

Artigo

Jesús Enrique Andrades-Grassi^{ID} · Ronald Edgardo Rangel Vasquez^{ID} · Luis Enrique Gámez^{ID} · Ledyz Cuesta Herrera^{ID} · Alicia Elena Gómez Mejías^{ID} · Hugo Alexander Torres Mantilla^{ID} · Juan Ignacio López^{ID}

Patrones de distribución de árboles en la Reserva Forestal El Dorado-Tumeremo, Bolívar-Venezuela

Recibido: 9 xaneiro 2024 / Aceptado: 9 setembro 2024
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2024

Resumen Se analizó la distribución espacial de árboles comerciales en la Reserva Forestal El Dorado-Tumeremo, estado Bolívar, Venezuela. Se planteó la hipótesis nula de Aleatoriedad Espacial Completa (CSR), aplicando métodos exploratorios espaciales sin marcas y prueba de patrones puntuales multivariantes ($\alpha = 0.05$). La distribución espacial dominante resultó ser el agregado. La función de densidad espacial aumenta bajo una estructura polinomial de segundo orden, siendo evidenciado por las funciones K y L. Además, se identificaron que las variables Suelos, Pendiente del terreno y Distancia a la Red de Drenaje, influyen sobre el proceso de ocurrencia de los árboles comerciales, las cuales fueron evaluadas bajo un concepto multivariante. Los modelos de patrones de puntos homogéneos evidenciaron ajustes pobres. Se identificó un proceso inhomogéneos de tipo Thomas que evidencia estadísticamente la ocurrencia de árboles padres e hijos que fue modelado de forma efectiva. Con ello, se recomienda modelarse el proceso de patrones de puntos inhomogéneos involucrando covariables: especie, volumen, entre otros.

Palabras claves Funciones K y L, estadística espacial, modelos homogéneos e inhomogéneos, patrones de puntos espaciales.

Distribution patterns of trees in Forest Reserve El Dorado-Tumeremo, Bolívar-Venezuela

Abstract The distribution pattern of commercial trees was analyzed in the El Dorado-Tumeremo Forest Reserve, Bolivar state, Venezuela. Null hypothesis of Complete Spatial Randomness (CSR) was proposed, applying spatial exploratory methods without marks and multivariate point pattern test ($\alpha = 0,05$). The dominant spatial distribution pattern found was the aggregate type. Spatial density function increases under a second order polynomial structure, evidenced by the K and L functions. Besides, was identified that soil mapping, slope of the terrain and distance to the drainage network that influence the occurrence process of commercial trees, which were evaluated under a multivariate concept. The homogeneous point pattern models showed poor fits, a Thomas-type inhomogeneous process that statistically evidenced the occurrence of parent and child trees was identified and modeled effectively. It is recommended to model the process of inhomogeneous point patterns with covariates: species, volume, and others.

Keywords K and L functions, spatial statistic, homogeneous and inhomogeneous models, spatial point patterns.

Jesús Enrique Andrades-Grassi · Ronald Edgardo Rangel Vasquez · Luis Enrique Gámez · Alicia Elena Gómez Mejías · Hugo Alexander Torres Mantilla · Juan Ignacio López

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
e-mail: koflasjesus@gmail.com

Ledyz Cuesta Herrera
Departamento de Matemática, Física y Estadística. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Católica del Maule, Chile.

<https://doi.org/10.15304/rr.id10129>



Introducción

Los bosques en el mundo, proveen una diversidad de servicios ambientales tales como producción de agua, absorción de dióxido de carbono (CO₂), protección de suelos y producción de alimentos. Según la FAO (Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura), ocupan 4060 millones de ha a nivel mundial, lo que representa el 31% de la superficie terrestre. De esta, la región de América Latina y el Caribe alberga el 23% distribuidos en bosques tropicales y subtropicales (FAO, 2020). Desde los años 50, la deforestación ha creado grandes perturbaciones, lo que ha conllevado a la creación de diferentes etapas en los bosques (primarios, secundarios y aprovechados). El nivel de perturbación varía en espacio

temporal, cambiando la biodiversidad; por ende, surge la imperante necesidad de periódicamente evaluar la dinámica estructural de los bosques para proponer alternativas que minimicen los impactos negativos al paisaje y a sus servicios ecosistémicos (Morrison *et al.*, 2022). Venezuela cuenta con 91,2 millones de ha en Bosques Tropicales, el 14,25% (13 millones de ha) se han venido dedicado al aprovechamiento forestal selectivo. Bajo un nivel de desconocimiento sobre la abundancia y distribución de la regeneración natural llegó a alcanzar la casi extinción de algunas especies forestales. Estos bosques, están distribuidos en las zonas bajas del norte del país sobre los 6° N, (Rangel *et al.*, 2023; Rangel *et al.*, 2022).

Conocer la estructura y distribución espacial de las masas forestales permite tomar decisiones de aprovechamiento y conservación acertadas. Las estructuras a nivel vertical dentro de un dosel siguen un patrón fisiológico dentro del cual las especies de mayor demanda a nivel lumínico se concentran en la parte superior (Oyarzún *et al.*, 2019). Para poder comprender esta distribución, se hace necesario establecer las relaciones con las variables ambientales (suelo, hidrología, pendiente del terreno, etc.) y las características propias de la especie (densidad, volumen, distribución de las especies). Este nivel de conocimiento permitirá realizar estudios detallados sobre los patrones de distribución.

Diversas técnicas de análisis estadístico tales como la función K de Ripley, patrones de puntos marcados, análisis de cuadrantes, prueba de Kolmogorov-Smirnov, mapas de distribución potencial y área bajo la curva, entre otros, han sido aplicadas para determinar el patrón de distribución espacial de los árboles (Miranda *et al.*, 2016; Moura de Mello & Alves Cantos, 2017; Vásquez-Rivas *et al.*, 2022).

En Venezuela son pocos los estudios de esta índole realizados dentro del área de estudio (Andrades *et al.*, 2021). Siendo en el área de estudio la primera vez que se determina el patrón de distribución de las especies arbóreas, buscando así obtener información confiable sobre el estado y comportamiento del bosque para poder maximizar el aprovechamiento de estas especies adecuadamente y minimizando el impacto causado durante estas actividades.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) se localiza dentro de la Reserva Forestal El Dorado-Tumeremo, municipio Sifontes, estado Bolívar, Venezuela (6°41'00" - 7°11'30" N y 61°38'00" - 31°22'30" O), con altitudes que varían entre 110 y 380 msnm. Topográficamente presenta un relieve suavemente ondulado y abundantes afloramientos de rocas con pendientes comprendidas entre 0-10%, abarcando los paisajes de Lomas - Colinas altas, Lomas - Colinas bajas, Valles Coluvio-aluviales y Peniplanicies. Los suelos están dentro de los Ultisoles, Inceptisoles y Entisoles. El área de

estudio presenta: un clima tropical lluvioso monzónico (AmVi), precipitación 1100 mm, temperatura 25 °C, evaporación 193 mm, humedad relativa 84 %. Con una superficie de 2948,10 ha; que pertenece a bosques bajos y medios de ralos a densos. A nivel hidrográfico se encuentra ubicado en la cuenca media del río Cuyuní (EMB, 2016).

Muestreo

Para evaluar, se aplicó el muestreo sistemático en donde el bosque se subdividió en seis franjas de 270,75 ha; (1000 x 2707,5 m) las cuales se subdividieron en 3 parcelas de 20 ha (1000 x 200 m) y una parcela de 10 ha (1000 x 100 m). Cada parcela se dividió en subparcelas que van desde 0,5 hasta 1 ha. Dentro de éstas se levantó la información realizando un recorrido en forma de zigzag (EMB, 2021). En cada sub-parcela se registraron las coordenadas UTM con GPS (con un margen de error de 3 m) de todos los individuos con un DAP \geq 50 cm (árboles comerciales).

Los árboles evaluados se trabajaron sin marcas (especie, DAP, volumen, alturas). Se trabajó con el sistema de referencia WGS 84 UTM Zona 20. Adicionalmente, se utilizaron variables geomorfológicas derivadas del Modelo Digital de Elevaciones generado por Andrades *et al.*, 2021. Las variables geomorfológicas involucradas fueron: la pendiente del terreno en radianes, distancia a la red de drenaje (CND), cartografía de suelos (EMB, 2021). Se evaluó el comportamiento de la densidad de los árboles comerciales ante las covariables utilizando así un concepto multivariante. En primer lugar, se procedió a graficar los árboles comerciales sobre cada covariable, evaluando si el proceso generador de los datos es estacionario por media, esto es o presentan tendencia (Baddeley, 2008). Se realizaron pruebas de análisis de cuadrantes, dividiendo el área de estudio en unidades no regulares definidas por las covariables, a excepción de la pendiente, que al ser una variable de gradiente se requirió reclasificar la variable según cuatro intervalos cuantiles. Adicionalmente, se ejecutó el Spatial Kolmogorov-Smirnov, con prueba de bondad de ajuste (proceso de puntos de Poisson (CSR)) (Baddeley *et al.*, 2005; Berman, 1986; Baddeley, 2008). También, se realizó el gráfico de Spatial Kolmogorov-Smirnov test of CSR según covariables. Por otro lado, también se estimó la función K , y el estimador no paramétrico de la intensidad relativa (Baddeley *et al.*, 2012; Baddeley *et al.*, 2005).

En cada una de las sub-parcelas (1 ha, 100m x 100m) se asumió un proceso estocástico de patrón de puntos y se aplicó la función K Ripley, análisis de cuadrantes y el test de Kolmogorov-Smirnov (Vásquez-Rivas *et al.*, 2022) con ($\alpha = 0.05$) para poder contrastar la hipótesis: H_0 : Existe una distribución aleatoria de los puntos.

En cada una de las sub-parcelas se asumió una condición de un proceso estocástico de patrón de puntos: $\{Z(s): s \in D\}$, donde $s \in D$ representa una ubicación en el espacio euclidiano d -dimensional, $Z(s)$ es una variable aleatoria en la ubicación s y s varía sobre un conjunto de índices $D \subset \mathbb{R}^d$; $Z(\cdot)$ y D son aleatorios (CSR).



Figura 1.- Ubicación Relativa Continental, Nacional, Regional del área de estudio, en la Reserva Forestal, El Dorado-Tumeremo, Bolívar-Venezuela. Fuente: Elaboración propia

Figure 1.- Relative Continental, National, Regional Location of the study area, in the Forest Reserve, El Dorado-Tumeremo, Bolívar-Venezuela. Source: self made

El proceso estocástico de patrón de puntos es un modelo matemático usado para realizar una descripción a nivel de distribución, estructura espacial de un conjunto de puntos por lo general en dos dimensiones, usado frecuentemente para la ubicación de árboles en bosques (intensidad, correlación) y su ocurrencia en el área.

La función K de Ripley de igual forma es utilizada para la descripción de un conjunto de puntos, midiendo la cantidad de elementos adicionales que están dentro de una distancia r de otro punto típico, esperando que se genere un proceso aleatorio de Poisson (CSR).

En la función Kolmogorov-Smirnov (K-S), como prueba estadística no paramétrica se compara dos distribuciones de probabilidad (empírica y teórica), determinando así si las dos muestras provienen de la misma distribución.

El análisis de cuadrantes es utilizado, para ver la variabilidad espacial en un patrón de puntos, dividiendo el

área en cuadrantes o celdas, estableciendo comparaciones si son o no aleatorios, identificando de esa forma patrones de agrupamiento o dispersión (Baddeley *et al.*, 2012; Baddeley *et al.*, 2005; Berman, 1986; Baddeley, 2008). En resumen, el proceso estocástico de patrón de puntos permite la realización de un modelo de distribución espacial para los eventos. La función K de Ripley describe los patrones espaciales, Kolmogorov-Smirnov compara las distribuciones teóricas vs observada y el análisis de cuadrantes es utilizada para ver la variabilidad espacial en un patrón de puntos.

Para el análisis se usó un modelo de regresión de intensidad logarítmica (modelo de Poisson inhomogéneo logarítmico), que dependen de las variables unidas taxonómicas del suelo (Soil), distancia a la red de drenajes (CDN), pendiente (Slope) y minería (Mining). siendo los parámetros β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 ; estimados a partir de los datos (método de máxima verosimilitud). Posteriormente,

aquellos que involucran tendencia, muestran que la matriz de Fisher produjo un proceso singular, esta matriz es una forma de medir la cantidad de información que una variable aleatoria observable X lleva sobre un parámetro desconocido θ de una distribución que modela X , por lo que cuando es singular θ no es positivo ya que la máxima verosimilitud no convergió en un punto asintótico. Seguidamente se aplicó un modelo de simulaciones Thomas, muy útil en análisis ecológicos (bosques), el cual corresponde a una técnica estadística espacial para los patrones de puntos, en donde se observan y simula distribuciones que presentan patrones de agregaciones (clustering) (Baddeley *et al.*, 2012; Baddeley *et al.*, 2005; Berman, 1986; Baddeley, 2008).

El análisis de patrones puntuales fue realizado con el software libre R (R Core Team 2023) en las librerías Rcmdr (Fox 2005, 2017; Fox & Bouchet-Valat, 2018), Maptools (Bivand *et al.*, 2013) y Spatstat (Baddeley *et al.*, 2016). Se utilizó el software Qgis (Lacaze *et al.*, 2018) para la transformación de datos espaciales (Shapefile). En primer lugar, se exploró la estructura de densidad de los árboles comerciales, definida como $\lambda = \text{número de eventos/área}$ Olaya, 2011), se estimó la prueba del vecino más cercano sugerido por (Clark & Evans, 1954) (Badii *et al.*, 2012). Posteriormente, se aplicó el análisis de cuadrantes donde $=\sqrt{2AN}$ donde: A corresponde al Área y N al número de eventos (Olaya, 2011).

Inferencia estadística de patrones puntuales homogéneos

Se partió del principio de Okham o de la parsimonia (Gujarati & Porter, 2010), que consiste en simplificar los modelos desarrollados que se ajusten al patrón de puntos evaluados. Se incluyeron covariables (la pendiente del terreno en radianes, distancia a la red de drenaje (CND), cartografía de suelos) y tendencia (proceso no estacionario), asumiendo el concepto definido por Baddeley y Turner (2000), usado para inferir estadísticamente sobre los patrones de puntos y ajustar modelos homogéneos de datos espaciales, en donde se incluyó la tendencia y dependencia de las covariables cartografía del suelo (unidades taxonómicas) y la pendiente del terreno.

Se procedió a ajustar, validar los modelos (Tabla 1), así como la normalidad de los residuales y la consecuente comprobación del Teorema del Límite Central (Gujarati & Porter, 2010), en este caso, se utilizó el gráfico Q-Q del patrón puntual de los residuos del modelo. Se utilizó la función L del modelo ajustado, con sus respectivos intervalos de confianza y se comparó con los datos observados (Baddeley *et al.*, 2015).

Resultados

De acuerdo al valor estimado de Clark & Evans (1954), el cual es menor a uno (0.73), y a la prueba Kolmogorov-Smirnov, la cual rechaza que el patrón de dispersión

espacial de los individuos es aleatorio, se determina que los individuos tienden a agruparse.

En la Figura 2, se observa que, los árboles comerciales superpuestos sobre las variables suelos y pendiente, se concentran de forma heterogénea y con densidades no constante entre e intra las clases de suelos: a) Peniplanicies (Pe) con suelos residuales, pendientes <10% y moderadamente drenados (2223 árboles en total); b) Lomas y Colinas bajas (Lo.b) con suelos residuales, pendientes < 16% y moderadamente afloramientos rocosos (1774 árboles en total); c) Valles aluviales (Va) con suelos profundos, pendientes <5% y mal drenados (117 árboles en total); d) Valles Coluvio Aluviales (Vc.a) con suelos profundos, pendientes <5% y moderadamente drenados (164 árboles en total); e) Topes de Colinas (Tp) con suelos residuales, pendientes entre 5-8% y severamente erosionados (10 árboles en total); f) Lomas y Colinas altas (Lo.a) con suelos superficiales, pendientes entre 10-30% y abundantes afloramientos rocosos (7 árboles en total); g) Planicie de desborde (PI) con suelos profundos, pendientes entre 0-3% e inundaciones estacionales (352 árboles en total).

Se evidencia que a menor pendiente la densidad disminuye, mientras que, para la distancia a la red de drenaje a medida que es mayor la densidad de árboles aumenta. Esto es validado por la prueba espacial Kolmogorov-Smirnov, (p-value <2.2e-16). Las densidades de los árboles comerciales se encuentran entre el rango de pendiente entre el 5 y 20 % y para la distancia a la red de drenaje anula la H0 de aleatoriedad espacial CSR, cuando la distancia es igual a 20, 25 y 30 m.

Los resultados de los modelos homogéneos (Tabla 1), donde se involucran las covariables (pendiente del terreno en radianes, distancia a la red de drenaje, cartografía de suelos), a pesar de ser significativo, el mismo es inconsistente y los residuales no son, ni aleatorios, ni independientes. Nótese que en el modelo $\lambda(u) = \exp(\beta_0 + \beta_1 Z(\text{Soil}) + \beta_2 Z(\text{CDN}) + \beta_3 Z(\text{Slope}) + \beta_4(\text{Mining}))$, la pendiente del terreno (Slope) no es una variable significativa, al quitar esta variable el modelo mejora substancialmente, siendo el proceso influenciado tan solo por la cartografía de suelos (Soil, unidades taxonómicas), distancia red de drenaje (CDN) y la ocurrencia de minería (Mining, en este caso el parámetro de la minería es similar al de un modelo con variables dicotómicas).

En el caso de patrones puntuales, se tuvo que re-escalar los datos (Baddeley *et al.*, 2015), por lo que requirió para un modelo de tendencia polinomial de primer orden, dividir las coordenadas Este y Norte entre 30, mientras que para un modelo de segundo orden fue entre 90000 las coordenadas Este y Norte, por tanto, se considera basado como el mejor modelo homogéneo es $\lambda(u) = \exp(x,y) 2 + \beta_1(\text{Soil}) + \beta_2(\text{CND}) + \beta_3(\text{Mining})$ evidenciando, primero un claro proceso no estacionario por media, nótese que se confirma la importancia de las variables suelo y minería, pero llama la atención la distancia red de drenaje el cual es una variable nueva en la ocurrencia de árboles pero que la misma es fácilmente derivable del Modelo Digital de Elevación, en

Modelo	Parámetro	Estimado	Estandard Err.	Intervalo de confianza 95%		CIA
				Inferior	Superior	
$\hat{\mu}(?) = \exp(\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_3(\text{Slope}) + \hat{\alpha}_4(\text{Mining}))$	Intercepto	-10.1170***	0.117972	-103.483	-988.586	99920.35
	Suelo	-0.084491***	0.006795	-0.09781	-0.07117	
	DRD	0.08214***	0.004327	0.073667	0.090627	
	PT	-0.3277	0.225204	-0.76911	0.113671	
	Minería	1.6108***	0.116349	1.382.761	1.838.842	
$\hat{\mu}(?) = \exp(\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_3(\text{Mining}))$	Intercepto	-10.1429***	0.116637	-103.716	-991.438	99920.48
	Suelo	-0.0851***	0.006785	-0.09841	-0.07181	
	DRD	0.0807***	0.004232	0.072421	0.089011	
	Minería	1.6117***	0.11635	1.383.756	1.839.838	
$\hat{\mu}(?) = \exp(\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1x + \hat{\alpha}_1y + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{Slope}) + \hat{\alpha}_3(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_4(\text{Mining}))$	Intercepto	-49.9370***	-499.371	9.768.567	-690.831	99617.67
	Suelo	-0.0776***	-0.0777	0.006748	-0.09092	
	DRD	0.0716***	0.071638	0.004392	0.06303	
	PT	-0.1076	-0.1076	0.221206	-0.54116	
	Este/30	-0.0027***	-0.00275	0.000234	-0.00321	
	Norte/30	0.0039***	0.003993	0.00032	0.003366	
	Minería	1.8163***	1.816.335	0.117	158.702	
$\hat{\mu}(?) = \exp(\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1x + \hat{\alpha}_1y + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_3(\text{Mining}))$	Intercepto	-50.4067***	9.719.566	-694.567	-313.568	99615.91
	Suelo	-0.0779***	0.006731	-0.09112	-0.06473	
	DRD	0.0711***	0.004291	0.06276	0.079582	
	Este/30	-0.0027***	0.000234	-0.00321	-0.00229	
	Norte/30	0.0040***	0.000318	0.003386	0.004632	
	Minería	1.8173***	0.116982	1.588.058	204.662	
$\hat{\mu}(?) = \exp((xy) + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{Slope}) + \hat{\alpha}_3(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_4(\text{Mining}))$	Intercepto	-74425.82***	6740.82	-87637.58	-61214.06	99422.63
	Suelo	-0.0612***	0.01	-0.08	-0.05	
	DRD	0.06279907***	0.00	0.05	0.07	
	PT	-0.2477	0.22	-0.68	0.19	
	Este/90000	3313.335***	815.27	1715.43	4911.24	
	Norte/90000	14833.91***	1303.60	12278.89	17388.92	
	(Este/90000) ²	-262.5831***	42.67	-346.21	-178.95	
	Este/90000 * Norte/90000	655.203	54.93	-42.14	173.18	
	(Este/90000) ²	-912.7261***	74.03	-1057.82	-767.63	
	Minería	1.9050***	0.12	1.67	2.14	
$\hat{\mu}(?) = \exp((xy) + \hat{\alpha}_1(\text{Soil}) + \hat{\alpha}_2(\text{CDN}) + \hat{\alpha}_3(\text{Mining}))$	Intercepto	-74497.97***	6.730.409	-87689.3	-61306.6	99421.87
	Suelo	-0.0615***	0.007456	-0.07617	-0.04694	
	DRD	0.0617***	0.004429	0.053084	0.070447	
	Este/90000	3380.078***	8.117.504	1.789.077	4971.08	
	Norte/90000	14792.3***	1.303.534	12237.42	17347.18	
	(Este/90000) ²	-264.3379***	4.260.342	-347.839	-180.837	
	Este/90000 * Norte/90000	606.485	5.467.388	-465.103	1.678.074	
	(Este/90000) ²	-908.0964***	7.401.289	-1053.16	-763.034	
Minería	1.9076***	0.117758	1.676.837	213.844		

Tabla 1.- Modelos de patrones puntuales homogéneos estimados para los árboles comerciales

Table 1.- Homogeneous point pattern models estimated for commercial trees

este caso, derivado del estudio y análisis geoestadístico del terreno realizado por (Andrades *et al.*, 2021).

Los residuos de este modelo ajustado (Figura 3), evidencian que el modelo es insuficiente y determina que en direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, los residuales presentan valores atípicos, que evidencian el mal ajuste del modelo, así como la no normalidad y una franca violación al Teorema del Límite Central (Gujarati y Porter, 2010). Adicionalmente el gráfico de Lurking, la distancia a la red de drenaje evidencia que, el número acumulado de árboles es aproximadamente igual que el número esperado según el modelo. Otra evidencia es la condición de la distancia media de los árboles comerciales 28.23 m, mientras que en el modelo con tendencia 37.56 m, siendo una subestimación

en la estimación. Adicionalmente, el gráfico de la función K residual ratifica que el proceso no es aleatorio ni independiente. Además, en esta sección se evidencia el diagrama de Steiner (Figura 3g), dentro de la cual la estimación de la distancia homogénea difiere de los datos originales, lo que permite descartar de esa forma el modelo. No obstante, dentro del análisis de tendencia de segundo orden se observa un incremento en la densidad, así como una depresión de los puntos.

El modelo Poisson ($u = ex(x, y) 2 + \beta_1 Z(\text{Soil}) + \beta_2 Z(\text{CND})$) evidenció mejor comportamiento estadístico. Los parámetros estimados para el modelo Thomas, con covariables de tendencia distancia a la red de drenaje, suelos y minería/sin covariables adicionales (parámetros no estacionarios), mostraron una densidad log-lineal.

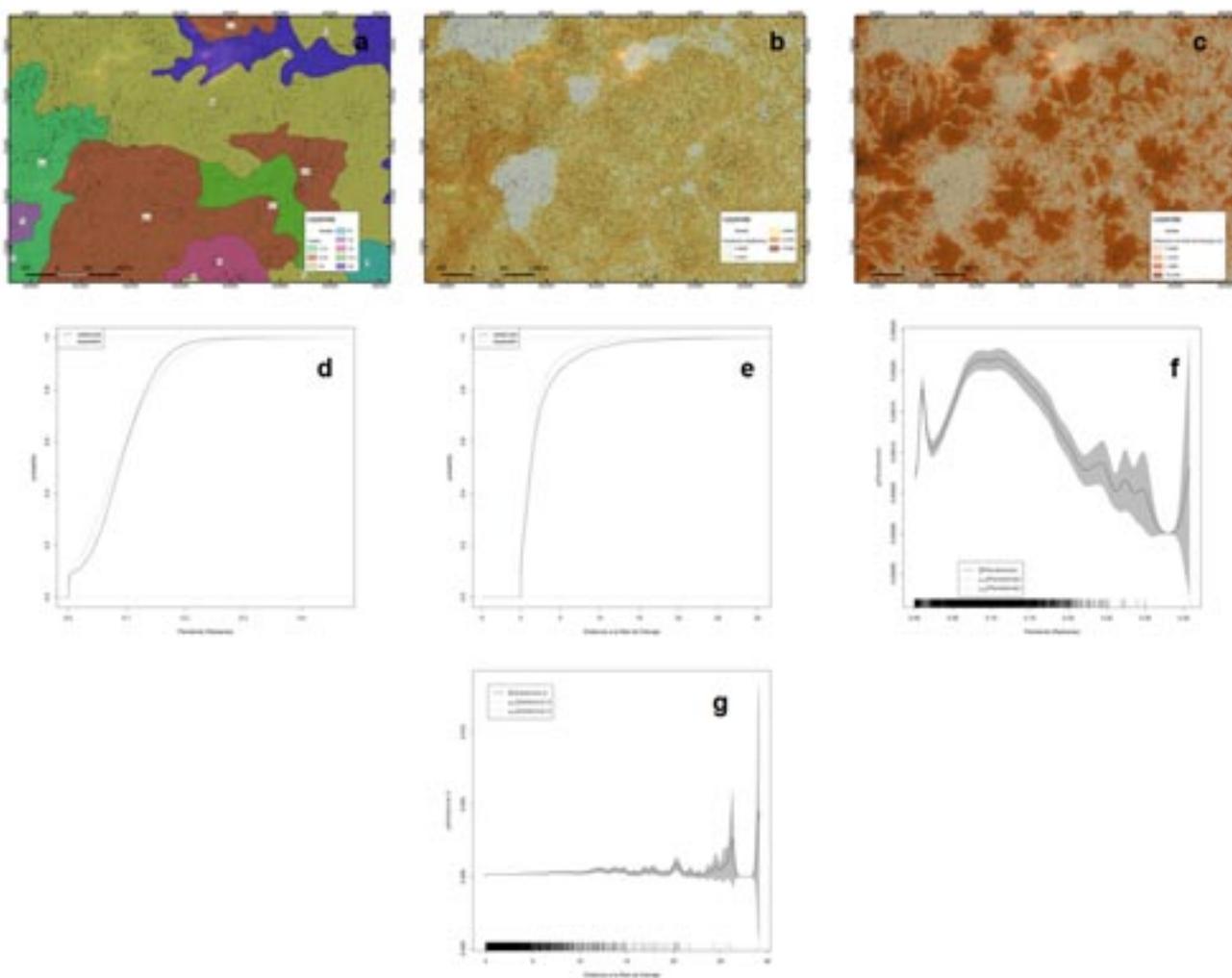


Figura 2.- Árboles comerciales superpuestos (a) Suelo; (b) Pendiente; (c) Distancia a la Red de Drenaje; (d) Gráfica del test Kolmogorov-Smirnov CSR de la pendiente; (e) Respuesta de la función $\rho(Z)$ de la pendiente; (d) Gráfica del test Kolmogorov-Smirnov CSR de la Distancia a la red de drenaje y (f) Respuesta de la función $\rho(Z)$ de la Distancia a la red de drenaje. En el compartimiento 9, de la Reserva Forestal El DoradoTumeremo, Bolívar, Venezuela

Figure 2.- Superimposed commercial trees (a) Soil; (b) Pending; (c) Distance to the Drainage Network; (d) Plot of the Kolmogorov-Smirnov CSR slope test; (e) Response of the slope function $\rho(Z)$; (d) Graph of the Kolmogorov-Smirnov CSR test of the Distance to the drainage network and (f) Response of the function $\rho(Z)$ of the Distance to the drainage network. In compartment 9, of the El DoradoTumeremo Forest Reserve, Bolívar, Venezuela

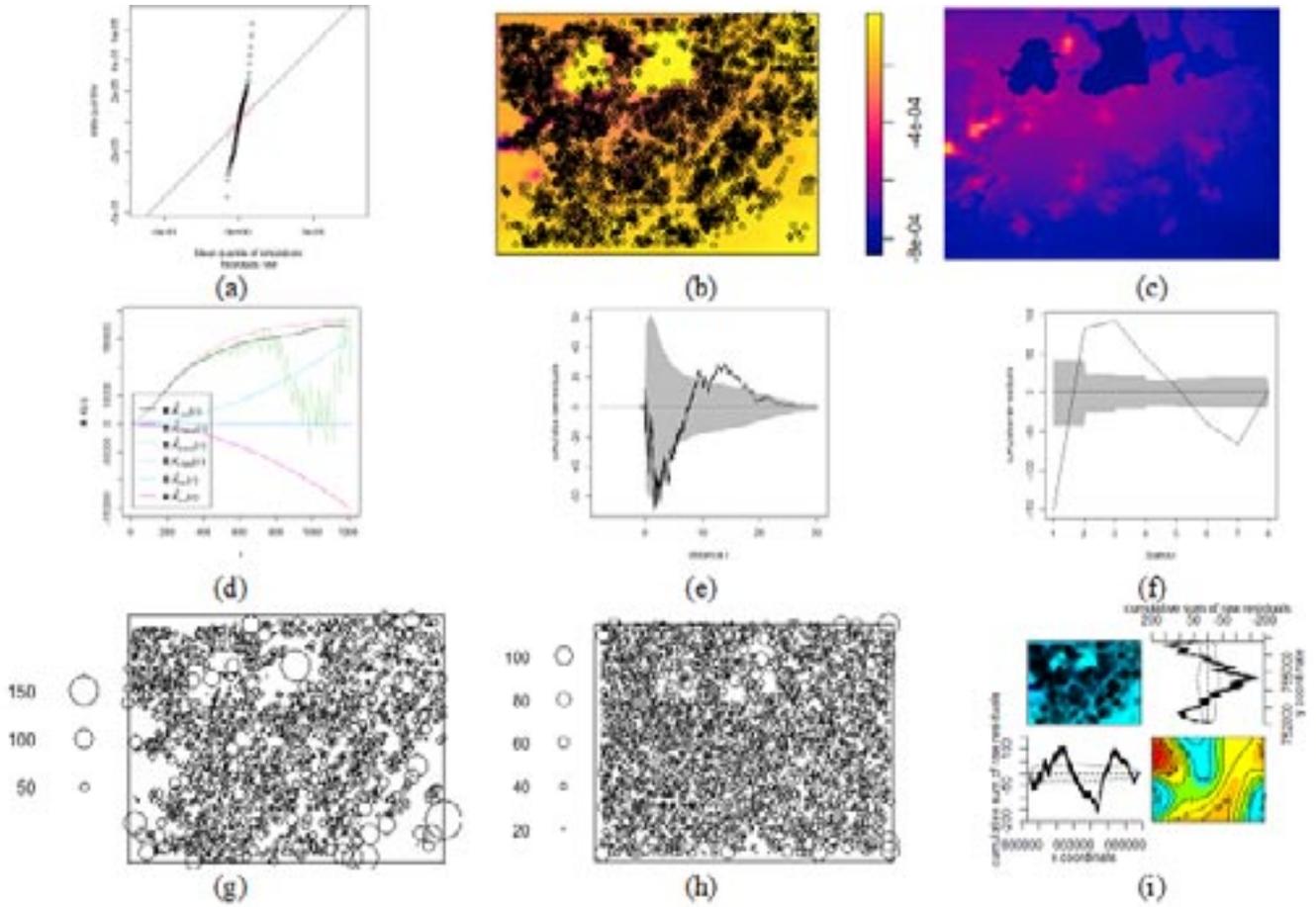


Figura 3.- Modelo $(u) = ex(x,y) 2+\beta1Z(\text{Soil}) +\beta2Z(\text{Channel Network Distance})$. (a) Gráfico Q-Q de los residuales; (b) Residuales del Modelo; (c) Predicción del modelo; (d) Función K Residual; (e) Gráfico de Lurking de la Distancia a la Red de Drenaje; (f) Gráfico de Lurking de la Cartografía del Suelo; (g) Diagrama de Steinen Arboles Comerciales; (h) Diagrama de Steinen de Predicción modelo homogéneo. (i) Gráfico de diagnóstico de cuatro paneles para el modelo uniforme ajustado

Figure 3.- Model $(u) = ex(x,y) 2+\beta1Z(\text{Soil}) +\beta2Z(\text{Channel Network Distance})$. (a) Q-Q plot of the residuals; (b) Model Residuals; (c) Model prediction; (d) Residual K Function; (e) Lurking Chart of Distance to Drainage Network; (f) Lurking Chart of Soil Mapping; (g) Diagram of Steinen Commercial Trees; (h) Steinen Diagram of Homogeneous Model Prediction. (i) Four-panel diagnostic plot for the fitted uniform model

El proceso Poisson de los árboles padres tienen una densidad de 0,000003771127 individuos/m², mientras que sus clústeres tienen una desviación estándar de 176,4807 individuos/m², lo que identifica la alta variabilidad de la densidad de la descendencia dentro del área de trabajo.

En la Figura 4, se observan las 12 simulaciones del proceso Thomas ajustado a la zona de trabajo, éste evidencia un patrón de distribución en agregados con los datos de trabajo. Nótese que, en aplicaciones, la variación aleatoria a menudo se atribuye a covariables espaciales no observada, además la variación espacial en la función de intensidad aleatoria puede hacer que los puntos sean más abundantes en algunas áreas que en otras. Este fenómeno puede hacer que el patrón de puntos parezca agrupado y que el proceso sea Poisson homogéneo.

Discusión

Dentro del área de estudio se observó una influencia espacial dominante de tipo agregado, siendo las variables espaciales suelos, pendiente del terreno y distancia a la red de drenaje, las que se relacionan sobre el proceso de ocurrencia de los árboles comerciales, evidenciando un comportamiento altamente heterogéneo propio de un bosque tropical. Algunos autores mencionan que para los bosques tropicales las tendencias suelen ser regulares e incluso llegar a agregados cuando la escala se reduce (Mauricio-Timaná, 2020; Hernández *et al.*, 2018), lo cual no se evidencia en los resultados obtenidos.

La mayor densidad de individuos se encontró cercana a Peniplanicies con suelos residuales, pendientes < 10% y

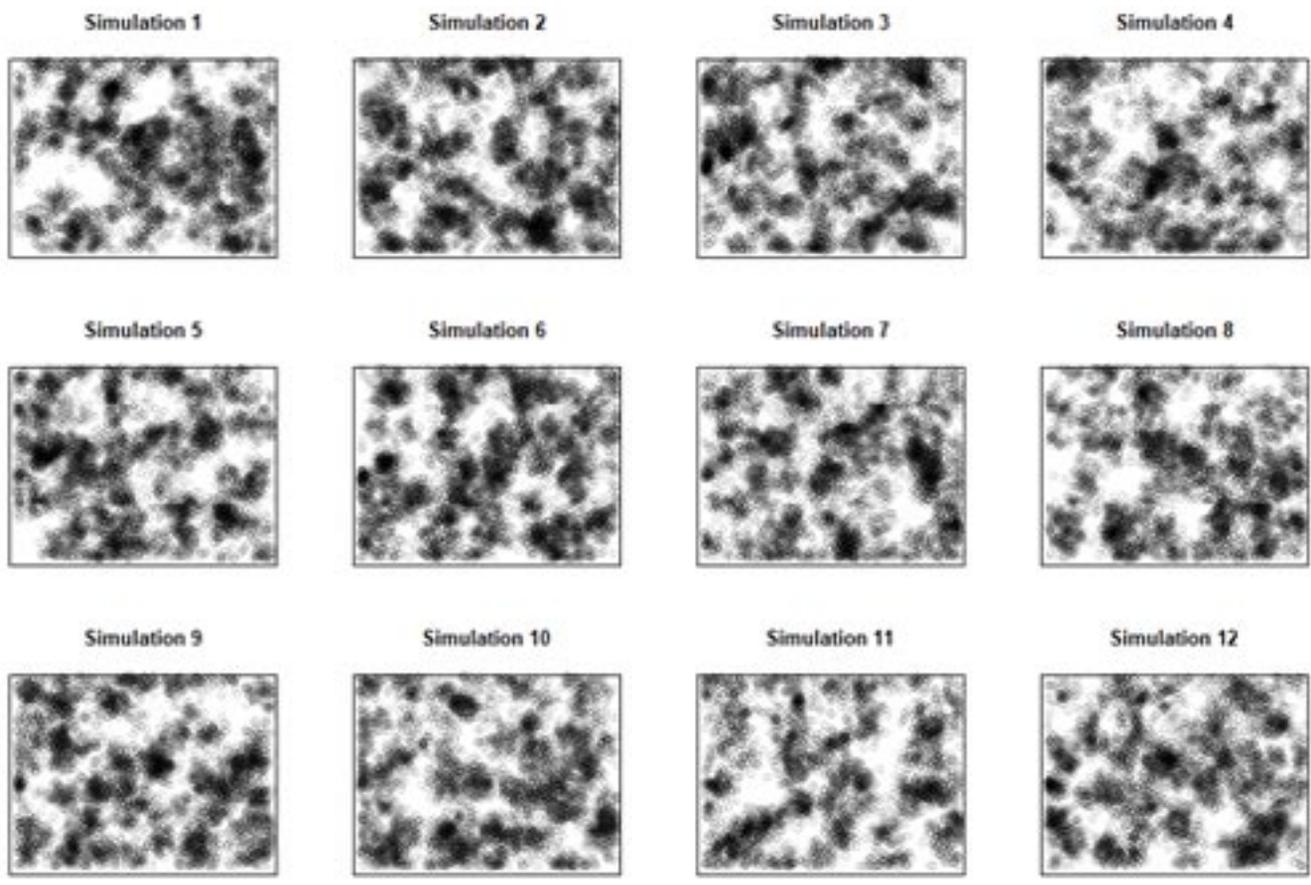


Figura 3.- Modelo $(u) = \alpha x(x,y) + \beta_1 Z(\text{Soil}) + \beta_2 Z(\text{Channel Network Distance})$. (a) Gráfico Q-Q de los residuales; (b) Residuales del Modelo; (c) Predicción del modelo; (d) Función K Residual; (e) Gráfico de Lurking de la Distancia a la Red de Drenaje; (f) Gráfico de Lurking de la Cartografía del Suelo; (g) Diagrama de Steinen Arboles Comerciales; (h) Diagrama de Steinen de Predicción modelo homogéneo. (i) Gráfico de diagnóstico de cuatro paneles para el modelo uniforme ajustado

Figure 3.- Model $(u) = \alpha x(x,y) + \beta_1 Z(\text{Soil}) + \beta_2 Z(\text{Channel Network Distance})$. (a) Q-Q plot of the residuals; (b) Model Residuals; (c) Model prediction; (d) Residual K Function; (e) Lurking Chart of Distance to Drainage Network; (f) Lurking Chart of Soil Mapping; (g) Diagram of Steinen Commercial Trees; (h) Steinen Diagram of Homogeneous Model Prediction. (i) Four-panel diagnostic plot for the fitted uniform model

moderadamente drenados (2.223 árboles) disminuyendo hasta (7 árboles) en Lomas y Colinas altas con suelos superficiales, pendientes entre 10-30% y abundantes afloramientos rocosos. Este resultado es concordante con el hecho de que la densidad de individuos puede variar en función de atributos del paisaje, disponibilidad de agua, las propiedades físicas del suelo y características topográficas entre otros factores.

Tradicionalmente, los análisis ecológicos sobre el estado de un bosque, son descritos según técnicas de estadística habituales, que no incluyen las coordenadas espaciales de la ubicación de los individuos ó la aplicación de indicadores determinísticos (IVI, IVIA, Fisher, entre otros) que también obvian el arreglo espacial. No obstante, Hernández *et al.* (2018), manifiestan que, los datos con la información espacial (coordenadas X, Y) son susceptibles para ser analizados estadísticamente, a su vez, permite identificar los mecanismos y factores que favorecen las relaciones

inter e intra específicas de los elementos arbóreas que componen un ecosistema. En este sentido, Vásquez-Rivas *et al.* (2022), indica que, el Patrón de Puntos espaciales, representa de manera estadística, los diferentes procesos ecológicos que se pueden estar desarrollando dentro de un bosque.

Conclusiones

Se puede concluir que los árboles comerciales un proceso no estacionario, inhomogéneo y de tipo clúster según el modelo de Thomas, ya que este mejoró sustancialmente la inferencia estadística. En este las variables distancia a la red de drenaje, suelos y minería tienen influencia homogénea no estacionaria. Destaca como nueva covariable la distancia a la red de drenaje la cual es fácilmente derivable de un Modelo Digital de Elevaciones.

Referencias

- Andrades-Grassi, J., Rangel, R., López-Hernández, Omaña, N., Cuesta-Herrera, L. & Gómez, A. (2021). Modelado y simulación del terreno del Compartimiento 9, en la Reserva Forestal El Dorado, Tumeremo, Bolívar-Venezuela. *Recursos Rurais*, 17, 5-15. DOI: [10.15304/rr.id7496](https://doi.org/10.15304/rr.id7496).
- Baddeley, A., Rubak, E. & Turner, R. (2016). *Spatial point patterns. Methodology and applications with R* CRC Press.
- Baddeley, A., Rubak, E., & Turner, R. (2015). *Spatial point patterns: methodology and applications with R*. CRC Press.
- Baddeley, A. & Turner, R. (2000). Practical maximum pseudo likelihood for spatial point patterns. *Australian and New Zealand Journal of Statistics* 42: 283-322.
- Badii, M., Guillen, A., Cerna, E., Landeros, J., Valenzuela, J. & Ochoa, Y. (2012). Estimación poblacional por muestreo de distancias. *Daena; International Journal of Good Conscience* 7(1): 85-96.
- Bivand, R.S., Pebesma, E.J. & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R (Vol. II)*. Springer. DOI: [10.1007/978-1-4614-7618-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4)
- Clark, P.J. & Evans, F.C. (1954). Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35: 445–453.
- EMB (2021). *Elaboración de Maderas Bosco C.A. Plan de manejo forestal UP6, El Dorado Tumeremo. Edo. Bolívar.*
- EMB (2016). *Elaboración de Maderas Bosco C.A. Plan de Corta. Lote Boscoso el Dorado Tumeremo. Edo. Bolívar.*
- FAO (2020). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Global Forest Resources Assessment: Key findings 2020*. <http://www.fao.org/3/CA8753EN/CA8753EN.pdf>.
- Fox, J. (2017). *Using the R Commander: a point-and-click interface or R*. CRC Press.
- Fox, J. (2005). The R commander: a basic statistics graphical user interface to R. *Journal of Statistical Software* 14(9): 1-42. DOI: [10.18637/jss.v014.i09](https://doi.org/10.18637/jss.v014.i09)
- Fox, J. & Bouchet-Valat, M. (2018). *Rcmdr: R Commander. R package version, 2.4.4*.
- Gujarati, D. & Porter, D. (2010). *Econometría (quinta edición)*. México: Editorial Mc. Graw Hill.
- Hernández, F., Navarro, C., Peña, R. & Nájera, A. (2018). Patrón de distribución espacial de las especies arbóreas de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 169-184. DOI: [10.29298/rmcf.v9i47.161](https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.161)
- Lacaze, B., Dudek, J. & Picard, J. (2018). Software GRASS GIS con QGIS. En N. Baghdadi, C. Lawes, M.J., Griffiths, M.E., Midgley, J.J., Boudreau, S., Ealey, H. & Chapman, C.A. (2008). Tree spacing and area of competitive influence do not scale with tree size in an African rain forest. *Journal of Vegetation Science* 19(5): 729-738. DOI: [10.3170/2008-8-18445](https://doi.org/10.3170/2008-8-18445)
- Mauricio-Timaná, C. (2020). *Uso de R para analizar la distribución espacial del bosque seco de Piura. (Tesis de grado)*. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de sistemas. Piura. Perú.
- Miranda, A., Hernández, H., Bustamante, R., Díaz, E., González, L. & Altamirano, A. (2016). Regeneración natural y patrones de distribución espacial de palma chilena *Jubaea chilensis* (Molina) Baillon en los bosques mediterráneos de Chile central. *Gayana, Botánica*, 73(1), 54-63. DOI: [10.4067/S0717-66432016000100007](https://doi.org/10.4067/S0717-66432016000100007)
- Morrison, L., Maurent, E., Finegan, B., Delgado-Rodríguez, D., Casanoves, F & Ngo Bieng, M. (2022). Recuperación de la biodiversidad en bosques neotropicales primarios y perturbados de Costa Rica. (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 40 p. (Serie técnica. Informe técnico/CATIE, no. 437).
- Moura de Mello, L. & Alves Cantos, A. (2017). Modelo de la distribución espacial de *Quillaja brasiliensis* (A. ST-HIL. & TUL.) Mart. En el sur de Brasil y la historia de la dispersión del género *Quillaja* (Quillajaceae) en América del Sur. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural* 66(2): 297-308.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de información geográfica*. https://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG
- Oyarzún, A., Donoso, P. & Gutiérrez, A. (2019). Patrones de distribución de alturas de bosques antiguos siempre verde del centro-sur de Chile. *Bosque*, 40(3): 355-364. DOI: [10.4067/S0717-92002019000300355](https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000300355)
- R Core Team, (2023). *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rangel, R., López, J., Gómez, A. & Perdomo, L. (2023). Floristic and structural characterization of forest communities in different physiographic units, El Dorado - Tumeremo, Bolivar – Venezuela. *Recursos Rurais* 19: 55-66. DOI: [10.15304/rr.id9568](https://doi.org/10.15304/rr.id9568)
- Rangel, R., López, J., Gómez, A., Perdomo, L., Pino, M., Rojas, Y., Osorio, S., Lugo, J., Torres, Y & Salcedo, P. (2022). Efecto de dos sistemas silviculturales sobre variables de estructura del dosel y de luz dentro del bosque universitario El Caimital, Barinas – Venezuela. *Recursos Rurais*, 18: 45-57. DOI: [10.15304/rr.id8523](https://doi.org/10.15304/rr.id8523)
- Vásquez-Rivas, D.V., Andrades-Grassi, J.E., Gámez, L.E. & Rodríguez-L, G.G. (2022) Exploración y comparación de la distribución espacial de los bosques periurbanos en Mérida, Venezuela. *Colombia Forestal*, 25(1), 36-50.