uso del suelo, Random Forest, pobreza por Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), modelos no lineales, árboles de decisión, planificación territorial

1. Introducción

La transformación antrópica del territorio es un factor central de la degradación ambiental y de las desigualdades socioeconómicas contemporáneas. Los cambios en el uso y cobertura del suelo alteran los ecosistemas y afectan de manera heterogénea el bienestar de la población, lo que hace necesaria una medición precisa y territorialmente comparable de la presión ambiental de origen humano.

Si bien existen diversos indicadores ambientales, muchos se enfocan en dimensiones aisladas o carecen de resolución espacial adecuada para analizar su vínculo con variables socioeconómicas, particularmente en países en desarrollo. Estas limitaciones reducen su utilidad para el diagnóstico territorial y el diseño de políticas públicas.

Este trabajo propone el *Soil-Based Anthropogenic Environmental Pressure Index* (SAEPI), un índice sintético que cuantifica la presión ambiental antrópica a partir del uso y cobertura del suelo a nivel cantonal. Adicionalmente, se reconstruye el índice mediante técnicas de aprendizaje automático (*Random Forest*) para capturar relaciones no lineales e interacciones complejas entre clases de uso del suelo.

Finalmente, se analiza la relación entre el SAEPI y la pobreza por Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) para el año 2022 utilizando modelos lineales, no lineales

y métodos de *machine learning*. El estudio contribuye a la literatura al proponer un indicador replicable de presión ambiental, integrar enfoques econométricos y computacionales, y aportar evidencia relevante para el ordenamiento territorial y la formulación de políticas públicas.

2. Datos y metodología

2.1 Fuente de datos y estructura

El SAEPI se construye a partir de información cantonal de clases de uso y cobertura del suelo capturada por la organización MapBiomas (2025) desde 1985 hasta 2024. Cada observación corresponde a la superficie asociada a una clase específica en un cantón c y año t . Para facilitar el análisis multivariado, los datos fueron transformados a un formato largo cantón–clase–año, lo que permite capturar la composición relativa del uso del suelo en cada unidad territorial.

2.2 Clasificación de presión antrópica

El análisis utiliza 22 clases de uso y cobertura del suelo, identificadas mediante códigos estandarizados (ID3, ID4, ID5, ID6, ID9, ID11, ID12, ID13, ID21, ID23, ID24, ID25, ID27, ID29, ID30, ID31, ID33, ID34, ID68, ID74, ID81 e ID82), que abarcan tanto superficies intervenidas como áreas predominantemente naturales.

Para capturar la presión ambiental antrópica se definió una variable dicotómica I_i , asignando $I_i = 1$ a las clases directamente intervenidas (ID9, ID21, ID23, ID24, ID25, ID30, ID31 e ID74) y $I_i = 0$ a las restantes, consideradas naturales o de baja intervención:

$$I_i = \begin{cases} 1, & \text{si la clase } i \text{ presenta intervención antrópica,} \\ 0, & \text{si la clase } i \text{ es predominantemente natural.} \end{cases}$$

2.3 Procedimiento de cálculo y modelado

Se calculó la proporción de cada clase de uso del suelo respecto al área total:

$$P_{i,c,t} = \frac{A_{i,c,t}}{\sum_j A_{j,c,t}} \times 100. \quad (1)$$

El SAEPI observado se construyó mediante agregación aditiva de estos porcentajes con pesos dicotómicos:

$$SAEPI_{c,t} = \sum_i P_{i,c,t} \cdot I_i. \quad (2)$$

Se estimaron modelos lineales y polinómicos de segundo grado:

$$Pobreza_c = \alpha + \beta SAEPI_{ML,c} + \varepsilon_c, \quad (3)$$

$$Pobreza_c = \alpha + \beta_1 SAEPI_{ML,c} + \beta_2 SAEPI_{ML,c}^2 + \varepsilon_c. \quad (4)$$

También se aplicaron métodos no paramétricos, incluyendo árboles de decisión y Random Forest:

$$\min_{\{R_m\}} \sum_m \sum_{c \in R_m} \left(Pobreza_c - \overline{Pobreza}_{R_m} \right)^2, \quad (5)$$

$$\widehat{Pobreza}_c = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(SAEPI_{ML,c}). \quad (6)$$

Finalmente, se utilizó ARIMA(p, d, q) para la dinámica temporal:

$$\Phi(L)(1-L)^d SAEPI_t = \Theta(L)\varepsilon_t. \quad (7)$$

3. Resultados

3.1 Comportamiento espacial del SAEPI

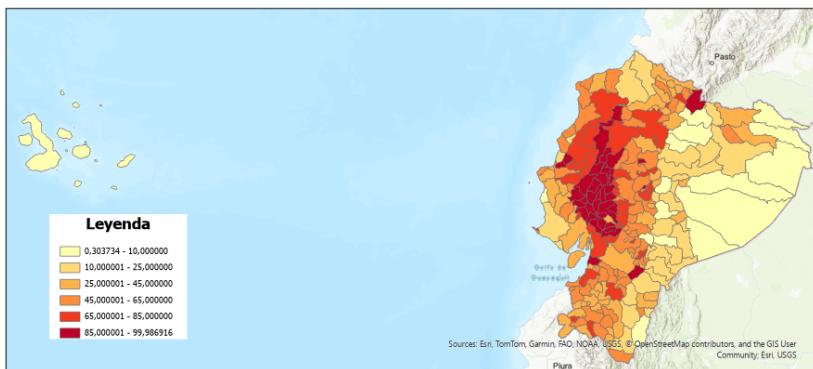


Figure 1. Mapa de calor de la presión ambiental antrópica a nivel cantonal 2024 (valores 0–100%). Tonos claros: menor intervención; tonos oscuros: mayor presión ambiental acumulada. En el story map se encuentran para los años 2000 y 2020.

3.2 Modelos lineales y no lineales

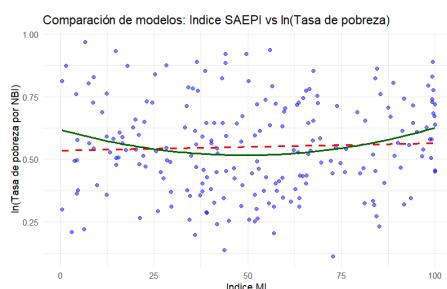


Figure 2. Comparación de modelos lineal (rojo, no significativo) y cuadrático (verde) entre SAEPI y log de pobreza por NBI.

Table 1. Resultados de modelos lineales y cuadráticos: SAEPI y log de pobreza por NBI (2022)

	Lineal	Cuadrático
Intercepto	0.535*** ($p < 0.001$)	0.618*** ($p < 0.001$)
SAEPI _{ML}	0.00029 ($p = 0.520$)	-0.00415* ($p = 0.016$)
SAEPI _{ML} ²	-	$4.22 \times 10^{-5}**$ ($p = 0.008$)
Observaciones	215	215
R ²	0.002	0.030

3.3 Árboles de decisión y Random Forest

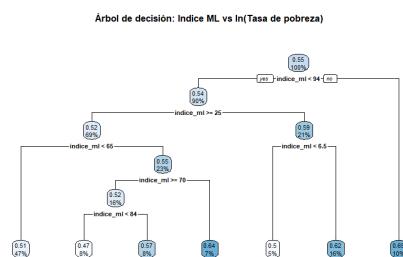


Figure 3. Árbol de decisión mostrando la relación no lineal entre SAEPI y log de pobreza por NBI.

3.4 Análisis temporal y proyecciones

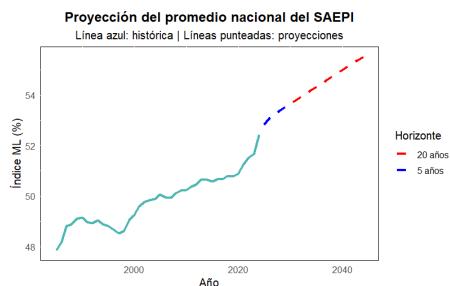


Figure 4. Evolución histórica y proyección del SAEPI (1985–2044) usando Random Forest y ARIMA.

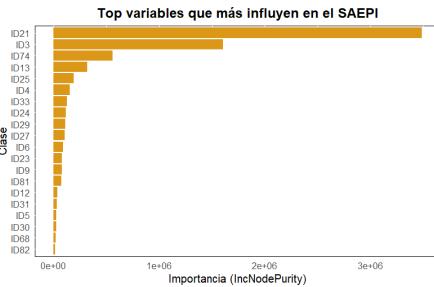


Figure 5. Importancia de variables en Random Forest (IncNodePurity). ID21 (Mosaico de agricultura y pastos) es el principal motor.

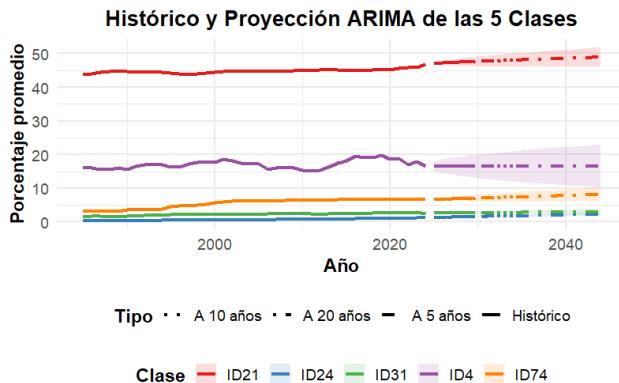


Figure 6. Proyecciones de principales clases de uso del suelo mediante ARIMA.

4. Análisis

Los resultados obtenidos permiten un análisis integral de la presión ambiental antrópica en Ecuador y su relación con la pobreza por NBI.

4.1 Patrones espaciales

El mapa de calor del SAEPI para 2024 revela heterogeneidad territorial: las regiones interandina y costera presentan los valores más altos, asociados a mayor intensidad de actividades productivas, expansión urbana y transformación del suelo. Por el contrario, los cantones amazónicos, Galápagos y zonas periféricas muestran valores bajos, reflejando predominancia de coberturas naturales. Esto indica que la presión ambiental está concentrada en áreas históricamente intervenidas y responde a procesos de ocupación territorial y desarrollo económico.

4.2 Modelos lineales y no lineales

El modelo lineal no evidencia una relación estadísticamente significativa entre SAEPI y pobreza por NBI, lo que confirma que los efectos no son monótonos ni lineales. En

contraste, la especificación cuadrática es significativa, revelando una relación convexa en forma de “U”. Este hallazgo identifica un umbral crítico ($SAEPI_{ML}^* \approx 49.17\%$) a partir del cual incrementos adicionales en la presión ambiental elevan la pobreza. Esto sugiere que una intervención inicial puede favorecer el acceso a infraestructura y servicios, mientras que una presión excesiva produce efectos negativos sobre el bienestar social.

4.3 Árboles de decisión y Random Forest

Los árboles de decisión confirman la no linealidad de la relación, mostrando rangos críticos de SAEPI donde los efectos sobre pobreza cambian abruptamente. Random Forest reduce la varianza del estimador y captura interacciones complejas entre clases de uso del suelo, destacando la importancia del mosaico de agricultura y pastos (ID21), seguido por formación forestal (ID3) y pastizales (ID74). Esto evidencia que la expansión agropecuaria y la transformación del paisaje son los principales motores de la presión ambiental.

4.4 Análisis temporal y proyecciones

La evolución histórica del promedio nacional del SAEPI muestra un patrón ascendente que refleja la ocupación y transformación del territorio ecuatoriano en las últimas tres décadas. Valores altos del índice indican mayor intervención humana sobre el suelo, permitiendo evaluar la intensidad de urbanización, expansión agrícola, infraestructura y transformación ecológica. Entre 1985 y finales de los noventa, el SAEPI se mantuvo relativamente bajo, con fluctuaciones moderadas, en un contexto de crisis financiera, quiebra bancaria y dolarización, lo que restringió la expansión territorial. Desde mediados de los años 2000, el índice crece sostenidamente, impulsado por la expansión económica, fortalecimiento estatal, planificación territorial y aumento de infraestructura urbana y rural. Hacia 2015, el crecimiento se desacelera por la caída de los precios del petróleo y eventos como el terremoto de 2016, que afectaron temporalmente la capacidad de intervención estatal. Entre 2017 y 2019, se observa un aumento moderado, mientras que la pandemia de COVID-19 en 2020 genera una pausa temporal; la reapertura y reactivación de proyectos en 2021-2022 aceleran nuevamente la presión ambiental, alcanzando cerca de 52.5 % en 2024. De acuerdo a la proyección con el modelo ARIMA, se estima que para 2044 se superará el 55% de intervención antrópica en el Ecuador.

Al analizar la importancia de las variables mediante Random Forest identifica los factores críticos detrás de la tendencia del SAEPI. La clase ID21 (Mosaico de Agricultura y Pastos) es el principal determinante, con un nivel de importancia (IncN-nodePurity) que duplica al de la siguiente categoría, indicando que la fragmentación del paisaje y la transición a sistemas agropecuarios mixtos son los principales responsables de la pérdida de coberturas naturales. Le siguen ID3 (Formación Forestal) e ID74 (Pastizal), cuya relevancia refleja que la reducción de bosques y la expansión ganadera son fuerzas motrices de la presión antrópica.

5. Discusión

Los resultados muestran una relación compleja y no lineal entre la presión ambiental antrópica y las condiciones de vida en Ecuador. El modelo cuadrático revela una relación convexa en forma de ‘U’ entre SAEPI y pobreza por Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), indicando un punto de equilibrio socioambiental donde la pobreza se minimiza. El análisis de optimización de la especificación cuadrática:

$$\frac{d(Pobreza)}{d(SAEPI_{ML})} = -0.00415 + 2(0.0000422)SAEPI_{ML} = 0 \quad (8)$$

identifica que el nivel de presión ambiental óptimo es $SAEPI_{ML}^* \approx 49.17\%$. Este umbral indica que incrementos iniciales del SAEPI reducen carencias sociales, probablemente por mayor acceso a infraestructura y mercados; sin embargo, al superar el 49.17%, los efectos se revierten. Dado que el valor nacional estimado para 2024 es 52.5% y continúa en ascenso, Ecuador opera actualmente en un régimen de rendimientos sociales decrecientes. La presión ambiental está impulsada principalmente por la expansión de mosaicos agropecuarios y pastizales, más que por urbanización eficiente, y las proyecciones ARIMA anticipan su crecimiento hasta 2044. Por ello, la reducción de la pobreza dependerá de estrategias de restauración y tecnificación del uso del suelo, en lugar de mayor explotación.

6. Conclusiones

Este estudio valida el *Soil-Based Anthropogenic Environmental Pressure Index* (SAEPI) como herramienta robusta para medir la presión ambiental antrópica en Ecuador. Los modelos económétricos cuadráticos y técnicas de aprendizaje automático muestran que la relación entre SAEPI y pobreza por NBI tiene forma de U, identificando un umbral óptimo de $SAEPI_{ML}^* \approx 49.17\%$. Dado que el índice supera este valor (52.5% en 2024) y proyecta llegar al 55.5% en 2044, la ocupación territorial actual genera rendimientos sociales decrecientes. El aumento del SAEPI se explica principalmente por la expansión agropecuaria y de pastizales, mientras que Random Forest y árboles de decisión permiten identificar discontinuidades y umbrales críticos que los modelos lineales no captan. Se concluye que las políticas de planificación deben priorizar la intensificación sostenible y la restauración en las áreas que han superado el vértice de la curva socioambiental, asegurando que la transformación territorial impulse el bienestar humano.

Referencias

- [1] MapBiomas Ecuador. (2025). *Colección 3 de la serie anual de mapas de cobertura y uso del suelo de Ecuador*. EcoCiencia; RAISG; MapBiomas Network. Recuperado de <https://plataforma.mapbiomas.org/coverage/>