

3 Materiales y métodos

3.1. Estrategia metodológica

A partir de la identificación de los parámetros físico-químicos del suelo, contenidos foliares y características morfométricas que explican en mayor medida el desarrollo de las plantaciones de *Acacia mangium* en la altillanura plana colombiana, se formuló un modelo explicativo para la producción de volumen ($m^3 ha^{-1}$) en el área de estudio. Dicho modelo fue implementado en algunas unidades cartográficas de suelo (UCS) de los departamentos Meta y Vichada, con el fin de ampliar el dominio de recomendación y establecer una base para el desarrollo de herramientas de manejo y zonificación forestal en el área de estudio. Principalmente, con el ánimo de mejorar la rentabilidad de los rodales y mantener la sostenibilidad ambiental en la región. A continuación se presenta el diagrama de la metodología general de la investigación (Figura 3-1).

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el software libre R Project [Team, 2015] [R Core Team, 2015].

3.2. Localización plantaciones forestales

Las parcelas forestales objeto de estudio están localizadas en inmediaciones de los municipios de Puerto López, Puerto Gaitán (Meta), Cumaribo, La Primavera y Puerto Carreño (Vichada) (Figura 3-2), sobre la altillanura plana en la Orinoquia colombiana, que corresponde a un área total de 60.000 *ha*.

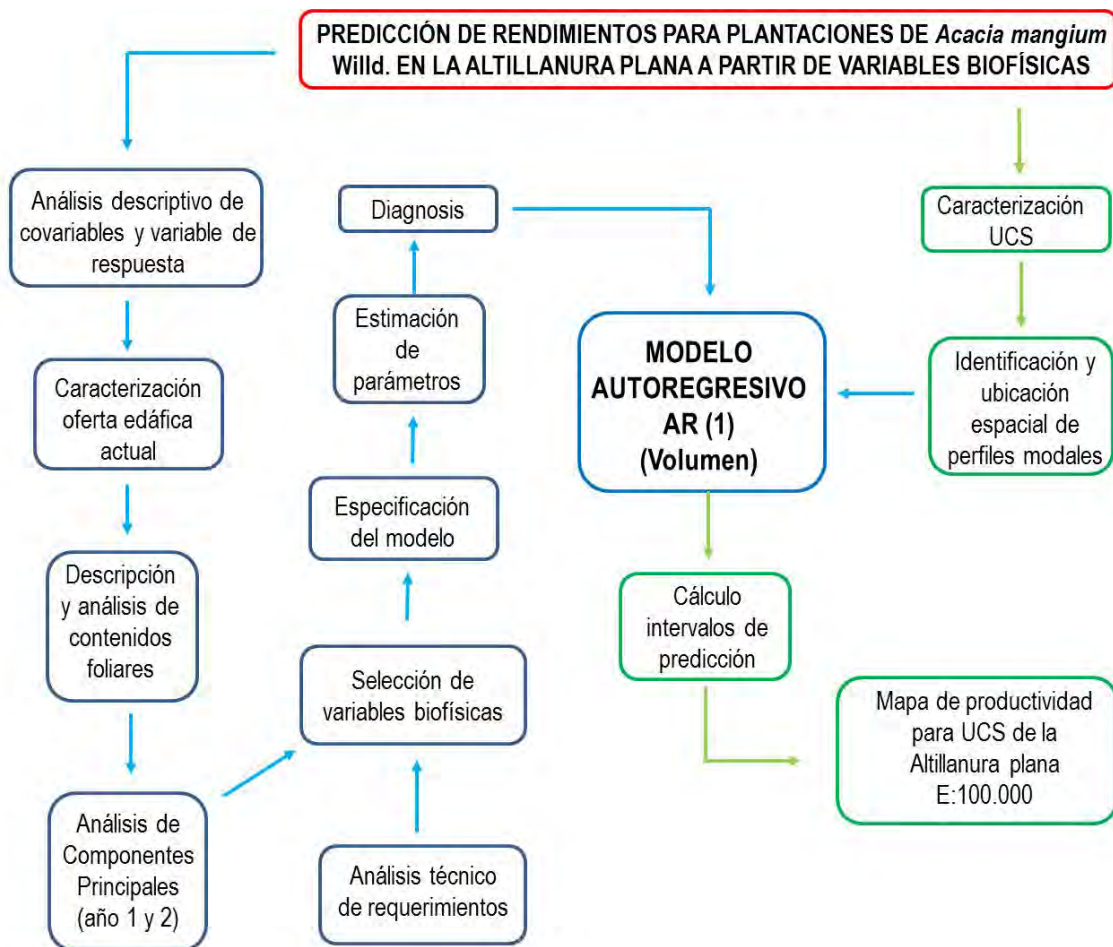


Figura 3-1: Diagrama de flujo metodología general

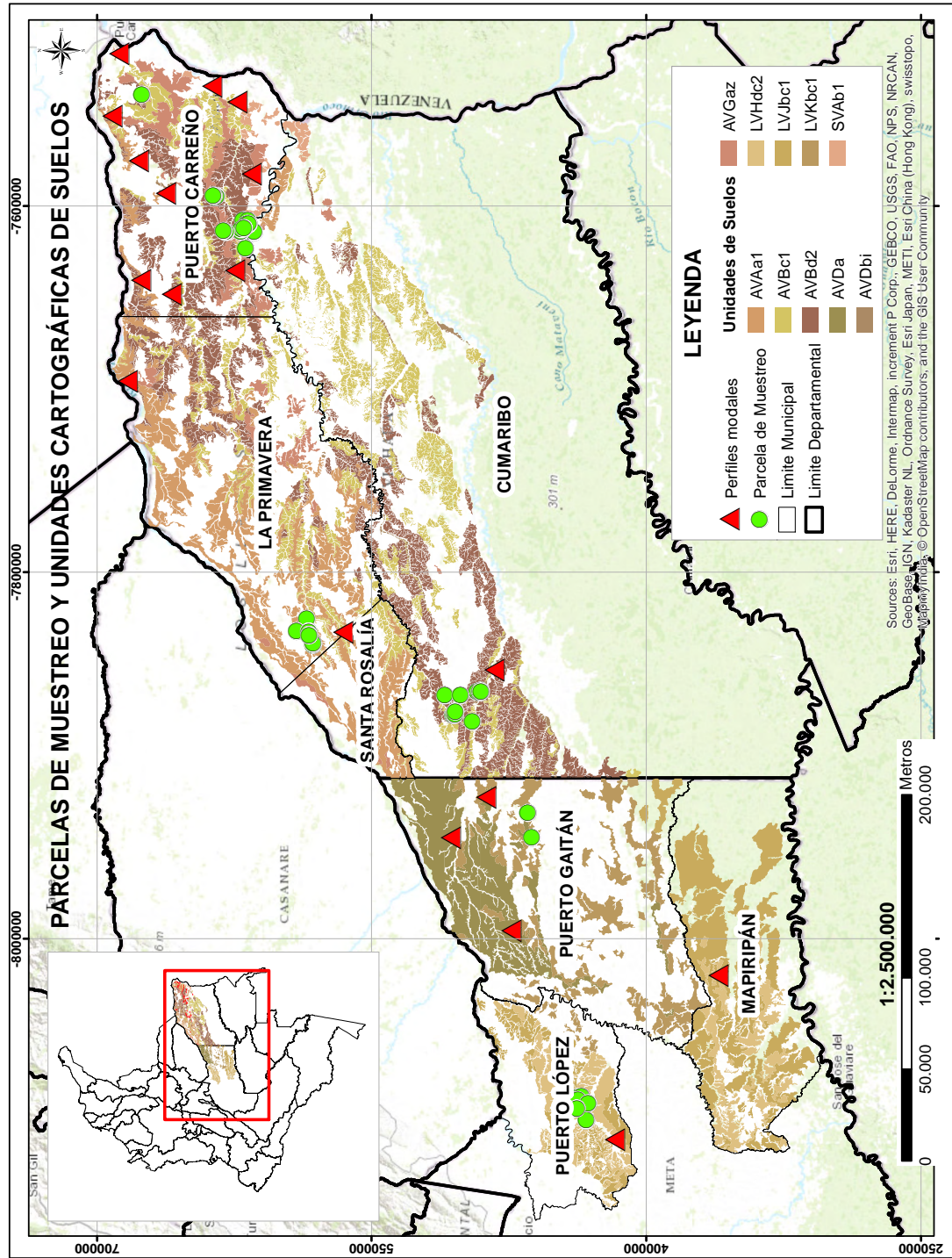


Figura 3-2: Localización general de las parcelas de muestreo y unidades cartográficas de suelos en el área de estudio.
Fuente: Adaptado de IGAC, [2004, 2014].

3.3. Métodos

Para el desarrollo de la presente investigación se partió de información ya existente, generada por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Dicha información está compuesta por análisis edáficos físico-químicos y reportes de variables dasométricas de plantaciones forestales de *A. mangium* de ochenta y una (81) parcelas, datos registrados en los años 2012 y 2013.

3.3.1. Registro de datos en parcelas de muestreo

Con el objetivo de cubrir el mayor porcentaje de área, se distribuyeron 81 parcelas permanentes de monitoreo de 500 m² en plantaciones de 1, 3 y 5 años de edad, en las cuales se realizó el muestreo edáfico químico (muestreo compuesto a 10 cm de profundidad en la gotera del árbol), muestreo edáfico físico (a 10 cm de profundidad en el centro de la parcela), muestreo foliar (compuesto en el tercio medio de la copa, rama media y hojas sanas y maduras) e inventario forestal (altura total del árbol, altura de copa y DAP-diámetro a 1,30 m del suelo). Se registró además la profundidad efectiva y la pendiente del terreno. La toma de los datos se realizó en dos ocasiones entre los meses de agosto y noviembre de los años 2012 y 2013.

3.3.2. Mapa de pendientes del terreno

Dada la extensión del área de estudio, se seleccionaron tres sectores (Municipios de Puerto López, La Primavera y Puerto Carreño) para la elaboración del mapa de pendientes. Se empleó el modelo de elevación digital de 12,5m obtenido del URSA (User Remote Sensing Acces), el cual fue procesado en el software SAGA GIS (Vr. 2.1.2), de donde se obtuvo el mapa de sombras con transparencia al 50 % y el mapa de pendientes para cada una de las subáreas establecidas, con el cual se comparó la pendiente registrada en campo de cada una de las parcelas plantadas.

3.3.3. Base de datos

Los parámetros químicos cuantificados fueron: concentración de calcio, magnesio, potasio, aluminio ($cmol_c kg^{-1}$), fósforo, azufre, hierro, cobre, manganeso, zinc, boro ($mg kg^{-1}$), carbono orgánico (%), pH, capacidad de intercambio catiónico y acidez intercambiable ($cmol_c kg^{-1}$). En cuanto a propiedades físicas se cuantificó el contenido de humedad (%) a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), densidad real y aparente ($g cm^{-3}$), porosidad total, macro, meso y microporosidad (%) y los porcentajes de las fracciones arena, limo y arcilla (textura).

En lo que respecta a contenidos foliares, se midieron macro y micronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre (%), hierro, cobre, manganeso, zinc y boro ($mgkg^{-1}$).

Las variables dasométricas registradas fueron altura total (m) y de copa (m), diámetro a 1,30 m del suelo (cm) y densidad de plantación (N de árboles por hectárea), a partir de las cuales se calculó el área basal (m^2) y volumen (m^3). Así mismo se tuvo en cuenta la preparación del terreno que cada silvicultor realiza, previo al establecimiento de los rodales, los cuales son: sin preparación, mecanización total y mecanización en franjas.

Para cada parcela de muestreo se registró además la pendiente del terreno y profundidad efectiva. Con base en la información reportada por IGAC, [2004, 2014], se definió la posición geomorfológica, tipo de relieve y unidad cartográfica de suelo, a escala 1:100.000. En la Tabla 3-2 se presenta la totalidad de variables registradas.

Tabla 3-1: Variables registradas para cada periodo de muestreo en plantaciones de *Acacia mangium*.

Tipo de parámetro	Variable
Foliar	N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn, B, S.
Químico	pH, MO, P, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe, Cu, Mn, Zn, B, S.
Físico	Arena, limo, arcilla, porosidad total, maso, meso y microporosidad, humedad a capacidad de campo (%CC) y punto de marchitez (%PMP), D. aparente, D. real.
Silvicultural (individuos)	Altura, diámetro (DAP), área basal, incremento medio anual (IMA), volumen.
Preparación del terreno	Ninguna, mecanización en franjas, mecanización total
Características del paisaje	Pendiente profundidad efectiva

3.3.4. Análisis descriptivo y exploratorio de la información

Inicialmente se partió de una base de datos compuesta por 3 años de muestreo (2012, 2013 y 2014), 81 parcelas de muestreo y un total de 60 variables así: 11 silviculturales, 2 de biología de suelos, 12 de contenidos en tejido foliar, 14 de parámetros químicos, 15 de parámetros físicos edáficos, 2 de características del paisaje y 3 del tipo de mecanización para preparación

del terreno.

Empleando el software R Project (Versión 3.2.2), la base de datos fue reducida y filtrada a través de reglas de estadística crítica, que consiste en la depuración de errores e inconsistencias, por medio de validación lógica, lo que incluyó la verificación de unidades y rangos para cada variable. Esta labor se complementó con el análisis descriptivo y exploratorio de forma multivariante, el cual permitió verificar la calidad de la base de datos e identificar parcelas atípicas. De manera univariante se identificaron valores anómalos, medios, máximos, mínimos y coeficientes de variación, adicionalmente cada una de las variables fue sometida a revisión y comparación con literatura.

3.3.5. Descripción oferta edáfica y diagnóstico nutricional

De forma paralela al análisis descriptivo y exploratorio de los datos se realizó la descripción y evaluación de la oferta edáfica de la altillanura para el establecimiento de plantaciones comerciales de *A. mangium* teniendo en cuenta sus requerimientos. Se emplearon los datos descritos en la Tabla 3-2 y los registros físico-químicos del suelo.

Tabla 3-2: Criterios generales de interpretación de análisis químicos de suelos.

INTERP.	Clima Cálido	P	S	B
	CO %	$mgkg^{-1}$		
Deficiente	<0,8	<15	<10	<0,3
Adecuado	0,8-1,5	15-30	10-20	0,3-0,6
Alto	>1,5	>30	>20	>0,6
INTERP.	Complejo de Cambio ($cmol_c kg^{-1}$)			
	Ca	Mg	K	Al
Deficiente	<3	<1,5	<0,2	
Adecuado	3-6	1,5-2,5	0,2-0,4	<1
Alto	>10	>2,5	>0,4	>1
INTERP.	Micronutrientes ($mgkg^{-1}$)			
	Fe	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<20	<1	<10	<2
Adecuado	20-100	1-3	10-20	2-4
Alto	>100	>3	>20	>4

Adaptado de: Alley y Vanlauwe, (2009); Castro y Gómez, (2012); Schoenholtz et al., (2000); IGAC (1995).

El diagnóstico nutricional de las plantaciones se realizó con base en la interpretación de los datos de la Tabla **3-3**, que corresponde a la compilación de rangos establecidos por autores como Bergmann et al., (1994), Davis et al., (2007), Drechsel y Zech, (1991), Kayahara et al., (1995), Lucas et al., (2011), Specht y Turner, (2006), para diferentes géneros de *Acacia* spp., en edades de plantación de 1,3 y 5 años. Teniendo en cuenta que existe un vacío importante en lo relacionado a criterios de definición de suficiencia con base en contenidos foliares para especies forestales [Alvarado, 2012].

Tabla **3-3**: Criterios de interpretación de contenidos foliares para *Acacia mangium* con base en materia seca.

Elemento % (p/p)	Deficiente	Adecuado
Nitrógeno (N)	<2.0	2.4-3.0
Fósforo (P)	<0.06	0.12-0.25
Potasio (K)	<0.5	0.8 - 1.3
Calcio (Ca)	<1.0	1.0 - 3.0
Magnesio (Mg)	<0.25	0.25 - 0.6
Azufre (S)	<0.05	0.1 - 0.2
Elemento (mg Kg)	Deficiente	Adecuado
Hierro (Fe)	<50	60 - 500
Cobre (Cu)	<50	60 - 500
Zinc (Zn)	<13	14 - 30
Manganeso (Mn)	<12	41 - 350
Boro (B)	<10	11 - 32

Fuente: Adaptado de Alvarado & Raigosa (2012); Bergmann et al., (1994); Davis et al., (2007); Drechsel & Zech, (1991); Kayahara et al., (1995); Lucas et al., (2011); Specht y Turner, (2006).

3.3.6. Selección de variables y formulación del modelo

Se realizó la preselección de variables con base en antecedentes reportados para la especie y un análisis de componentes principales (ACP) para cada año de muestreo. De esta manera se identificó la combinación lineal de variables que proporcionó la mayor variabilidad explicada por los componentes. De acuerdo con métodos propuestos por Jhonson & Wichern, [2008], se extrajeron en total 23 variables originales, de las 45 registradas, que fueron aquellas que presentaron las correlaciones más significativas con los componentes resultantes.

Las variables originales seleccionadas que se incluyeron en el modelado fueron transformadas y el modelo se formuló empleando valores rezagados, es decir, la diferencia matemática entre un periodo y otro. Las variables cualitativas que hacen referencia a las labores de mecanización del suelo fueron incluidas como variables indicadoras dicotómicas.

El volumen de madera (m^3ha^{-1}) registrado en el año 1 ($Vol - 1$) fue incluido como variable explicativa y el volumen del segundo periodo ($Vol - 2$) se tomó como variable de respuesta, de esta manera se formuló un modelo autoregresivo de orden $AR(1)$. Se realizaron las pruebas para validación de supuestos estadísticos así como la corrección de autocorrelación residual, que fue detectada mediante la prueba de Durbin-Watson.

3.3.7. Cálculo de intervalos de predicción

Con base en la metodología propuesta por Hahn & Meeker, [1991], Sen & Srivastava, [1990], y con el modelo obtenido se calcularon intervalos de predicción, a partir de los cuales se proyectó la producción de madera, expresada en volumen, para aquellas unidades cartográficas de suelos de la altillanura plana, que fueron muestreadas, pero aún no tienen plantaciones forestales de *A. mangium* establecidas. Una vez calculados dichos intervalos, fueron representados gráficamente en un mapa.

4 Resultados y discusión

4.1. Depuración de la base de datos

Se realizó la selección de los periodos de medición, parcelas muestreadas y variables cuantificadas, antes iniciar con el procesamiento de la información. El criterio para dicha selección fue la existencia de la totalidad de los datos, así por ejemplo, el año de muestreo 2014, fue completamente descartado dado que no contenía todas las variables ni todas las parcelas muestreadas en los años 2012 y 2013. El número de parcelas también fue reducido por la inexistencia de la medición de algunas variables. Finalmente, solo los registros de los años 2012 y 2013 fueron tenidos en cuenta, cada uno con un total 63 parcelas de muestreo y 28 variables así: 12 de contenidos foliares; 13 análisis químicos edáficos; 9 propiedades físicas edáficas; 6 variables silviculturales; 3 tipos de preparación del terreno antes del establecimiento de la plantación, pendiente de terreno y profundidad efectiva.

4.2. Análisis exploratorio y descriptivo de los datos

El análisis descriptivo multivariado, mostró que las variables no siguieron una distribución normal (Test de Mardia: Asimetría = 2704,33, $p - valor = 1,564e^{-22}$ y Kurtosis= 3,094, $p - valor = 0,0019$), por lo que para algunos procedimientos, fue necesario emplear técnicas no paramétricas.

Se realizó además el control estadístico multivariado, dada su importancia cuando las variables presumiblemente se encuentran muy correlacionadas y como estrategia para minimizar la variabilidad. Se empleó la técnica no paramétrica establecida por [Liu, 1995] Liu, [1995], denominada gráfico de comparación de rangos (*R-Chart*), basado en el concepto de profundidad de datos, empleando el paquete estadístico qcc desarrollado por Scrucca, [2004] [Scrucca, 2004].

La noción de profundidad de datos se basa en el hecho de que cualquier densidad de probabilidades distingue entre puntos “centrales” y “periféricos” [Liu, 2003]. Una función de profundidad asigna a cada observación un puntaje no negativo, el cual puede interpretarse como su localización en la nube de datos. Las profundidades más grandes corresponden al centro de la distribución, mientras que las más pequeñas corresponden a regiones externas.

Así, a partir de una noción de profundidad se obtiene un punto más profundo, que es una medida de tendencia central multivariante [Zertuche and Cantú Sifuentes, 2008](Zertuche & Cantú Sifuentes, 2008).

Los gráficos de control no paramétricos están basados en el estadístico $r_n(\cdot)$, el cual viene definido como:

$$r_n(x) = \frac{2}{k} \min(\#(x_i > x), \#(x_i < x)) + \frac{\#(x_i = x)}{k} \quad (4-1)$$

Donde $\#$ representa el número de observaciones. Este estadístico describe directamente el rango como una medida de centralidad o representatividad de una observación dentro de un conjunto de observaciones, de tal modo que la mediana, como observación más central es la más representativa [Liu and Singh, 1993] (R. Y. Liu & Singh, 1993). Este sistema de clasificación por rangos es usado para determinar si una observación es diferente del conjunto total [Scrucca, 2004] (Scrucca, 2004).

La gráfica de comparación de rangos, se obtiene de graficar las observaciones dentro de un límite de control superior (Upper Control limit, UCL) y uno inferior (Low Control Limit, LCL). Para establecer estos límites se emplea el criterio *tres-sigmas*, según el cual dichos límites se hallan a tres desviaciones estándar por encima y por debajo del valor esperado del estimador [Liu and Singh, 1993] [Loaiza Arbeláez, 2013](R. Y. Liu & Singh, 1993; Loaiza Arbeláez, 2013).

En este sentido, las observaciones que se ubiquen fuera de los límites superior y/o inferior se declararán “fuera de control“, lo que indicará que son atípicas con respecto a la nube de puntos y distribución de las demás observaciones [Scrucca, 2004].

De acuerdo con la Figura 4-1, se encontró que 8 de las 63 parcelas consideradas, se ubicaron fuera de los límites (UCL y LCL), por lo tanto se denominaron atípicas. No obstante, con el objetivo de no perder información, sólo fueron omitidas del análisis para la formulación del modelo final, (dos) 2 (P40 y P65) de las ocho (8) parcelas reportadas como atípicas. Las dos que no se que excluidas, fueron aquellas que se alejaron en mayor medida del límite superior, ya que por fuera del límite inferior, no se ubicó ninguna de las parcelas de muestreo.

La descripción estadística univariada gráfica (histogramas) y numérica para cada periodo de muestreo, se presenta en las Tablas 4-1, 4-2 y 4-5.

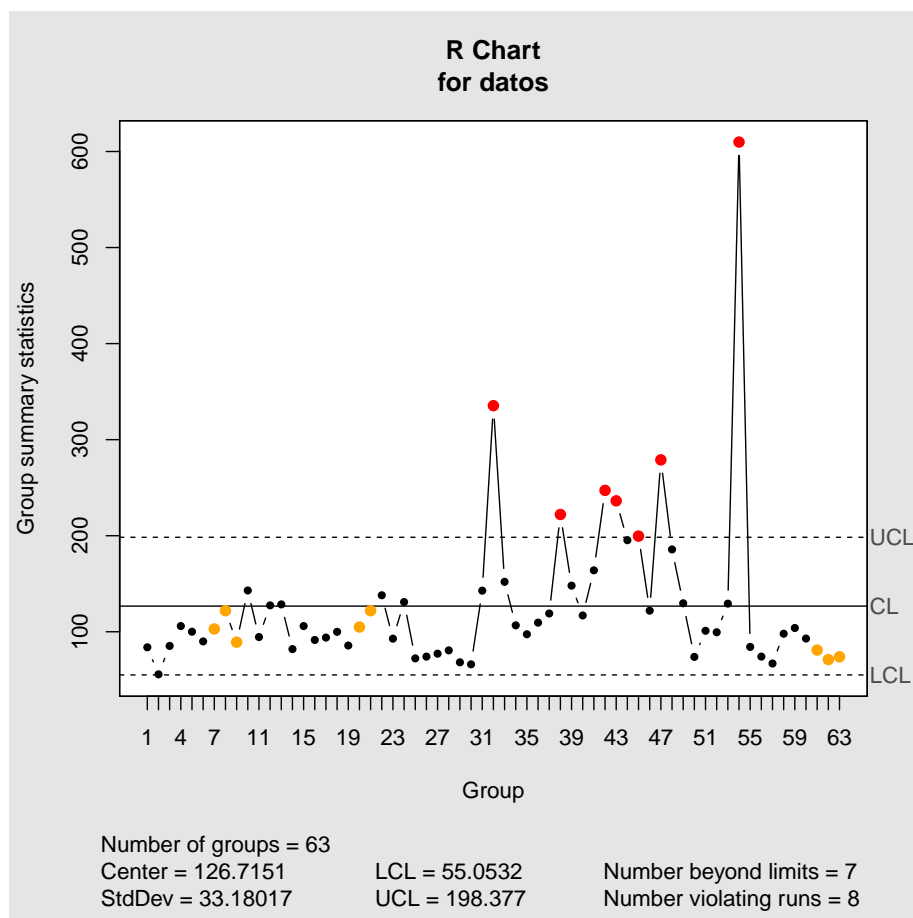


Figura 4-1: Control multivariante de clasificación por rangos para parcelas de muestreo.

4.3. Oferta edáfica de la altillanura plana para *A. mangium*

4.3.1. Parámetros químicos

Partiendo de la importancia de realizar un diagnóstico integral de la fertilidad del suelo y de los requerimientos de *A. mangium*, con base en la Tabla 3-2 se planteó un enfoque interpretativo de los datos, con el objeto de entender la dinámica del sistema y brindar herramientas para complementar el manejo de las plantaciones.

De los 13 parámetros químicos cuantificados para los suelos bajo cobertura de plantación de *A. mangium*, se encontró que el pH, fue la única variable que mostró una distribución simétrica (en forma de campana) (Ver Tabla 4-1), ausencia de valores atípicos y coeficiente de variación menor a 5 en los dos años de muestreo, lo que indica que es una variable con un comportamiento homogéneo en el área de estudio y facilitaría la planificación de las labores

de manejo.

Tabla 4-1: Descripción general y diagnóstico nutricional de variables químicas edáficas para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2).

Variable	Unid.	Moda	Promedio	Histograma		Min-Máx	Diagnóstico	
				año 1	año 2			
pH_1		5,04	4,82			4,4-5,3	Extrem. ácido	
pH_2		4,93	4,83			4,3-5,4		
CO_1	%	1,29	2,48			0,51-2,98	Adecuado	
CO_2		0,80	1,82			0,29-2,26		
P_1	$mgkg^{-1}$	1,40	2,73			0,4-15,9	Deficiente	
P_2		1,70	1,78			0,6-9,1		
S_1		2,26	3,82			1,5-15,8	Deficiente	
S_2		2,00	2,88			0,6-7,5		
Al_1	$cmol_c kg^{-1}$	0,16	0,44			0,0-1,6	Adecuado	
Al_2		0,36	0,55			0,0-2,1		
Ca_1		0,21	0,28			0,2-0,9	Deficiente	
Ca_2		0,21	0,27			0,1-0,7		
Mg_1		0,07	0,09			0,06-0,3	Deficiente	
Mg_2		0,07	0,1			0,05-0,36		
K_1		0,02	0,03			0,0-0,05	Deficiente	
K_2		0,03	0,03			0,01-0,1		
Fe_1		$mgkg^{-1}$	35,1	43,37			9,0-221,6	Adecuado
Fe_2			48,4	43,9			12,6-175,2	
Cu_1	0,24		0,25			0,08-0,7	Deficiente	
Cu_2	0,52		0,44			0,08-1,6		
Mn_1	0,40		0,57			0,1-2,4	Deficiente	
Mn_2	0,52		0,7			0,4-1,9		
Zn_1	0,12		0,26			0,08-0,7	Deficiente	
Zn_2	0,16		0,25			0,04-0,9		
B_1	0,17		0,17			0,05-0,4	Deficiente	
B_2	0,15		0,16			0,06-0,3		

Dada la asimétrica distribución de los 12 parámetros restantes (Ver Tabla 4-1), se tomó la *moda* como valor de referencia para la interpretación, puesto que fue el valor que probablemente más se aproximó al comportamiento real de la variable. En este sentido, el color del histograma hace referencia al diagnóstico de la variable en el suelo, rojo: deficiente y naranja: adecuado.

De acuerdo con los rangos establecidos para los valores de pH [Castro & Gómez, 2012; IGAC, 2014; Schoenholtz et al., 2000], la totalidad de los suelos en el área de estudio son extremadamente ácidos ($pH < 5,5$) y óptimos de acuerdo con los requerimientos edáficos de la Acacia (Tabla 2-2). No obstante, el pH por sí mismo no influye sobre las plantas en el aspecto biológico, sino que lo hace sobre la disponibilidad o fijación de algunos nutrientes requeridos por ellas [Juo, 2003].

El fósforo se encontró en cantidades deficitarias ($< 15mgkg^{-1}$), lo que es normal en los oxisoles de la altillanura, por factores de formación, sumado a que su máxima disponibilidad se da en ambientes con pH entre 6,5 y 7,5, cuando los valores están por debajo, como en los suelos de la altillanura plana, su retención se debe a la reacción con el hierro y el aluminio, que lo precipitan como fosfato de aluminio ($AlPO_4$) y de hierro ($FePO_4$) [Bohn et al., 2001].

Existe una evidente relación entre la disponibilidad general de nutrientes y el pH del suelo, éste ejerce una gran influencia sobre el equilibrio de intercambio de iones en el suelo, puesto que entre otras, afecta la mineralización de la materia orgánica y la movilización de nutrientes ([Bohn et al., 2001]; [Juo, 2003]), a pesar de la extrema acidez de estos suelos, no se encontraron en promedio, niveles excesivos de aluminio, se mantuvieron por debajo de $1cmol_c kg^{-1}$ (Tabla 4-1). No obstante, este catión es el que domina el complejo de cambio en los dos periodos de muestreo, ya que registró los mayores porcentajes de saturación (Ver Tabla 4-2).

La extrema acidez de estos suelos y las bajas concentraciones de aluminio intercambiable, se deben al proceso de acidificación natural del suelo que se da durante el proceso de pedogénesis, sumado a la hidrólisis ácida del aluminio, que constantemente acidifica el medio [Zapata, 2006]. A su vez, el hierro ejerce un efecto acidificante en el medio, mediante procesos de oxidación, cuando cambia de Fe^{+2} a Fe^{+3} . Así mismo, las raíces de las plantas fijadoras de nitrógeno liberan grandes cantidades de H^+ debido a la mayor absorción de cationes en relación con la de aniones [Mengel and Kirkby, 2000].

Tabla 4-2: Capacidad de intercambio catiónico efectiva y saturación de bases en el complejo de cambio.

	Año1	Año2
CICE ($cmol_c kg^{-1}$)	0,50	0,75
Sat.Al (%)	25,67	31,05
Sat.Ca (%)	23,04	16,71
Sat.Mg (%)	6,92	6,05
Sat.Na (%)	3,29	2,9
Sat.K (%)	1,93	1,96
S.B.Total (%)	33,4	29,2

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; Sat. (%): Porcentaje de saturación.

La diferencia en los porcentajes de saturación de un periodo a otro, se debe probablemente a la variabilidad espacial de las concentraciones de los nutrientes, es decir, a la variabilidad espacial debida al muestreo.

La sumatoria de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+), junto con la acidez intercambiable (Al^{3+} e H^+), se denomina *capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)*, propiedad que en los suelos del área de estudio se encuentra muy baja ($< 4cmol_c kg^{-1}$). Ahora bien, considerando que estos suelos son de carga variable (dependientes del pH) [Velde and Meunier, 2008], la CICE reportada, es reflejo estricto de la carga neta negativa de tipo permanente, debido a los valores de pH menores de 6 [Bohn et al., 2001], por lo tanto, son suelos considerados como muy poco fértiles. Sumado al bajo porcentaje de saturación de bases, que no supera el 35 % (Ver Tabla 4-2), en los dos periodos de muestreo, otro de los indicadores de fertilidad edáfico.

En suelos como los presentes en el área de estudio (Oxisoles y Ultisoles), es común encontrar las bases intercambiables en bajas concentraciones (Tabla 4-1), como resultado del intenso proceso de intemperismo, característico en suelos de avanzado nivel evolutivo [IGAC, 2016].

Una de las principales características de los suelos de la altillanura, son los bajos contenidos de carbono orgánico, en el área de estudio se encontraron valores cercanos a 0,8 % (bajo para clima cálido [IGAC, 2010]) a 20 cm de profundidad, valor asociado a suelos arenoso francos. Sin embargo, se encontraron igualmente valores medios (1,3 %) a 10 cm de profundidad (Tabla 4-1), probablemente al reciclaje continuo con la cobertura arbórea, sumado a la adición de restos de podas y aclareos que son dejados en el sitio para su reincorporación al suelo.

Elementos como azufre, boro, cobre y manganeso, se encuentran mayoritariamente, en concentraciones deficitarias. Valores de pH entre 5,0 y 6,5, favorecen la disponibilidad de estos elementos, (Castro & Gómez, 2012), condiciones que no se presentan en el área y por lo tanto no se favorece su disponibilidad. No obstante, los contenidos de materia orgánica reportados en el área, son una fuente, aunque insuficiente, para las plantaciones.

Por otro lado, el hierro se encuentra en promedio, en niveles ideales ($43,5 \text{ mg kg}^{-1}$), lo que es favorable por su importante papel en la agregación de las partículas y en la formación de la estructura del suelo [Pilon et al., 2009]. El pH del suelo es propicio para la disponibilidad de este elemento, sumado al potencial redox.

Así mismo, debido a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro en distintos grados de cristalización, los que controlan principalmente la solubilidad de este elemento en el suelo [IGAC, 2016], razón por la cual se encuentra de manera suficiente. Igualmente las condiciones de alta precipitación favorecen su transformación a forma reducida Fe^{2+} , forma en que es fácilmente absorbido por las plantas [Marschner's, 2011].

Uno de los factores que influye en la disponibilidad de zinc en el suelo es el contenido de arcilla, que generalmente es directamente proporcional a su concentración, ya que el zinc puede ser fijado al introducirse dentro de la estructura aluminosilicatada de la arcilla 1:1, sustituyendo isomórficamente iones de aluminio o de magnesio, por su radio iónico similar [Velde and Meunier, 2008], lo que probablemente podría explicar las concentraciones deficitarias de zinc reportadas en la zona de estudio (Ver Tabla 4-1).

Cobre edáfico y *Acacia mangium*

Micronutrientes como el cobre, parece no estar muy disponible para las plantas, debido a que está muy fuertemente unido a los puntos de intercambio de las partículas orgánicas y esta forma intercambiable no es rápidamente disponible [Marschner's, 2011]. No obstante, en la zona de estudio, estas bajas cantidades parecen ser suficientes para el desarrollo de *A. mangium*, puesto que como se verá más adelante, no se reportan deficiencias en el tejido foliar.

Se ha demostrado que aún en bajas concentraciones, el Cu es capaz de desplazar a la mayoría de los iones de los puntos de intercambio de las raíces uniéndose muy fuertemente en los espacios libres de la raíz. Desplaza especialmente al hierro de centros fisiológicamente importantes, generando algunos síntomas de clorosis. [Taiz L. & Zeiger, 2010]

Para la especie *A. mangium*, existen reportes de su eficacia como bioremediadora de suelos afectados por metales pesados. Se ha demostrado su versatilidad, al tener crecimientos

satisfactorios en suelos con concentraciones entre 70 y 400mgkg⁻¹; destaca el autor la facilidad de algunas leguminosas bioremediadoras, de absorción y acumulación de metales pesados[Maiti, 2006].

Otros autores con sus investigaciones han corroborado estos resultados y a través de fitoremediación empleando *A. mangium*, reportan la recuperación exitosa de lodos de alcantarillado contaminados con cobre [Maryam, 2015] y otros metales [Shibli Mohd; Nik Muhamad Majid; Noor Azhar; 2015]. Resaltan la efectividad de absorción, translocación y acumulación de metales como cadmio, cromo, cobre y níquel por *A. mangium*[Majid, 2012].

4.3.2. Parámetros físicos

Castro & Gómez, [2012], Fox, [2000], Rubilar et al., [2010], señalan la importancia de tener una visión holística y un diagnóstico acertado del estado nutricional de un cultivo o plantación forestal, para lo cual es necesario considerar, además de los contenidos minerales disponibles a través del análisis químico, las características físicas como drenaje, profundidad efectiva, densidad aparente, textura, que pueden repercutir de manera significativa sobre la propia disponibilidad de los nutrientes y sobre el estado del cultivo en general.

En la Tabla 4-5, se presentan algunos estadígrafos descriptivos de cada una de las variables.

El concepto de fertilidad física del suelo, se refiere a la oferta edafológica que el suelo debe brindar a las raíces de las plantas, para que éstas logren un crecimiento abundante y rápido que asegure la extracción adecuada de agua y nutrientes para que los cultivos puedan expresar su máxima capacidad genética productiva [Castro and Gómez, 2012].

Tabla 4-3: Descripción general de variables físicas edáficas para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2)

Variable	Unid.	Moda	Promedio	Histograma		Min-Max
				año 1	año 2	
Arena	%	76,9	68,43			31,5-89,5
Limo		8,00	19,53			4,0-49,46
Arcilla		9,04	11,04			4,50-23,04
Porosidad Total		38,7	44			35,5-56,5
Densidad real	gcm^{-3}	2,70	2,68			2,55-3,58
D. Ap_1		1,41	1,49			1,11-1,75
D. Ap_2		1,53	1,52			1,19-1,73
Macro_1	%	8,70	14,35			2,51-40,43
Macro_2		9,50	14,85			4,28-35,36
Meso_1		11,9	14,35			2,51-40,43
Meso_2		7,8	10,62			1,26-23,57
Micro_1		19,6	20,94			8,81-37,77
Micro_2		19,6	20,81			7,33-36,51
CC_1		17,3	23,91			12,99-43,66
CC_2		24,5	20,5			9,62-28,32
PMP_1		14,2	14,27			5,72-26,31
PMP_2		13,5	13,41			5,22-24,42

D. Ap: Densidad aparente; Macro: Macroporosidad; Meso: Mesoporosidad; Micro: Microporosidad; CC: Contenido de humedad a capacidad de campo; PMP: Contenido de humedad en punto de marchitez permanente.

La densidad de los minerales dominantes en el suelo determina la densidad real del mismo y en la mayoría de suelos minerales varía entre $2,60gcm^{-3}$ y $2,75gcm^{-3}$, el cual es el rango de densidad de los minerales más comunes tales como cuarzo, feldespatos y micas [Lal and Shukla, 2004]. Una partícula con densidad de $2,60gcm^{-3}$ es la que generalmente se asume para calcular la capa arable de un suelo mineral con materia orgánica entre el 1 y 5%

[Juo, 2003]. En el área de estudio se encontró que el valor más frecuente de densidad real fue $2,76gcm^{-3}$, característico de suelos con predominio de arenas, bajos contenidos de materia orgánica y abundantes contenidos de óxidos de hierro [Rivas et al., 2004].

La densidad aparente en la mayoría de oxisoles es baja y puede oscilar entre 1,0 y $1,3Mgm^{-3}$, dependiendo del contenido de arena [Alvarado and Forsythe, 2005]. Afirman Juo & Franzluebbers, [2003], que suelos oxisoles franco arenosos y arenosos que han sido labrados y cultivados, han registrado densidades aparentes entre 1,3 y $1,7Mgm^{-3}$. No obstante, la información de la Tabla 4-5, muestra que los valores registrados para los dos periodos de muestreo se encuentran en el límite del valor crítico, puesto que algunas parcelas presentan valores iguales o muy cercanos a $1,5gcm^{-3}$. Sin embargo, para hacer una adecuada interpretación de esta variable, es importante considerar paralelamente la clase textural [USDA, 2014], que para estos suelos, es de arenosa franca (AF) a franco arenosa (FA), dada la predominancia de arena en la fracción mineral, valores altos en la moda y el promedio (Tabla 4-5).

De acuerdo con USDA [2014], la densidad aparente varía entre 1,6 y $1,7gcm^{-3}$ para suelos arenosos francos y entre 1,5 y $1,6gcm^{-3}$ para franco arenosos. Lo que indica que las densidades aparentes reportadas por los suelos bajo cobertura de Acacia se encuentran dentro de estos rangos. No obstante, es importante considerar que los suelos de la altillanura plana tienen la particularidad de adensarse de manera natural, producto de los procesos de laterización, (migración de silicio, acumulación de Fe y Al) proceso genético-evolutivo [Rivas et al., 2004, IGAC, 1995]. Esta característica no facilita las labores de manejo, puesto que afecta la disponibilidad de nutrientes y el grado de penetración radical de las plantaciones, además de la difusión de gases en el medio edáfico, la permeabilidad y el régimen térmico, dado que afecta propiedades como la porosidad y la estructura [Lal and Shukla, 2004], [Nimmo, 2004].

Los suelos del área de estudio son principalmente franco arenosos (FA) y arenoso francos (AF). Estos suelos, no son sueltos ni friables, por lo mismo no pueden ser labrados fácilmente, a pesar de tener texturas livianas (Towhid, 2013b).

A su vez, es importante resaltar que las fracciones de arena predominantes en la altillanura plana son finas y muy finas [IGAC, 2014], [CIAT, 2000]. Razón por la cual se evidenció una proporción importante de microporos en estos suelos para los periodos de muestreo (19,6%) (Figura 4-2), datos que se traducen en bajo intercambio de aire del suelo, lo cual define el suministro de oxígeno a las raíces, el intercambio gaseoso con el medio ambiente (Towhid, 2013a), y la formación de extensos sistemas radiculares que facilitarían la absorción de nutrientes y agua (Nimmo, 2004).

Los microporos tienen un diámetro menor a $0,03mm$, permiten un muy bajo movimiento de

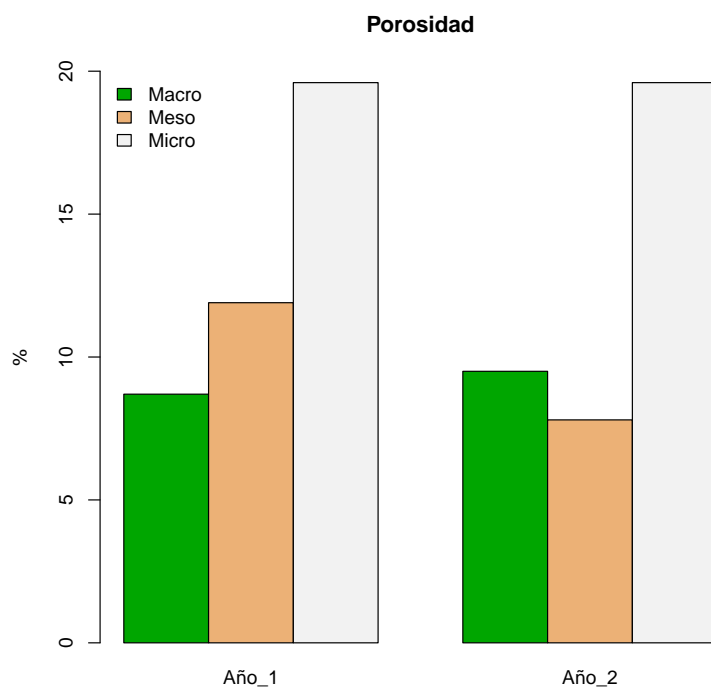


Figura 4-2: Distribución de tamaño de poro en suelos del área de estudio.

aire y agua, generando condiciones poco favorables para el crecimiento radicular y actividad microbiana (Juo & Franzluebbers, 2003). Gran parte del agua que almacenan no es disponible para las plantas [Alvarado and Forsythe, 2005]. Son poros residuales, biológicamente inactivos y los menos impactados por el manejo, aunque pueden ser estratégicamente útiles en el secuestro de carbono [Lal and Shukla, 2004].

Los mesoporos o poros de retención, se encuentran entre el 8 y 11 % de la porosidad total en el área de estudio. Éstos tiene un diámetro entre 0,075 y 0,03mm, son conocidos como poros de almacenamiento, puesto que retienen el agua realmente aprovechable para las plantas (Towhid, 2013b) que para los suelos del área de estudio oscila entre el 3 y 11 %, valores muy bajos para el adecuado suministro hídrico a las plantas [IGAC, 1995].

Asegura IGAC [1995], que suelos arenosos tendrán una retención de humedad a -1500 kPa (15 bares) (punto de marchitez permanente - PMP) entre el 2 y 10 % y suelos franco arenosos entre el 5 y 18 %, lo que efectivamente se encuentra en los suelos bajo plantación con valores de retención de humedad en el PMP del 9 % en suelos arenosos y del 17 % en franco arenosos. Es importante considerar que la estructura del suelo y la mineralogía influyen la forma y magnitud de dicha retención, un suelo bien granulado tendrá una muy buena capacidad de

retener humedad, comparado con uno cuya estructura es débil o se encuentra compactado (Towhid, 2013a).

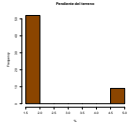
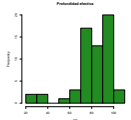
De acuerdo con Alvarado & Forsythe, (2005) en un suelo a capacidad de campo (CC), el agua está presente en los micro y mesoporos y su potencial mátrico en un rango de -10 a $-30kPa$ (0,1 a 0,3 bares de succión), de este modo, el suelo está reteniendo la máxima cantidad de agua disponible para las plantas, mientras provee suficientes espacios porosos llenos de aire para la actividad microbiana aerobia y el crecimiento de la mayoría de las plantas. Sin embargo, esta condición no es la que predomina en los suelos del área de estudio, puesto que los porcentajes de humedad reportados a capacidad de campo, se encuentran muy cerca del límite inferior que la literatura reporta favorable para el adecuado desarrollo de la vegetación (Tabla 4-5 y Tabla ??).

Por otro lado, los contenidos de humedad registrados en el PMP (año 1: 14,2% y año 2: 13,5%), nunca deben ser alcanzados, debido a que en ellos la planta sufrirá un desequilibrio fisiológico y bajará su rendimiento, de acuerdo con Lal & Shukla, (2004), su determinación es usada como criterio general para calcular el rango aprovechable de humedad por el cultivo o para la determinación de la lámina de riego.

4.3.3. Características biofísicas

Las variables del paisaje tenidas en cuenta en el análisis fueron la pendiente del terreno (%) y la profundidad efectiva (cm).

Tabla 4-4: Descripción general de variables del paisaje para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2)

Variable	Unid.	Moda	Promedio	Histograma		Min-Max
				año 1	año 2	
Pendiente	%	3	5			1 - 12
Profundidad Efectiva	cm	80	83,7			25 - 110

De acuerdo con los rangos establecidos por IGAC, [2014], la mayoría de las plantaciones se encuentran establecidas sobre suelos moderadamente profundos (75 – 100cm), siendo el valor más frecuente 80cm, condición favorable para el desarrollo de Acacia. Los principales limitantes de la profundidad efectiva encontrados en los rodales muestreados fueron: presencia

de plintita, cambios texturales abruptos (capas muy arenosas que no permitían extraer la muestra edáfica con el barreno) y en algunas pocas ocasiones mal drenaje (suelos encharcados).

Por otro lado, la totalidad de las plantaciones de Acacia se encuentran establecidas sobre pendientes menores al 12 % (Tabla**4-4**) y de acuerdo con la clasificación IGAC [2004, 2014], corresponde a relieves planos (0 - 3%), ligeramente planos (1 - 3%), ligeramente inclinados (3 - 7%) y moderadamente inclinados (7 - 12 %).

En las Figuras **4-3**, **4-4** y **4-5** se presenta el mapa de pendientes obtenido para cada una de las zonas establecidas y con los cuales se verificó la pendiente para 28 de las 63 parcelas estudiadas.

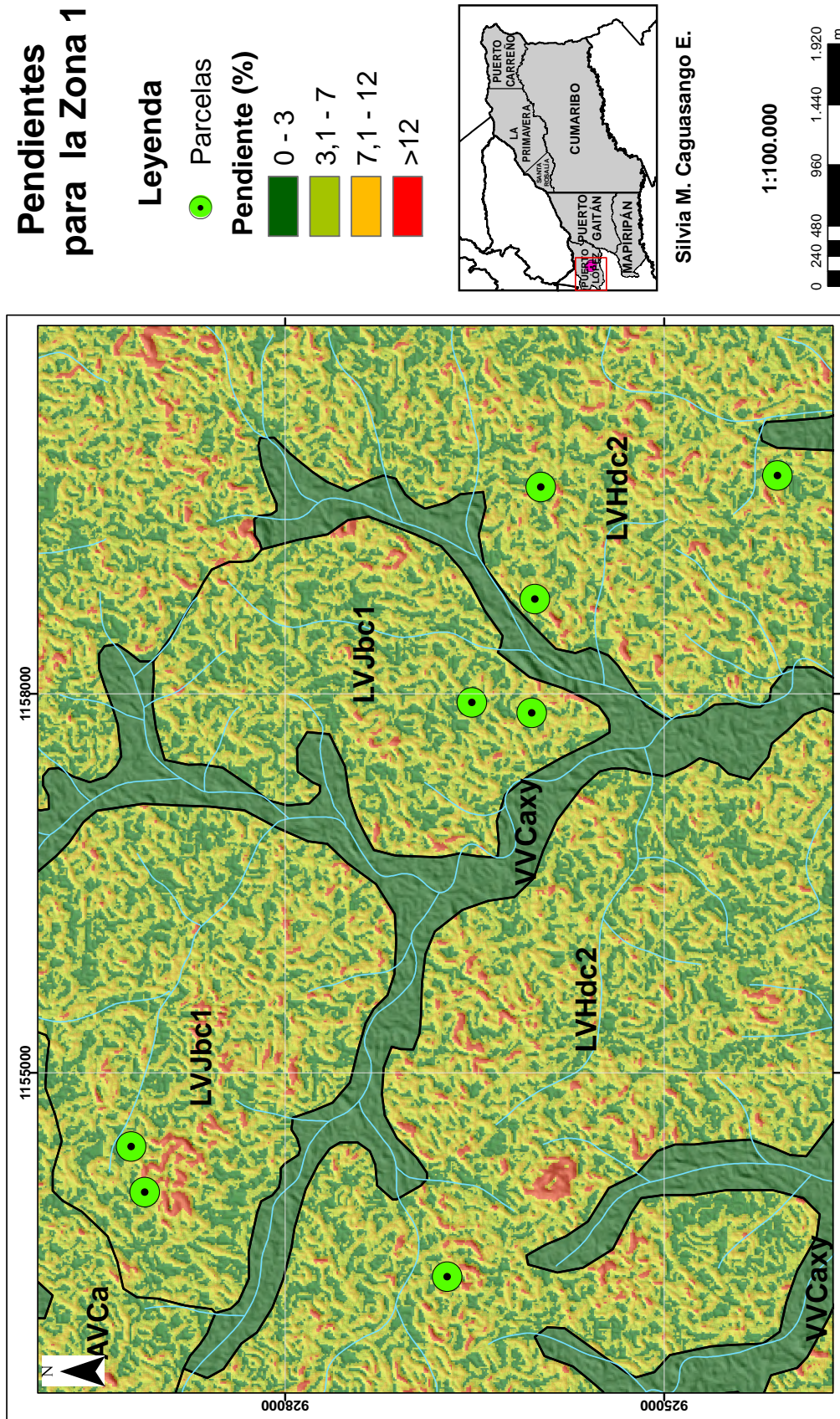


Figura 4-3: Mapa de pendientes para Zona 1

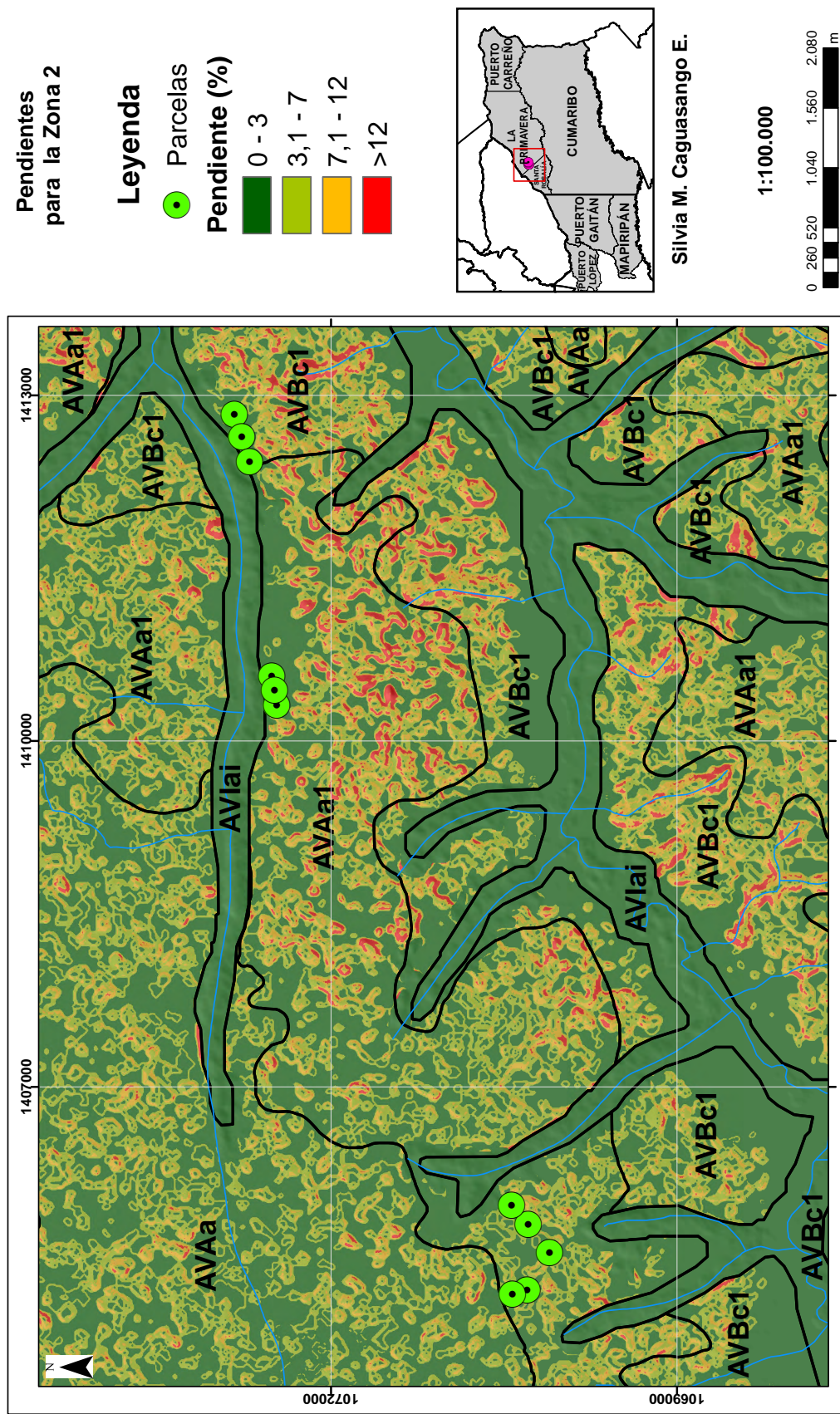


Figura 4-4: Mapa de pendientes para Zona 2

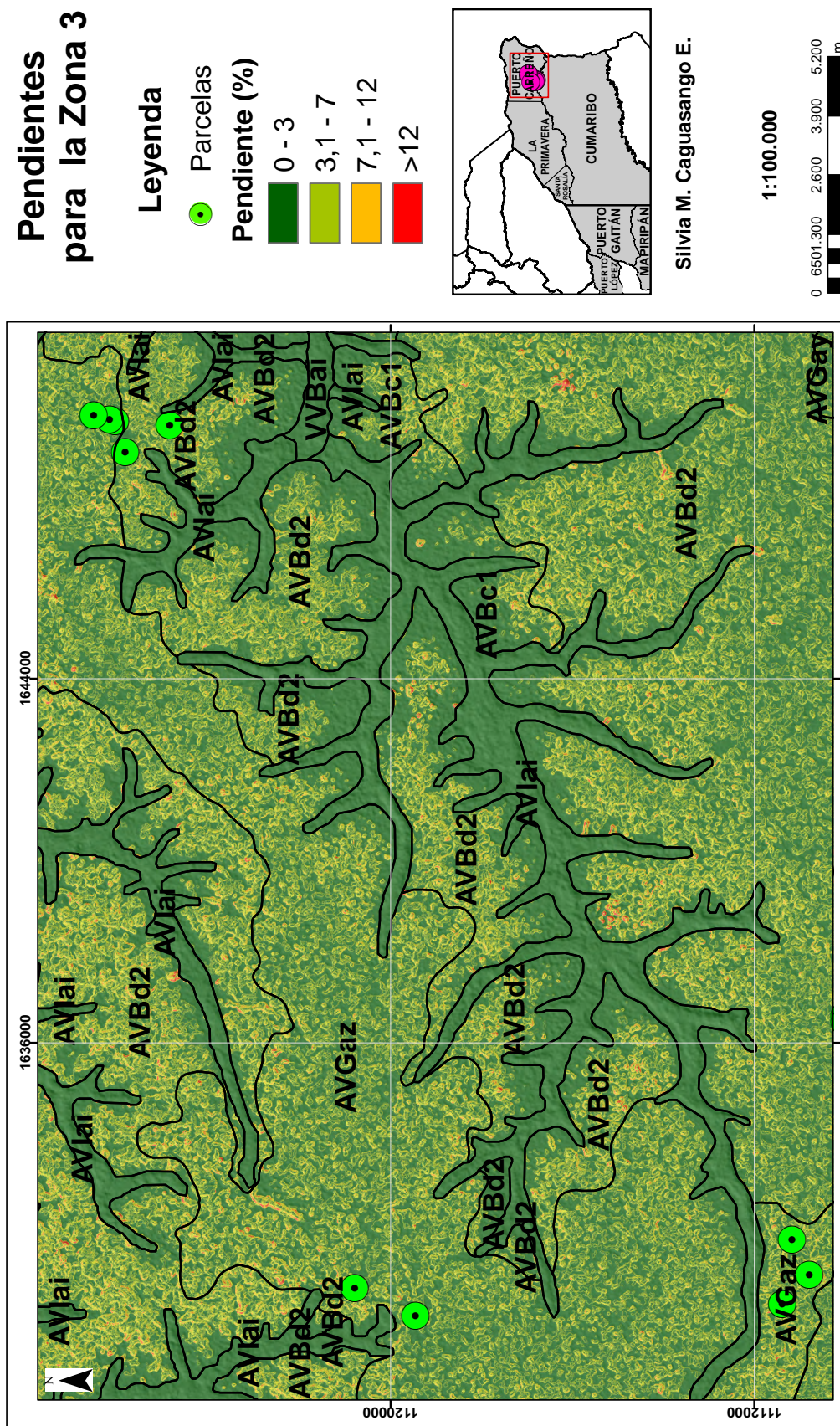


Figura 4-5: Mapa de pendientes para Zona 2

En general, los suelos del área de estudio presentan características y propiedades físico - químicas que se ajustan a los requerimientos de *Acacia mangium*, entre ellas su acidez y profundidad. Sin embargo, la baja fertilidad, el adensamiento natural, la baja retención de humedad y los periodos prolongados de sequía, hacen necesaria la implementación de labores de manejo para hacer de la especie un cultivo rentable y sostenible.

4.3.4. Diagnóstico nutricional - contenidos foliares

La interpretación de los datos se realizó de acuerdo con la Tabla **3-3**, que corresponde a la compilación de rangos establecidos por autores como Alvarado & Raigosa, [2012], Bergmann et al., [1994], Davis et al., [2007], Drechsel y Zech, [1991], Kayahara et al., [1995], Lucas et al., [2011], para diferentes géneros de *Acacia* spp., teniendo en cuenta que existe un vacío importante en lo relacionado a criterios de definición de suficiencia con base en contenidos foliares para especies forestales.

De acuerdo con los histogramas y estadígrafos descriptivos presentados en la Tabla **4-5**, se observa que los contenidos foliares de nitrógeno en los dos periodos muestran una distribución ligeramente simétrica. La mayor concentración de valores para ambos periodos se da principalmente entre el 2 y 3 %. Se identifica en el primer periodo una distribución leptocúrtica, consecuencia de una curtosis elevada, ($k = 8,51$), que es indicio de la presencia de valores atípicos que efectivamente se encontraron ($< 1,45\%$ y $> 3,42\%$). La distribución de este nutriente para el año 2 es bastante más homogénea con un coeficiente de variación (CV) de 16.63 %, mucho menor a la del año 1 (CV %=27.73).

El comportamiento mencionado del nitrógeno y la suficiencia del mismo, es el típico de una leguminosa [Alvarado, 2012]. El límite inferior de este nutriente es de 2 % y para los dos periodos de muestreo, la mayor concentración de valores se da principalmente por encima de este valor, con una moda y promedio de 2,45 % y 2,56 % respectivamente, para cada año de muestreo.

Los contenidos de fósforo (P), para el primer periodo de muestreo (0.05 %) se presentan deficitarios, de acuerdo con los valores reportados para especies del género *Acacia* sp., concentraciones por debajo de 0.06 % son consideradas insuficientes, [Drechsel and Zech, 1991]. Al igual que los elementos Ca y Mg, se encuentran deficientes en el tejido foliar, probablemente a causa de la baja disponibilidad en el suelo.

El comportamiento de los micronutrientes, hierro (Fe) y manganeso (Mn), para los dos periodos, es marcadamente asimétrico a la derecha, lo que indica una importante concentración de parcelas con los menores valores y la presencia de valores atípicos y anómalos, en las

mayores y excesivas concentraciones. Este comportamiento es probablemente debido a las condiciones edáficas que favorecen la presencia de estos elementos en forma reducida, que es la asimilable por la planta [Marschner's, 2011].

Las concentraciones de cobre (Cu), por el contrario, son constantes y adecuadas en toda la zona de estudio, por lo cual su histograma tiene forma simétrica, indicando la ausencia de valores atípicos. La suficiencia de este microelemento, garantiza la eficiencia en procesos respiratorios de la planta, dado su protagonismo en la composición de diversas moléculas [Mengel and Kirkby, 2000].

Tabla 4-5: Descripción general y diagnóstico nutricional de concentraciones foliares de *A. mangium* en dos periodos de muestreo (año 1 y año 2)

Variable	Unid.	Moda	Promedio	Histograma		Mín-Máx	Diagnóstico	
				año1	año2			
N_1	%	2,4	2,45			0,47-5,45	Adecuado	
N_2		2,6	2,56			1,72-3,6		
P_1		0,05	0,07			0,03-0,17	Deficiente/ Adecuado	
P_2		0,1	0,09			0,05-0,16		
K_1		0,56	0,67			0,32-1,42	Adecuado	
K_2		0,64	0,59			0,29-0,98		
Ca_1		0,8	0,75			0,18-2,21	Deficiente	
Ca_2		0,5	0,53			0,11-1,22		
Mg_1		0,22	0,23			0,11-0,44	Deficiente	
Mg_2		0,15	0,18			0,07-0,34		
S_1		0,11	0,1			0,03-0,45	Adecuado	
S_2		0,08	0,52			0,04-2,97		
Fe_1		$mg * kg^{-1}$	228,0	158,79			36-480	Adecuado
Fe_2			54,0	251,7			33-891	
Cu_1	9,0		9,0			2,0-17,0	Adecuado	
Cu_2	12,0		12,83			7,0-20,0		
Mn_1	72,0		124,7			43,0-395,0	Adecuado	
Mn_2	89,0		142			24,0-684,0		
Zn_1	17,0		24,3			6,0-82,0	Adecuado	
Zn_2	15,0		60,97			8,0-614		
B_1	20,1		20,13			0,65-71,6	Adecuado	
B_2	24,2		23,26			11,1-45,06		

De manera general se encontró que que los contenidos de Zn, B y Cu son los más bajos

de todos los elementos estudiados. A pesar de la inexistencia de información específica para *Acacia mangium*, los valores reportados por las plantaciones objeto de estudio se encuentran en el rango medio de la mayoría de especies tropicales.

La variación de las concentraciones foliares de micronutrientes presenta un coeficiente de variación muy alto por lo que la correlación con los parámetros de crecimiento puede ser real o “casualística”. Además, el hecho de que un elemento afecte significativamente alguna o varias de las variables de crecimiento (ley del Mínimo de von Liebig) es proporcional a que éste sea deficiente o tóxico (cosa que no parece presentarse en el área de estudio) [Alvarado, A., comunicación personal, enero 18 de 2017].

Acumulación de metales pesados por *A. mangium*

Ahora bien, es importante mencionar la capacidad de acumulación de metales pesados que ha sido demostrada por algunas leguminosas bioremediadoras, como la *Acacia mangium*, puesto que el metal que más frecuentemente se acumula en el tejido foliar es el Zn.

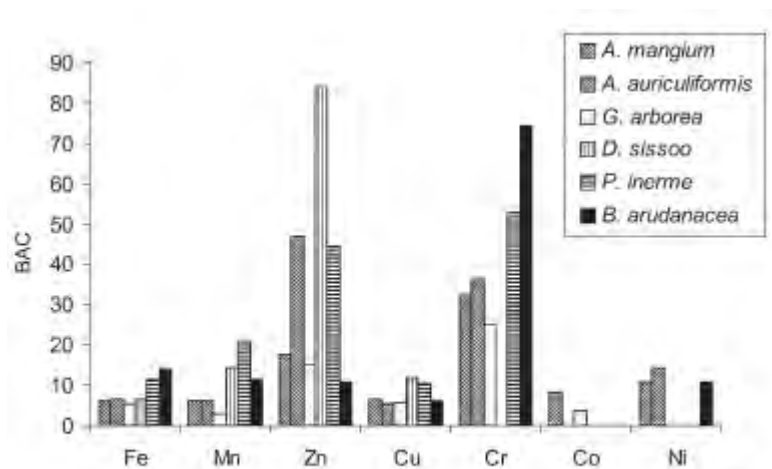


Figure 4. Bioaccumulation coefficients of different metals in leaves.

Figura 4-6: Coeficientes de bioacumulación de diferentes metales en hojas

Fuente: Maiti, [2006].

En la Figura 4-8, se observa que la especie *A. mangium* es la tercera más acumuladora de Zn en su tejido foliar, razón por la cual el autor resalta la afinidad de las leguminosas y de esta especie específicamente por este metal.

En otro estudio, la especie *Acacia mangium* se destacó entre otras maderables por reportar una significativa diferencia en el factor de bioacumulación de metales como el hierro, el zinc

y el níquel (Figura 4-9) [Maitia, 2015].

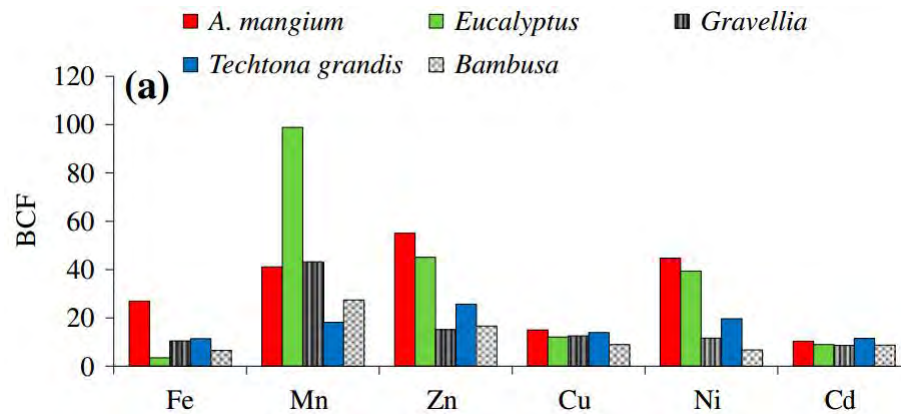


Figura 4-7: Factores de bioacumulación de metales en árboles maderables establecidos en suelos de minas de carbón en recuperación.

Fuente: Maiti et al., [2015].

4.4. Análisis de componentes principales (ACP)

Se desarrolló un algoritmo de clasificación jerárquica (ACP) para los datos, con el objetivo de reducir el número de variables e identificar aquellas que proporcionaran la mayor cantidad de información [Jhonson, 2007].

Inicialmente fue necesario agrupar las variables por año de muestreo (Año 1 y Año 2) y por su naturaleza, así: parámetros químicos, parámetros físicos y contenidos foliares. Obteniendo de esta manera 6 grupos diferentes, para cada uno de los cuales se realizó el procedimiento estadístico. En la Tabla (4-6) se presentan los componentes resultantes para los contenidos foliares de cada año de muestreo. Se observa que los 5 primeros componentes explican el 75 % y 77,5 % de variabilidad, en el año 1 y 2, respectivamente, por lo tanto, fueron los tenidos en cuenta para hacer la selección de variables.

Tabla 4-6: Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de contenidos foliares.

Componentes de contenidos foliares			
Año 1	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	2,27	20,62	20,62
Comp. 2	2,04	18,53	39,15
Comp. 3	1,63	14,78	53,93
Comp. 4	1,38	12,52	66,44
Comp. 5	0,96	8,69	75,13
Año 2	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	2,40	21,79	21,79
Comp. 2	2,22	20,15	41,94
Comp. 3	1,59	14,41	56,35
Comp. 4	1,29	11,73	68,08
Comp. 5	1,04	9,46	77,54

En en Tabla 4-7 se muestra la correlación ($r - Pearson$) de cada una de las variables originales con los componentes calculados.

Tabla 4-7: Correlación de variables foliares originales con componentes.

	Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
Año 1	K	0,56	Fe	0,69	Mg	0,59	S	0,76	P	-0,54
	Zn	0,51	P	0,51	Mn	0,53				
	Mg	0,51	Cu	0,50	Ca	0,46				
	Cu	-0,44	Zn	0,50						
	N	-0,55	B	-0,49						
	Mn	-0,60	Ca	-0,55						
Año 2	Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
	N	0,83	Fe	0,80	S	0,51	Mg	0,70	B	0,79
	P	0,69	Zn	0,69	Mg	0,48	Cu	0,55		
	K	0,66	Ca	0,68	Mn	-0,46				
	Mn	-0,67	S	-0,51	Cu	-0,69				
			K	-0,53						

En la Tabla 4-8 se presentan los componentes obtenidos para las variables químicas edáficas para cada año de muestreo. Se observa que los 5 primeros componentes explican el 74,5% y 74,4% de variabilidad, en el año 1 y 2, respectivamente, por lo tanto, fueron los tenidos en cuenta para hacer la selección de variables.

Tabla 4-8: Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de variables químicas edáficas.

Componentes de parámetros químicos edáficos			
Año 1	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	4,41	31,50	31,50
Comp. 2	2,22	15,84	47,34
Comp. 3	1,58	11,28	58,63
Comp. 4	1,22	8,69	67,31
Comp. 5	1,01	7,22	74,53
Año 2	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	3,61	25,81	25,81
Comp. 2	2,45	17,50	43,31
Comp. 3	1,74	12,41	55,72
Comp. 4	1,36	9,74	65,46
Comp. 5	1,25	8,92	74,38

En la Tabla 4-9 se muestra la correlación (r –*Pearson*) de cada una de las variables originales con los componentes calculados.

Tabla 4-9: Correlación de variables químicas edáficas originales con componentes.

	comp. 1		comp. 2		comp. 3		comp. 4		comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
Año 1	Al	0,87	Ca	0,90	P	0,75	P	0,49	S	0,59
	CO	0,82	Mg	0,89	Zn	0,62	B	-0,50	B	0,49
	Mn	0,80	pH	0,41			Na	-0,52	Fe	-0,45
	Fe	0,77								
	Cu	0,75								
	K	0,68								
Año 2	Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
	CO	0,88	pH	0,76	Cu	0,72	P	0,65	K	0,66
	Mn	0,85	Mg	0,72	Zn	0,63	S	0,47	Zn	-0,55
	Al	0,78	Ca	0,65			B	-0,45		
	Fe	0,71	Cu	-0,43						
	Ca	0,58	K	-0,52						

En la Tabla 4-10 se presentan los componentes obtenidos para los contenidos edáficos físicos para cada año de muestreo. Se observa que los 5 primeros componentes explican el 96,7% y 95,8% de variabilidad, en el año 1 y 2, respectivamente, por lo tanto, fueron los tenidos en cuenta para hacer la selección de variables.

Tabla 4-10: Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de variables químicas edáficas.

Componentes de parámetros físicos edáficos			
Año 1	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	3,60	39,97	39,97
Comp. 2	2,51	27,92	67,88
Comp. 3	1,85	20,59	88,48
Comp. 4	0,58	6,44	94,91
Comp. 5	0,17	1,85	96,76
Año 2	Valor Propio	% Varianza	% Var. Acumulada
Comp. 1	4,20	46,68	46,68
Comp. 2	2,01	22,37	69,05
Comp. 3	1,31	14,56	83,61
Comp. 4	0,80	8,91	92,52
Comp. 5	0,30	3,35	95,87

En la Tabla 4-11 se muestra la correlación ($r - Pearson$) de cada una de las variables originales con los componentes calculados.

Tabla 4-11: Correlación de variables edáficas físicas originales con componentes.

	Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
Año 1	CC	0,84	MICRO	0,81	MACRO	0,92	Ar	-0,62		
	PMP	0,71	DA	0,62	POR	0,42				
	Ar	0,69	PMP	0,6	MESO	-0,59				
	POR	0,58	POR	-0,6						
	DA	-0,6	MESO	-0,72						
	A	-0,92								
	Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r	Var.	r
Año 2	MICRO	0,94	MESO	0,79	Cu	0,72	POR	0,70	Ar	0,38
	Ar	0,85	DA	0,59	Zn	0,63	DA	0,40	A	0,37
	CC	0,81	MACRO	-0,77						
	MACRO	-0,59								
	A	-0,79								

CC: Capacidad de Campo; PMP: Punto de marchitez permanente; Ar: Arcilla; A: Arena; POR: Porosidad total; DA: Densidad aparente; MICRO: Microporosidad; MACRO: Macroporosidad.

De acuerdo con metodologías propuestas por Jhonson & Wichern, (2007), una vez se realizó el ACP para cada grupo de variables (químicas, físicas y foliares) y para cada año de muestreo, se identificó la combinación lineal de variables que proporcionó la mayor variabilidad explicada por los componentes, que en todos los casos explicaron el mayor porcentaje de variabilidad .

De esta manera, de las 45 variables registradas se extrajeron 19, que fueron aquellas que presentaron las correlaciones más significativas con los 5 primeros componentes resultantes. Los valores de correlación de las variables originales con los componentes obtenidos del análisis, se presentan en la Tabla 4-13, (6 foliares, 9 químicas y 5 físicas) seleccionadas para ser incluidas en el proceso de modelado estadístico.

Tabla 4-12: Variables originales seleccionadas del ACP.

Parámetro	$r - Pearson$	Variables seleccionadas
Foliares (6)	$r > 0,50 $	Cobre, zinc, nitrógeno, fósforo potasio, manganeso
Químicos (9)	$r > 0,67 $	Aluminio, carbono orgánico, pH, hierro, calcio, potasio, magnesio, cobre, manganeso.
Físicos (5)	$r > 0,60 $	Arena, arcilla, macroporosidad, capacidad de campo, densidad aparente

4.4.1. Selección de variables

Los suelos del área de estudio presentan algunas características y propiedades físico - químicas que se ajustan a los requerimientos adaptativos de la especie *Acacia mangium*, entre ellas su acidez y profundidad. Sin embargo, la baja fertilidad, el adensamiento natural, la escasa retención de humedad y los periodos prolongados de sequía, hacen necesaria la implementación de labores de manejo para hacer de la especie un cultivo rentable y sostenible en el tiempo.

Ahora bien, teniendo en cuenta la oferta edáfica, las características climáticas del área de estudio, la disponibilidad de información y los resultados del ACP, en la (Tabla4-13) se presentan las variables originales que fueron incluidas como covariables en la formulación del modelo final. Cabe destacar que para la selección de dichas variables prevalecieron los resultados obtenidos del ACP, dado que estos proporcionaron un criterio cuantitativo.

La única covariable de tipo cualitativa incluida en el proceso de modelado, fue el manejo dado al suelo antes del establecimiento de la plantación (mecanización total o mecanización por franjas), ésta se incluyó como variable indicadora dicotómica.

Tabla 4-13: Covariables a incluir en el modelo explicativo.

VARIABLES CUANTITATIVAS				VARIABLES CUALITATIVAS
FOLIARES	QUÍMICAS	FÍSICAS	Características Biofísicas	Mecanización pre-establecimiento
Cobre	Aluminio	Arena	Pendiente	Franjas
Zinc	Carbono Orgánico	Arcilla	Profundidad efectiva	Total
Nitrógeno	pH	Macroporosidad		
Fósforo	Calcio	D. Aparente		
Manganeso	Potasio			
	Magnesio			
	Manganeso			

Las variables cualitativas incluidas en el modelo fueron tipo de manejo del suelo antes del establecimiento de las plántulas en campo, que de acuerdo con la información reportada por los silvicultores, realizan mecanización en franjas o mecanización total del lote. Éstas fueron incluidas como variables indicadoras dicotómicas.

4.5. Modelo de predicción de rendimientos

4.5.1. Variable de respuesta: Volumen (m^3ha^{-1})

De acuerdo con la Figura 4-8, se observa que de la totalidad de lotes muestreados, el 40 % presenta productividades inferiores al promedio mundial ($41m^3ha^{-1}$), y tan solo el 5 % podrían ser medianamente competitivas. El coeficiente de variación para los dos periodos de muestreo ($CV > 15\%$), es un indicador de la amplia variabilidad de rendimientos en el área (Tabla 4-14).

Tabla 4-14: Estadígrafos descriptivos para producción de volumen de plantaciones de *A. mangium* en los dos periodos (año 1 y años 2) de muestreo.

Periodo	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana	DS	AS	K	CV(%)
1	2.74	57.59	19.58	19.07	13.79	0.83	3.04	57.94
2	4.61	81.69	27.49	24.59	15.97	0.96	4.09	58.11

DS: Desviación estándar; AS: Coeficiente de asimetría; K: Kurtosis; CV: Coeficiente de variación.

El comportamiento de la productividad de los rodales objeto de estudio, para el segundo periodo de muestreo (Figura 4-9) presenta una ligera asimetría, debido probablemente a las

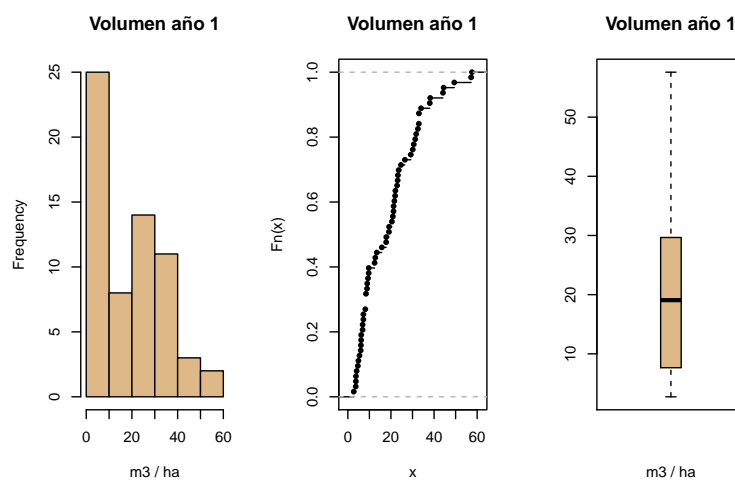


Figura 4-8: Productividad de plantaciones de *Acacia mangium* en el primer (año 1) periodo de muestreo.

parcelas de muestreo 7 y 8 ubicadas en el municipio de Puerto López, la cuales reportan volúmenes de $81,1$ y $70m^3ha^{-1}$, respectivamente, los cuales son considerados como valores atípicos ($< 64,01m^3ha^{-1}$). Los registros edáficos y foliares de estas parcelas fueron revisados en detalle y no se evidenció en ellos la probable razón del mayor crecimiento.

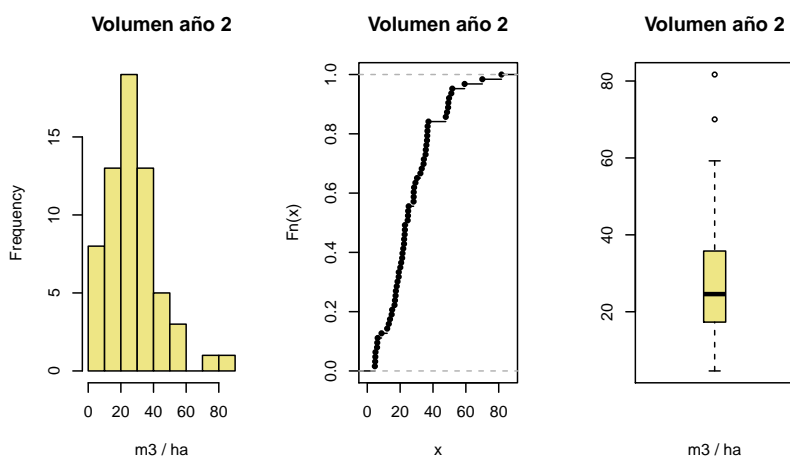


Figura 4-9: Productividad de plantaciones de *Acacia mangium* en el segundo (año 2) periodo de muestreo.

El volumen promedio de los rodales incrementó a razón de $5,52m^3ha^{-1}$ entre los dos periodos de muestreo (Figura 4-9), un valor inferior al reportado para la totalidad del área de estudio (tabla datos silviculturales).

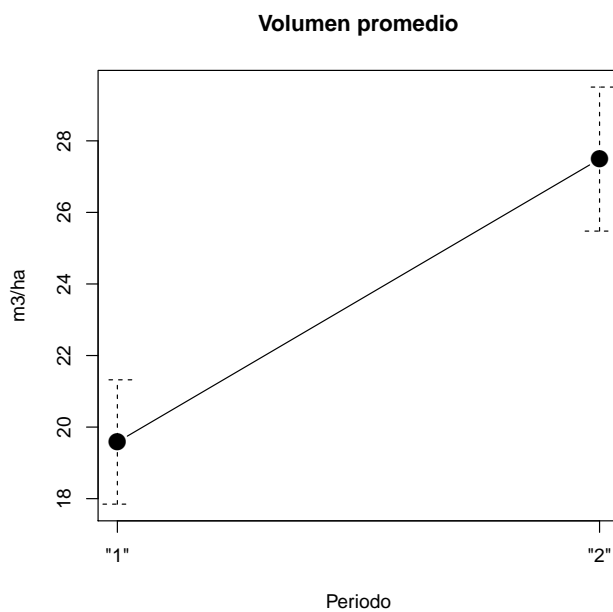


Figura 4-10: Comportamiento del volumen promedio de plantaciones de *Acacia mangium* en los dos periodos de muestreo

Ahora bien, con el objetivo de establecer un modelo estadístico que permitiera explicar y entender el incremento de volumen de la especie *A. mangium* en el área de estudio, se plantearon varias metodologías de modelación, así como diferentes formas de configuración y organización de la base de datos a ser procesada (Tabla 4-14).

Tabla 4-15: Metodologías implementadas y configuración de variables y base de datos.

#	TIPO DE MODELO	Características BD o variables	Cumplimiento supuestos estadísticos	Aplicabilidad técnica
1	Modelo mixto	Periodo de muestreo como covariable	Parcialmente	No
2	Regresión múltiple	Periodo de muestreo como covariable	No	No
3		Componentes principales como covariables	No	No
4	Modelo autoregresivo	Periodo de muestreo como covariable	No	Si
5		Periodo de muestreo como covariable, variable de respuesta transformada.	No	Si
6		Periodo de muestreo como covariable, variable de respuesta transformada, inclusión de profundidad efectiva y pendiente	No	Si
7		Exclusión de 7 parcelas consideradas atípicas	No	No
8		Parcelas organizadas espacialmente y sin atípicas	No	Parcialmente
9		Diferencia entre periodos de todas las covariables y sin parcelas atípicas	Parcialmente	Si
10		Diferencia entre periodos de todas las covariables y sin parcelas atípicas	Parcialmente	Si
11		Diferencia entre periodos de todas las covariables, sin parcelas atípicas y con volumen del periodo 1 como covariable	Si	Si

Los resultados obtenidos en algunos casos no fueron satisfactorios desde el punto de vista de aplicabilidad técnica ni interpretabilidad ecológica, además de no cumplir los supuestos estadístico, sin embargo, cada modelo obtenido permitió enriquecer y mejorar el siguiente; de esta manera se plantearon 24 modelos estadísticos, de los cuales se seleccionó el modelo autoregresivo de primer orden, debido a que cumplió con los supuestos estadísticos y satisfizo en parte los requerimientos prácticos y finalidad de la investigación.

4.5.2. Modelo Autoregresivo (AR1)

Las variables originales seleccionadas que se incluyeron en el modelado fueron transformadas y el modelo se formuló empleando valores rezagados, es decir, las diferencias entre un periodo y otro. El volumen de madera (m^3ha^{-1}) registrado en el año 1 (Vol_1) fue incluido como variable explicativa y el volumen del segundo periodo (Vol_2) fue la variable de respuesta, de esta manera se formuló un modelo autoregresivo de orden $AR(1)$. Con las variables seleccionadas (Tabla 4-13) se realizó un análisis de regresión múltiple convencional, se planteó un modelo general “sobre parametrizado” con 25 variables.

Este modelo, además de no cumplir con el principio de parsimonia del modelado estadístico (con el mínimo de complejidad y la máxima sencillez) [Soltani and Sinclair, 2012], tampoco cumplió el supuesto de independencia [Gujarati, 2010], ya que se evidenció una significativa autocorrelación temporal, como se presenta gráficamente en las Figuras 4-11 y 4-12.

El “dispersograma rezagado” o *H-scatterplot*, consiste de un conjunto h de diagramas de dispersión, en este caso cuatro (4), para intentar evaluar el comportamiento de la variable con su rezago temporal. El rezago, hace referencia a los diferentes periodos, a partir de un periodo de tiempo t , en los cuales se evalúa el comportamiento de la variable, en este caso de los residuos, es decir $t - 1, t - 2, \dots, t - h$, magnitud de separación entre un par de observaciones. Para el caso de estudio, se realizó el gráfico hasta el cuarto rezago, con el objetivo de verificar la existencia de correlación.

De acuerdo con la Figura 4-11, se observa que la pendiente de las rectas, que es directamente proporcional a la correlación existente, disminuye conforme aumenta el rezago, lag (en inglés) o separación, de esta forma la recta del primer rezago tiene la mayor pendiente y la del cuarto rezago es casi cero, lo que nos indica que periodos cercanos están más correlacionados, en este sentido, se hace más evidente entre los dos años de muestreo analizados.

Esta tendencia se confirma en la Figura 4-12, gráfica conocida como correlograma, de función de autocorrelación empírica o muestral, en la cual se representa la magnitud de la correlación con una barra para cada uno de los rezagos establecidos, en este caso, para cuatro (4). Es de

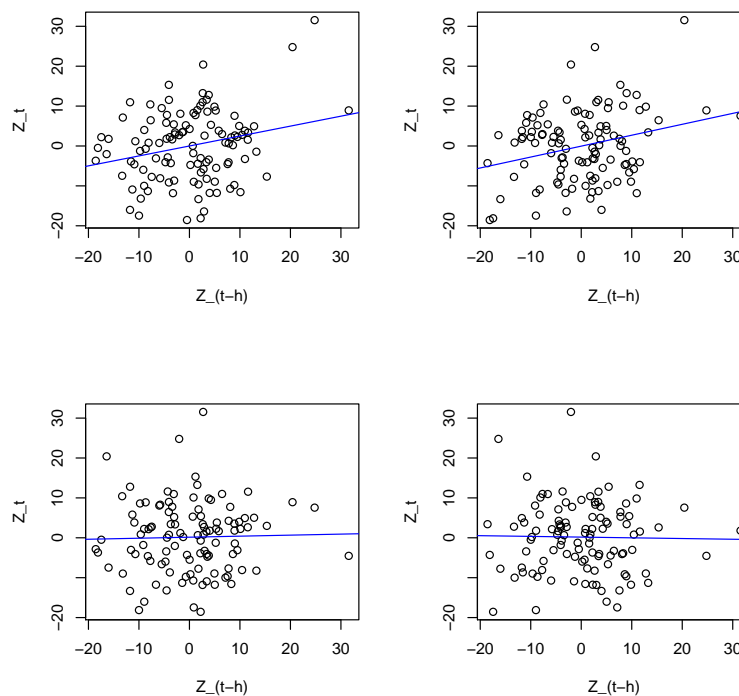


Figura 4-11: Dispersograma rezagado hasta el cuarto periodo.

esperarse que sea una gráfica de tipo decreciente, puesto que cuanto mayor sea el valor del lag, menor será el valor de la autocorrelación, en este sentido el rezago = 0 siempre tendrá el mayor valor de autocorrelación, o sea, 1.

Las líneas horizontales color azul punteadas en la Figura 4-12, representan lo que se conoce como región de confianza o de intervalos, que si las líneas verticales sobre pasan, se dice, la correlación es significativa, es decir, diferente de 0. En este caso, es evidente que los rezagos correlación significativa, son los menores, es decir, lag = 0, 1 y 2, mientras que los rezagos 3 y 4 no son significativos.

Se realizaron las pruebas de validación de supuestos estadísticos y autocorrelación (Durbin-Watson), para el cumplimiento de esta última fue necesario realizar las correcciones de autocorrelación residual.

4.5.3. Especificación del modelo

Una regresión como esta, se conoce como autorregresión porque una variable explicativa es el valor rezagado de la variable dependiente [Gujarati, 2010].

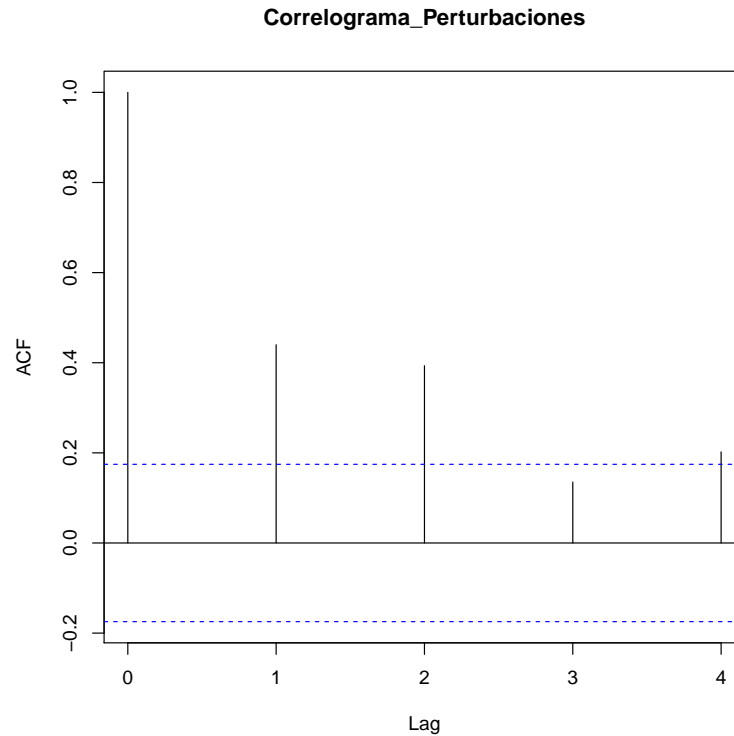


Figura 4-12: Correlograma para perturbaciones hasta cuarto rezago.

Para la formulación del modelo se emplearon los valores rezagados de las variables explicativas (diferencia entre año 1 y año 2). Ahora bien, al restar se obtuvo lo que se conoce como operador de primeras diferencias, indica que se toman diferencias sucesivas de las variables en cuestión, por tanto $\Delta Y_t = (Y_t - Y_{t-1})$, $\Delta X_t = (X_t - X_{t-1})$, $\Delta \mu_t = (\mu_t - \mu_{t-1})$ y $t - 1$ hace referencia al periodo anterior y se escribe como:

$$Y_t = Y_{t-1} + \beta \Delta X_t + \vartheta_t; \vartheta_t = \Delta \mu_t = (\mu_t - \mu_{t-1}) \quad (4-2)$$

Dónde:

Y_t : Volumen de madera ($m^3 ha^{-1}$) del periodo 2 de registro.

Y_{t-1} : Volumen de madera ($m^3 ha^{-1}$) del periodo 1 de registro.

β : Parámetros.

ΔX : Variable explicativa rezagada 1 periodo.

μ : Residuales.

Una vez identificada la estructura de autocorrelación de los residuales se estimó el coeficiente

autoregresivo para cada una de las variables, incluida la respuesta (Volumen año 2), así:

$$X = X_t - 0,1957X_{t-1} \quad (4-3)$$

Así mismo, de acuerdo con el principio de parsimonia en un análisis estimativo, se pueden extraer del modelo general aquellas variables que tengan un coeficiente significativamente distinto de cero y que su contribución a la predicción de la variable dependiente sea importante [Soltani and Sinclair, 2012], obteniendo de esta forma un modelo reducido y más sencillo.

Para la selección de dichas variables y de la configuración del modelo explicativo más adecuado, se recurrió a la técnica de regresión paso a paso o *stepwise* atrás/adelante, al criterio de información de Akaike (AIC) y a juicios técnico científicos, con base en los cuales y en función del objetivo de la estimación y aplicabilidad de los resultados obtenidos, se obtuvo finalmente un modelo reducido, compuesto por seis (6) covariables: Carbono orgánico, cobre edáfico, labores de mecanización, pendiente del terreno, zinc foliar y volumen registrado en el año 1.

4.5.4. Estimación de parámetros

Para la estimación de los parámetros se empleó la técnica de mínimos cuadrados ordinarios y se obtuvo:

Tabla 4-16: Parámetros estimados y su significancia.

VARIABLES INDEPENDIENTES	ESTIMACIÓN
Intercepto	14,75***
Carbono Orgánico	3,46**
Cobre edáfico	-14,60***
Mecanización	10,08***
Pendiente	-1,36*
Volumen año 1	0,93***
Zinc foliar	-0,0222**

*** Significativo entre 0 % y 0,1 %. ** Significativo entre 0,1 % y 1 %. * Significativo entre 1 % y 5 %. Significativo entre 5 % y 10 %.

4.5.5. Diagnósis del modelo

Una vez estimado el modelo y corregida la autocorrelación residual, se realizó la diagnósis del modelo, por medio de la comprobación de hipótesis, que estableció el nivel de confiabilidad para hacer predicciones y/o tomar decisiones con el modelo obtenido.

Las hipótesis básicas comprobadas fueron: multicolinealidad (Factor de inflación de varianzas - VIF), normalidad (Shapiro Wilks), linealidad (Ramsey reset), homocedasticidad (Breush Pagan) e independencia Durbin Watson).

Tabla 4-17: Resumen del diagnóstico numérico de modelo propuesto.

VARIABLES INDEPENDIENTES	ESTIMACIÓN	VIF	SHAPIRO WILKS	RAMSEY RESET	BREUSCH PAGAN	H DE DURBIN
Intercepto	14,75***		W=0,98 p-value= 0,8	Reset=1,2 p-value= 0,3	BP=11 p-value= 0,08	h=1,35 p-value= 0,61
Carbono Org.	3,46**	1,40				
Cobre edáfico	-14,60***	1,79				
Mecanización	10,08***	1,95				
Pendiente	-1,36	1,55				
Volumen año 1	0,93***	1,11				
Zinc foliar	-0,022**	1,68				

*** Significativo entre 0% y 0,1%. ** Significativo entre 0,1% y 1%. * Significativo entre 1% y 5%.
Significativo entre 5% y 10%.

La hipótesis de linealidad establece que en el rango de valores observado para las variables, la medida de la respuesta crece linealmente con la variable explicativa. Cuantitativamente se empleó la prueba de Ramsey o RESET, por sus siglas en inglés, (*Regression Equation Specification Error Test*), la cual es además un contraste general para errores de especificación propuesto por Ramsey (1969), que comprueba si alguna potencia de la variable independiente afecta a los residuos.

La hipótesis nula, sugiere que el error es ruido blanco (situación deseable) y la hipótesis alterna, afirma que existe alguna variable independiente de orden superior al de la lineal que influye en la variable dependiente. Gráficamente a través de los residuales y los valores estimados del modelo, también se realizó un diagnóstico de la linealidad del mismo. Si la forma está bien especificada, los residuos aparecerán como ruido blanco, de lo contrario, presentarán alguna forma funcional [Balzarini, 2013].

De acuerdo con la Tabla 4-17, el modelo cumple con la hipótesis de linealidad (p -valor = 0,3), lo que es corroborado con el diagnóstico gráfico, puesto que no se observa tendencia alguna en los residuales (Figura 4-13).

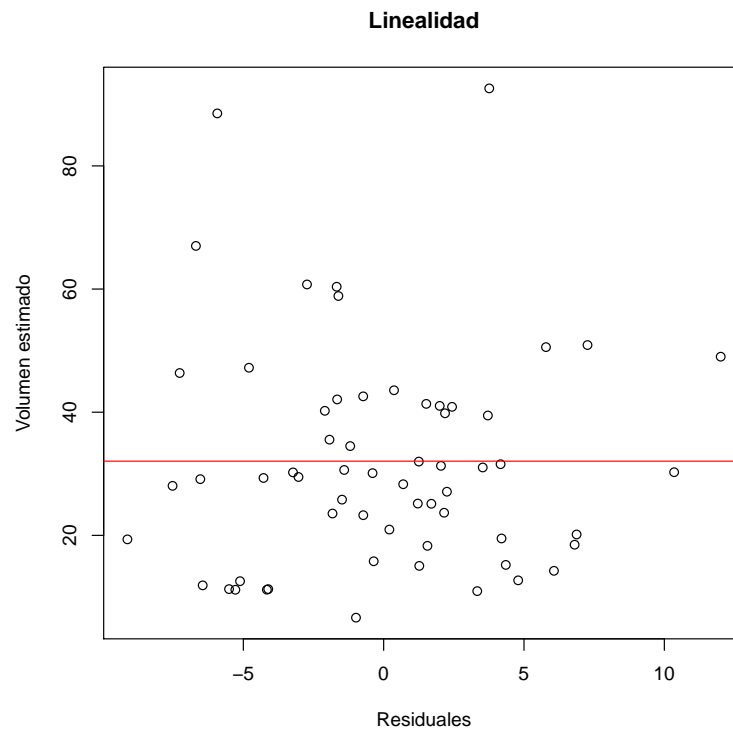


Figura 4-13: Diagnóstico gráfico de linealidad en el modelo propuesto.

Cuando se grafican los valores estimados con los residuales, no se identifica forma funcional alguna (Figura 4-13), lo que es indicativo de la calidad del modelo, puesto que efectivamente los residuales no tienen información o influencia entre los componentes graficados [Peña, 2002].

Este tipo de gráfico, permite observar como la variable independiente, que en este caso corresponde al volumen estimado para el año 2, recoge los posibles efectos del volumen medido sobre el comportamiento de los residuos [Lawal, 2014]. Sugiere además que la variable dependiente del modelo, en este caso el volumen, es la mejor aproximación lineal en función de las variables independientes[Balzarini, 2013].

Es importante considerar que los resultados de la prueba de Ramsey, no son totalmente confiables si el supuesto de varianza constante (homocedasticidad) no se cumple. Lo que supondría que el modelo podría tener una forma funcional errónea, es decir, podría no ser lineal o podría ser indicativo de omisión de variables independientes (Peña, 2002).

No obstante, a continuación (Figura 4-14), se observa la tendencia homocedástica del modelo obtenido. Fueron graficados los residuales al cuadrado con los valores estimados de volumen

y no se evidencia de manera notable la presencia de heteroscedasticidad, a pesar de la baja significancia de la prueba numérica (Tabla 4-17).

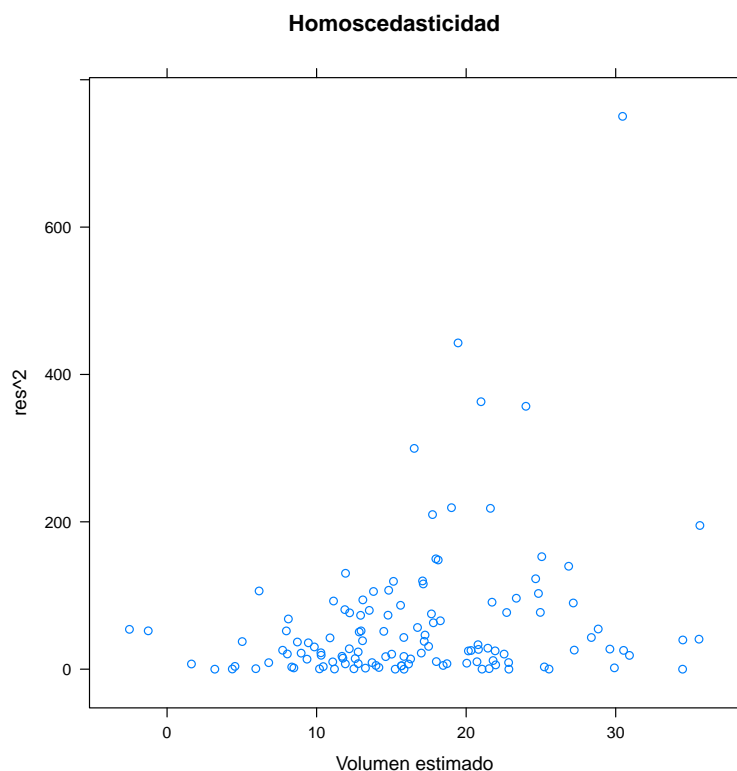


Figura 4-14: Diagnóstico gráfico de homocedasticidad en los residuales del modelo obtenido.

Es importante además, comprobar que los residuos del modelo, tienen una distribución normal con media cero (0) y varianza constante. De acuerdo con la Tabla 4-17, la prueba de Shapiro Wilks, indica que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de normalidad ($p - valor = 0,79$), lo que es corroborado gráficamente a través del gráfico cuantil-cuantil, en el cual los puntos se distribuyen muy cerca la diagonal continua y dentro de las líneas punteadas (Figura 4-15).

A su vez, el diagrama de residuales (Figura 4-16) no exhibe relación ni tendencia alguna entre los mismos. Por último, se observa que el histograma de los residuales tienen una forma simétrica y los valores se concentran mayoritariamente alrededor del cero (0) (Figura 4-19).

Mediante el factor de inflación de varianzas (VIF), que representa el incremento de la variabilidad en la estimación de los efectos de cada variable en la regresión, como consecuencia de la dependencia entre las variables (Peña, 2002), se comprobó la independencia entre las variables independientes y la ausencia de multicolinealidad, puesto que todas las variables

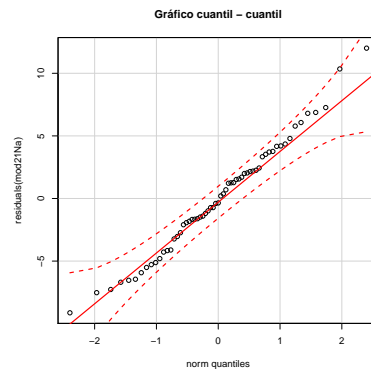


Figura 4-15: Gráfico cuantil - cuantil. Diagnóstico gráfico de normalidad residual.

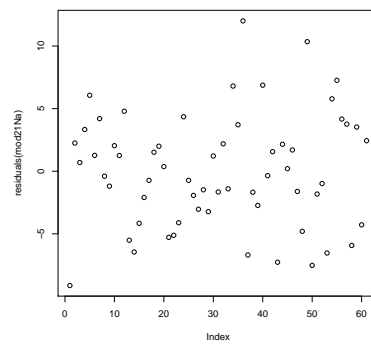


Figura 4-16: Diagrama de residuales. Diagnóstico gráfico de normalidad residual.

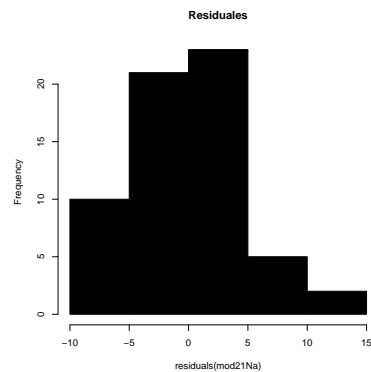


Figura 4-17: Histograma de residuales. Diagnóstico gráfico de normalidad residual.

incluidas en el modelo tienen un VIF menor a diez (10), como se observa en la Tabla 4-17. Finalmente, la corrección de la autocorrelación serial se corroboró gráfica (Figura 4-15) y numéricamente (Tabla 4-17) mediante el contraste h de Durbin, dado que el estadístico convencional y antes usado de Durbin-Watson no es válido para detectar correlación serial

(de primer orden), como en este caso, en el cual el volumen del año 1 fue empleado para explicar el volumen del año 2.

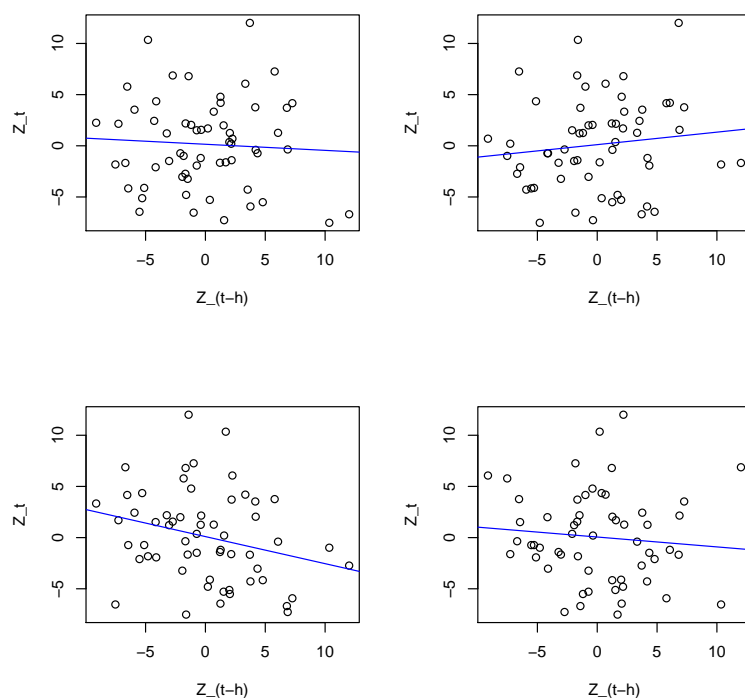


Figura 4-18: Dispersograma rezagado corregido.

De acuerdo con Gujarati, [2009], el valor d calculado en los modelos autoregresivos de primer orden, por lo general tiende a 2, que es el valor de d esperado en una secuencia verdaderamente aleatoria. Lo que implica que el cálculo del estadístico d para tales modelos en la forma habitual, forma un sesgo inherente que impide descubrir la correlación serial (de primer orden).

De esta manera el modelo autoregresivo de primer orden $AR(1)$ ajustado es:

$$Vol_2 = 14,75 + 3,46\Delta CO - 14,6\Delta Cu + 10,08Mec - 1,36\Delta Pend + 0,93Vol_1 - 0,022\Delta ZnFol + \vartheta_t$$

Donde:

Vol_2 : Volumen registrado en el año 2.

Δ : Diferencia de un año 1 y 2 de muestreo.

CO : Carbono Orgánico.

Cu : Cobre edáfico.

Mec : Labores de mecanización total pre-establecimiento.

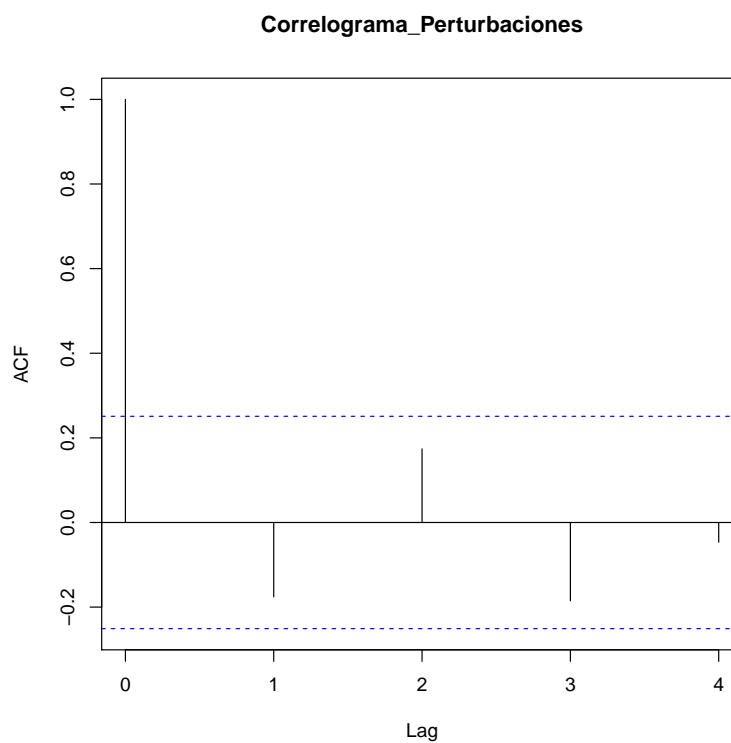


Figura 4-19: Correlograma corregido.

Pend: Pendiente del terreno.

*Vol*₁: Volumen registrado en el año 1.

ZnFol: Zinc foliar.

ϑ : Disturbios (residuales corregidos).

4.6. Caracterización del crecimiento y adaptabilidad de *Acacia mangium* a la altillanura plana

Con base en el modelo final obtenido, se identificó que los contenidos de carbono orgánico favorecen la producción de volumen de los rodales objeto de estudio. Característica que se ha observado de igual manera en plantaciones establecidas en Asia, donde los mejores rendimientos se reportan en suelos con altos contenidos de materia orgánica (Figura 4-19) y los más bajos crecimientos en suelos donde identificaron la presencia de plintita (Figura 4-20).

Los efectos benéficos de la materia orgánica, se observaron en el incremento de la productividad entre turnos de rotación de 5 años en plantaciones de Indonesia, las cuales registraron incrementos de 29,4 en la primera rotación a 43 $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ en la segunda para un sitio

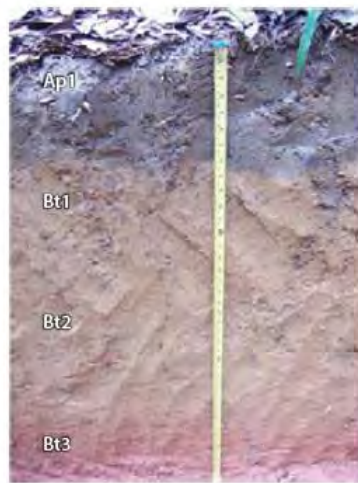


Photo 3. Deep profile with an Ap horizon high in organic matter



Photo 4. Corresponding stand is highly productive

Figura 4-20: Perfil con horizonte Ap con alto contenido de MO y su correspondiente rodal con alta productividad.

Fuente: Hardwood & Nambiar, [2014].

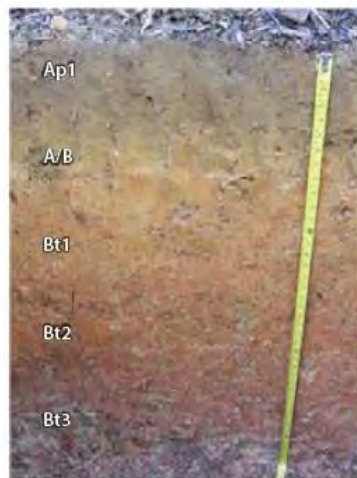


Photo 1. Soil profile with a plinthite layer at 40 cm



Photo 2. Corresponding tree growth is poor and canopy has not closed at age 1.5 years

Figura 4-21: Perfil con horizonte capa de plintita a 40cm y su correspondiente rodal con baja productividad.

Fuente: Hardwood & Nambiar, [2014].

y de 29,7 a 47,8 m^3ha^{-1} año⁻¹ en otro sitio [Hardiyanto and Nambiar, 2014].

Las labores de mecanización están directamente relacionadas con las propiedades físicas del

suelo, puesto que el efecto de “aflojamiento” mejora varias de sus propiedades, tales como la infiltración de agua, capacidad de aireación, la distribución de los elementos nutritivos y la penetración de las raíces. No obstante, es importante considerar las características físicas de los suelos de la altillanura, que los hace susceptibles a la degradación, por sus bajos contenidos de materia orgánica, su composición textural con predominio de arenas finas y muy finas.

En este sentido, como se observó, el dominio de microporosidad los pone en desventaja, puesto que la capacidad de infiltración y aireación se disminuye de manera drástica. Esta situación también se reportó en suelos Haplic Acrisols (Ultisols) de Malasia Ilstedt et al. [2004], encontraron que la disminución de la macroporosidad en las áreas afectadas por el paso del tractor (skiders D6) con valores de densidad aparente entre 1,0 y 1,4 Mgm^{-3} y afectados por extracción de madera, redujo significativamente el crecimiento de plantaciones de Acacia, sin que pudiera recuperar la pérdida con adición de fertilizante, cenizas producto de la quema de residuos en la planta de procesamiento de la madera, ni con la adición de residuos de materia verde de áreas aledañas a la plantación.

Nurudin, Ohta, Hardiyanto, Mendham, & Wicaksono, (2013), compararon las características edáficas que afectan la productividad de *A. mangium* en cuatro sitios buenos (Pisoplinthic acrisols) con la de cinco malos (*Acric Plinthosols*) en el sur de Sumatra y encontraron que las diferencias en productividad no se debieron a las propiedades de fertilidad sino a las características físicas del subsuelo; los sitios buenos con horizontes pisolíticos profundos presentan mejor estructura, drenaje y aireación que los sitios con horizonte plíntico superficial con menor porosidad y mayor resistencia (compactación) a la penetración de raíces lo que permitió explicar las diferencias en productividad de la especie.

Se cree que algunas especies de forestales comerciales de rápido crecimiento, consumen más agua que otras como la Acacia [Inagaki, 2008], que se caracteriza por tener una alta tasa neta fotosintética bajo buenas condiciones de sitio, una alta tasa de transpiración [Matsumoto, 2000] y un bajo uso eficiente del agua [Eschenbach, 1998]; [Ma, 2002]; [Matsumoto, 2000], lo que la hace una especie muy vulnerable a sufrir de estrés por sequía [Inagaki, 2008]. En este sentido, probablemente los rodales establecidos en la altillanura plana, se encuentran bajo esta condición de estrés, dados los prolongados periodos de sequía que se presentan en la región.

Por su elevada capacidad de adaptación a suelos pobres, ácidos y pendientes fuertes, la Acacia ha llegado a ser la especie mayormente plantada en las tierras bajas y planas de costa húmedas tropicales de Asia, debido a su rapidez de crecimiento, alta producción de biomasa y tolerancia a los suelos degradados, infértiles, ácidos (pH 3,4-5,0) y con bajo contenido de materia orgánica (Nirsatmanto et al., [2004]; Kim et al., [2008], citado por [Alvarado, 2012]. Sin embargo, en la presente investigación se encontró que aunque logre sobrevivir, las fuertes

pendientes no favorecen su productividad.

Ensayos en Vietnam demostraron la incidencia significativa de la pendiente del terreno en la productividad de rodales de 5 años de edad. Con una variación en el terreno de 10 a 15° sobre una distancia de 200m el IMA varió de 16,7 del sitio más inclinado a 22,0 y 25,0 m³ ha año hasta el de menor pendiente [Nambiar and Harwood, 2014].

Por otro lado, es importante mencionar que los antecedentes reportados para esta especie como eficiente bioremediadora de suelos afectados por metales pesados y eficaz captadora y almacenadora de los mismos, probablemente explican la elevada correlación y significancia obtenida por estos elementos desde el análisis de componentes principales y en el modelo final, que si bien, presentaron correlaciones negativas con la producción de volumen, también fueron significativas, razón por la cual fue necesario hacer mención de estas variables. De acuerdo con el Doctor Alvarado (comunicación personal febrero 20 de 2017), tales resultados estadísticos podrían ser evidencia de la probable “afinidad” que esta especie tiene por tales elementos.

4.7. Zonas potenciales para producción de *Acacia mangium* en la altillanura plana

Para identificar las zonas potenciales de producción de *A. mangium* en la altillanura plana, se empleó la información analítica y cartográfica disponible de las unidades de suelos definidas para la región por IGAC, [2004, 2014], en los estudios generales de suelos de los departamentos de Meta y Vichada.

Con dicha información y el modelo autoregresivo de primer orden (*AR1*) ajustado, se obtuvo con un 95 % de confianza, un intervalo de la probable producción de volumen de madera para cada unidad cartográfica, si se establecieran plantaciones de *A. mangium*, bajo las condiciones del modelo estadístico propuesto.

En la (Tabla 4-18) se presentan algunas características de las unidades cartográficas de suelos para las que se realizó el cálculo.

Los datos empleados se extrajeron de los análisis de laboratorio de los perfiles modales de cada UCS reportados por IGAC, [2004, 2014]. Los datos no reportados como zinc foliar y cobre edáfico se tomaron de la base de datos de las plantaciones ya establecidas. Asu vez, se asumió que en todas las unidades cartográficas se realizarán labores de mecanización total.

Tabla 4-18: Descripción general de Unidades Cartográficas de Suelos (UCS).

SIMBOLO	Paisaje	Tipo de Relieve	Forma del terreno	Pendiente	Grado erosión	Clasificación taxonómica (USDA)
AVA	Altillanura	Ondulación	Cimas y laderas	a	Ligero	Xanthic Haplustox; Typic Kandistuls
AVB	Altillanura	Lomas	Laderas	b-c-d	Ligero	Plinthic Kandistutls
AVD	Altillanura	Glacis inundable	Bajos	a-b	Sin erosión	Oxyaquic Kandiodults Oxyaquic Dystrudepts
AVG	Altillanura	Depresión	Área central	a	Sin erosión	Typic Haplaquox
LVH	Lomerio	Lomas	Cimas y laderas	b-c-d	Moderado	Petroferric Hapludox
LVJ	Lomerío	Lomas	Laderas	b-c	Ligero	Oxic Dytrudepts Typic Hapludox
SVA	Altillanura	Peniplanos	Area plana	a-b	Ligero	Typic Ustipsamments

Pendiente a: 0 - 3%; b: 3 - 7%; c: 7 - 12%; d: 12 - 25%. Fuente: Adaptado de IGAC [2004, 2014].

Para establecer los rangos de productividad de los intervalos calculados, se tomó como referencia la producción de volumen de las plantaciones ya establecidas y su clasificación de índice de sitio (*IS*), así: sitios muy poco productivos: $< 20m^3ha^{-1}$, sitios poco productivos de 20 a $40m^3ha^{-1}$, sitios medianamente productivos de 40 a $50m^3ha^{-1}$ y sitios productivos $> 50m^3ha^{-1}$. De la misma manera le fue asignado un color como se muestra a continuación.

En la Tabla 4-20 se presentan el valores ajustado y los límites superior e inferior de los intervalos obtenidos para cada unidad cartográfica, entendiendo que el intervalo no corresponde a un pronóstico, sino a una expectativa de un rango de valores probables bajo ciertas características dadas, en este caso, a valores específicos de las variables explicativas.

Tabla 4-19: Calificación de producción de volumen de madera (m^3ha^{-1}) obtenidos para cada Unidad Cartográfica de Suelo (UCS).





Volumen m^3ha^{-1}				
	<20	20-40	40-50	> 50

Tabla 4-20: Intervalo de predicción para Unidades Cartográficas de Suelos (UCS).

Valor	AVBd	AVBc	LVHd	AVGa	AVAa	SVAb	LVHc	LVJc	LVJb	AVDa
Ajustado	17,25	29,11	40,58	41,72	42,10	47,49	52,43	56,54	64,02	69,4
Inferior	-1,77	16,93	20,95	30,10	32,15	37,40	39,75	44,13	52,77	59,4
Superior	36,28	41,28	60,21	53,33	52,04	57,58	65,11	68,96	73,27	79,3

Pendiente a: 0 - 3%; b: 3 - 7%; c: 7 - 12%; d: 12 - 25 %. Fuente: IGAC (2004).

Finalmente se asignó un color a cada unidad cartográfica de acuerdo con el rango de productividad predicho, donde el verde corresponde a las unidades más productivas y el rojo a las de menor productividad. Los mismos colores fueron empleados en la salida gráfica, en el cual se esquematizan los intervalos obtenidos para la altillanura plana.

Limitación	UCS	Clasificación taxonómica	CO%	Cu	Meca	Pendiente	Volumen inicial	Zn Foliar	ha	%
Ausente	LVJc	Oxic Dystrudepts	> 1.5	< 1	Si	7 - 12	48	< 13	730402	18,2
	LVJb	Typic Hapludox				3 - 7				
	AVDa	Oxyaquic Dystrudepts				1 - 3				
Ligera	AVAa	Xanthic Haplustox	1.2 - 1.0		Si	1 - 3	38,5	13 - 20	988385	24,7
	SVAb	Typic Ustipsamments				3 - 7				
	LVHb	Typic Hapludults				3 - 7				
Moderada	AVBc	Plinthic Kandistults	1.0 - 0.8		Si	7 - 12	26,5	20 - 30	907115	22,7
	LVHc	Petroferic Hapludox				7 - 12				
Severa	AVBd	Plinthic Kandistults	< 0.8	> 1	Si	12 - 25	18,5	> 30	1377756	34,4
	AVGaz	Typic Haplaquox				1 - 3				
	LVHd	Petroferic Hapludox				12 - 25				

Figura 4-22: Descripción general de Unidades Cartográficas de Suelos (UCS).

C.O.: Carbono orgánico; Cu: Cobre edáfico; Meca: Mecanización; ha: hectáreas.

Es importante considerar que las unidades cartográficas que IGAC, [2004, 2014], reportaron con fases de inundación y encharcamiento, no fueron tenidas en cuenta en esta parte del

análisis, dado que las plantaciones establecidas no presentan esta característica, sumado a que la especie *Acacia mangium*, no tolera condiciones de mal drenaje o anegamiento.

Como se observa en el mapa (Figura**4-23**), la mayoría de unidades cartográficas en el área de estudio presenta serias limitaciones para el adecuado crecimiento de *A. mangium* en la altillanura plana, que de acuerdo al modelo estadístico propuesto e implementado, es dado principalmente por la pendiente del terreno y los bajos contenidos de materia orgánica.

La Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), en el año 2015, realizó el mapa de aptitud para plantaciones con fines forestales comerciales a nivel nacional a escala 1 : 100,000 (Figura **4-24**). Del cual cabe resaltar la similitud en la calificación otorgada para la región de la Altillanura plana. Si bien se emplearon metodologías completamente diferentes, se observa como la totalidad del departamento de Vichada y casi la mitad del Meta, presentan aptitud baja con color amarillo; las zonas verdes, representan aptitud alta y media.

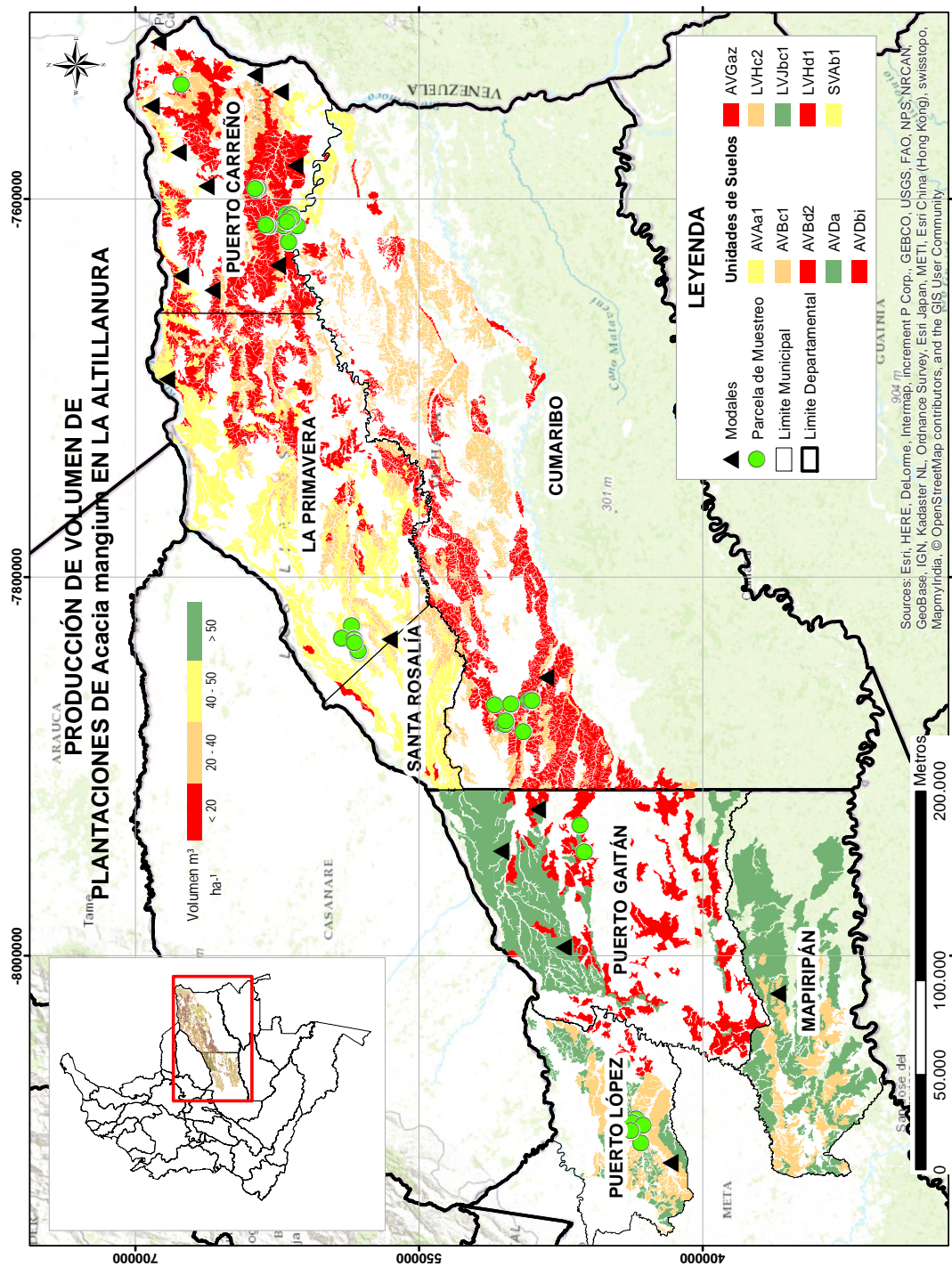


Figura 4-23: Zonas productivas para *A. magium* en la altillanura plana

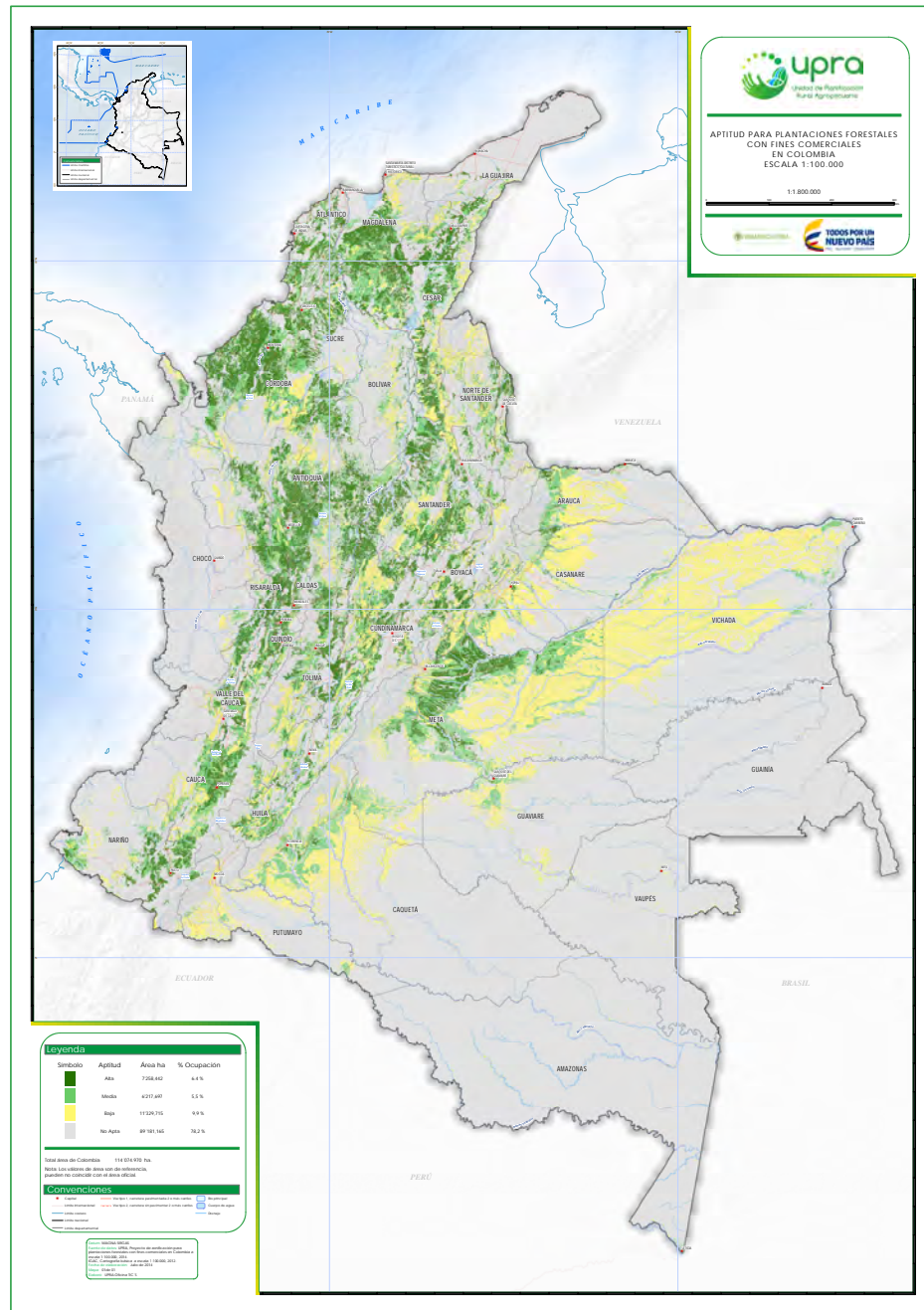


Figura 4-24: Aptitud para plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Escala 1:100.000.

Fuente: UPRA, [2015].

5 Conclusiones

Se identificó que los contenidos edáficos de cobre y carbono orgánico, la pendiente del terreno y la concentración de zinc foliar, son algunos de los parámetros biofísicos que afectan en mayor medida el crecimiento de la especie *Acacia mangium* en la altillanura plana.

La producción de volumen de madera de la especie *Acacia mangium* en la altillanura plana se favorece significativamente con altos contenidos de carbono orgánico ($> 1,5\%$), relieves planos a ligeramente planos y la mecanización del suelo previa al establecimiento de la plántulas.

Los suelos del área de estudio se caracterizan por presentar acidez extrema ($pH < 5,5$), niveles adecuados de carbono orgánico (entre $0,5$ y $0,8\%$), valores deficitarios de fósforo ($1,5\text{mgkg}^{-1}$) y azufre ($2,0\text{mgkg}^{-1}$), además de baja disponibilidad de calcio ($0,2\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$), magnesio ($0,28\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$) y potasio ($0,02\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$).

Suelos clasificados como Oxyaquic Kandiuults y Oxyaquic Dystrudepts con pendiente entre el 1 y 3% pertenecientes a la unidad cartográfica AVD y suelos Typic Hapludox y Oxyc Dystrudepts con pendientes entre el 3 y 7% correspondientes a la unidad cartográfica LVJ en el departamento del Meta, son las más aptos, de las evaluadas en la presente investigación, para el establecimiento de plantaciones de *Acacia mangium* con fines comerciales en la altillanura plana.

Por el contrario, suelos como los Plinthic Kandiuults con pendientes entre el 7 y 12% pertenecientes a la unidad cartográfica AVBd2, con pendientes entre el 3 y 7% con inundaciones periódicas pertenecientes a la unidad AVDbi, así como suelos Typic Haplaquox de la unidad cartográfica AVGaz con pendientes entre el 1 y 3% con encharcamientos prolongados y suelos Petroferric Hapludox de la unidad cartográfica LVHd1, todos ellos ubicados en el departamento del Vichada, son los menos aptos, de los evaluados en la presente investigación, para el establecimiento de plantaciones de *Acacia mangium* con fines comerciales en la altillanura plana.

La producción maderera de plantaciones de *Acacia mangium* en la altillanura plana colombiana, probablemente alcanzaría rangos de 40 a $50\text{m}^3\text{ha}^{-1}$, si los rodales se establecen en terrenos con pendientes menores al 7% , en suelos previamente mecanizados, con niveles de carbono orgánico por encima del $1,5\%$ y los suelos no presentan problemas de drenaje.

El ajuste de un modelo autoregresivo de primer orden, permitió corregir la autocorrelación residual y ajustar los supuestos de homoscedasticidad y linealidad, con el cual se generó un mapa de productividad potencial.

El coeficiente autoregresivo AR $X^* = 0,1957$ fue el adecuado para transformar las covariables y ajustar el modelo propuesto.

El 34% de los suelos evaluados presentan limitaciones severas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales rentables en la altillanura plana colombiana.

El 18.2% de los suelos evaluados no presentan limitaciones para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales rentables en la altillanura plana colombiana.

Es necesario incrementar la cantidad de información a través del tiempo para especies forestales, para generar información con menores niveles de incertidumbre. Además de proponer metodologías de modelación con registros de tipo longitudinal. A su vez, se recomienda implementar técnicas de muestro que permitan incorporar el efecto espacial, puesto que en la presente investigación éste no fue tenido en cuenta.

Bibliografía

- [Aertsen et al., 2011] Aertsen, W., Kint, V., Van Orshoven, J., and Muys, B. (2011). Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *Environmental Modelling and Software*, 26(7):929–937.
- [Aertsen et al., 2010] Aertsen, W., Kint, V., van Orshoven, J., Özkan, K., and Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221(8):1119–1130.
- [Alvarado and Forsythe, 2005] Alvarado, A. and Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de costa rica. *Agronomía Costarricense*.
- [Alvarado, 2012] Alvarado, Alfredo; Raigosa, J. (2012). *Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- [Amadou, 2014] Amadou, M; McGuire, K. D. A. (2014). *Ectomycorrhizal Symbioses in Tropical and Neotropical Forests*. Taylor & Francis Group.
- [Amzéquita et al., 2013] Amzéquita, E., Rao, I., Rivera, M., Corrales, I., and Bernal, J. (2013). Un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los llanos orientales de colombia. techreport ISBN 978-958-694-117-4, CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) - CORPOICA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria).
- [Anyomi et al., 2013] Anyomi, K., Raulier, F., Bergeron, Y., and Mailly, D. (2013). The predominance of stand composition and structure over direct climatic and site effects in explaining aspen (*Populus tremuloides* Michaux) site index within boreal and temperate forests of western Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 302:390–403.
- [Balzarini, 2013] Balzarini, Mónica; Macchiavelli, R. C. F. (2013). Aplicaciones de modelos mixtos en agricultura y forestería. Technical report, CATIE; Universidad de Puerto Rico; Universidad Nacional de Córdoba.
- [Bohn et al., 2001] Bohn, H., McNeal, B., and O’Connor, G. (2001). *Soil chemistry*.
- [Bontemps, 2014] Bontemps, J. B. (2014). Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry An International Journal Research*, 87:109–128.

- [Castro and Gómez, 2012] Castro, H. and Gómez, M. I. (2012). El diagnóstico integral de la fertilidad del suelo a partir de indicadores analíticos.
- [CATIE, 1992] CATIE (1992). *Acacia mangium* Willd. Especie de uso múltiple en América Central. Technical report, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- [CIAT, 2000] CIAT (2000). Alternativas de uso de la tierra para los llanos orientales de Colombia- estudio de caso: Puerto Ipe, meta. herramienta para la toma de decisiones. Technical report, Convenio Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural .
- [CONIF, 2013] CONIF (2013). El Sector Forestal en Colombia. Technical Report 1, Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal, Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. Bogotá, Colombia.
- [Drechsel and Zech, 1991] Drechsel, P. and Zech, W. (1991). Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant and Soil*, 131:29 – 46.
- [Epron et al., 2013] Epron, D., Nouvellon, Y., Mareschal, L., Moreira, R. M. E., Koutika, L. S., Geneste, B., Delgado-Rojas, J. S., Laclau, J. P., Sola, G., Gonçalves, J. L. D. M., and Bouillet, J. P. (2013). Partitioning of net primary production in Eucalyptus and Acacia stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. *Forest Ecology and Management*, 301:102–111.
- [Eschenbach, 1998] Eschenbach, C. (1998). Photosynthesis rates of selected tree species in lowland dipterocarp rainforest of Sabah, Malaysia. *Trees*, (12):356–365.
- [Eslava et al., 1986] Eslava, J., López, V., and Olaya, G. (1986). Los climas de Colombia (sistema de W. Köppen). *Atmósfera*, 5:35 – 81.
- [FAO, 2016] FAO (2016). *El estado de los bosques del mundo*. FAO, Rome, Italy, e-isbn 978 edition.
- [Farrelly et al., 2011] Farrelly, N., Dhubháin, Á. N., and Nieuwenhuis, M. (2011). Sitka spruce site index in response to varying soil moisture and nutrients in three different climate regions in Ireland. *Forest Ecology and Management*, 262(12):2199–2206.
- [Ferrari, 2004] Ferrari, E; Wall, L. (2004). Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Revista de la Facultad de Agronomía La Plata*, 105(2):63–87.
- [Garay et al., 2004] Garay, I., Pellens, R., Kindel, A., Barros, E., and Franco, A. (2004). Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia*

mangium in brazil: a contribution to the study of sustainable land use. *Applied Soil Ecology*, 27:177–187.

- [Gonçalves et al., 2013] Gonçalves, J. L. D. M., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., Ferraz, S. F. D. B., Lima, W. D. P., Brancalion, P. H. S., Hubner, A., Bouillet, J.-P. D., Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., and Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301:6–27.
- [Graybill, 1974] Graybill, F. A. . (1974). *Theory and Application of the Linear Model* . Wadsworth Publishing Company, Colorado, Starw University.
- [Gujarati, 2010] Gujarati, Damodar; Porter, D. (2010). *Econometría*. McGraw Hill.
- [Hahn and Meeker, 1991] Hahn, G. and Meeker, W. (1991). *Statistical Intervals. A Guide for Practitioners*. John Wiley & Sons, Inc., Iowa. USA.
- [Hardiyanto and Nambiar, 2014] Hardiyanto, E. and Nambiar, S. (2014). Productivity of successive rotations of acacia mangium plantations in sumatra, indonesia: impacts of harvest and inter-rotation site management. *New Forests*, 45:557–575.
- [IGAC, 1995] IGAC (1995). *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Intituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá D.C., Colombia.
- [IGAC, 2014] IGAC (2014). Estudio General de Suelos y Zonificación De Tierras del Departamento de Vichada. Technical report, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá D.C., Colombia.
- [IGAC, 2016] IGAC (2016). *Suelos y Tierras de Colombia*. Intituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá D.C., Colombia.
- [Inagaki, 2008] Inagaki, M. (2008). Soil water conditions according to landscape position and aboveground vegetation in an acacia mangium plantation in sabah, malaysia. *Japan Agricultural Research Quaterly*, 42(1).
- [Jhonson, 2007] Jhonson, Richard; Wichern, D. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis. Sixth Edit*. Pearson Education, Inc.
- [Johansson, 2006] Johansson, T. (2006). Site index conversion equations for *Picea abies* and five broadleaved species in Sweden: *Alnus glutinosa* , *Alnus incana* , *Betula pendula* , *Betula pubescens* and *Populus tremula*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(1):14–19.

- [Juo, 2003] Juo, Anthony; Franzluebbers, K. (2003). *Tropical Soils: Properties and Management for Sustainable Agriculture*. Oxford University Press, Inc.
- [Keyser and Brown, 2014] Keyser, T. L. and Brown, P. M. (2014). Climate-growth relationships for yellow-poplar across structural and site quality gradients in the southern Appalachian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 329:158–165.
- [Kitikidou et al., 2012] Kitikidou, K., Petrou, P., and Milios, E. (2012). Dominant height growth and site index curves for Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) in central Cyprus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2):1323–1329.
- [Krisnawati, 2016] Krisnawati, H. (2016). A compatible estimation model of stem volume and taper for acacia mangium willd. plantations. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 3(1):49–64.
- [Krisnawati, 2011] Krisnawati, H; Kallio, M. K. M. (2011). *Acacia mangium Willd. Ecology, silviculture and productivity*. Center for International Forestry Research, Indonesia.
- [Laamrani et al., 2014] Laamrani, A., Valeria, O., Bergeron, Y., Fenton, N., Cheng, L. Z., and Anyomi, K. (2014). Effects of topography and thickness of organic layer on productivity of black spruce boreal forests of the Canadian Clay Belt region. *Forest Ecology and Management*, 330:144–157.
- [Lal and Shukla, 2004] Lal, R. and Shukla, M. (2004). *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, Inc.
- [Lawal, 2014] Lawal, B. (2014). *Applied Statistical Methods in Agriculture, Health and Life Sciences*. Malete, Nigeria.
- [León and García, 2007] León, D. and García, F. (2007). Especies Multipropósito al servicio de la ganadería en los llanos Orientales. Technical report, Corpoica, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR. Bogotá, Colombia.
- [Liu, 1995] Liu, R. (1995). Control Charts for Multivariate Processes. *Journal of the American Statistical Association*, 90(432):1380–1387.
- [Liu, 2003] Liu, R. Y. (2003). Ch. 14. Multivariate control charts: Hotelling T², data depth and beyond. In Khattree, R. and Rao, C., editors, *Handbook of Statistics*, volume 22, chapter 14, pages 573–593. Elsevier Science B.V.
- [Liu and Singh, 1993] Liu, R. Y. and Singh, K. (1993). A Quality Index Based on Data Depth and Multivariate Rank Tests. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421):252–260.

- [Loaiza Arbeláez, 2013] Loaiza Arbeláez, R. D. (2013). *Gráficos de control no paramétricos basados en R-estadísticos con aplicación al caso multivariante*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid.
- [Louw and Scholes, 2006] Louw, J. H. and Scholes, M. C. (2006). Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 225(1-3):94–103.
- [Ma, 2002] Ma, H; McConchie, J. C. D. (2002). The drought resistance of acacia and eucalyptus in yuanmou dry?hot valley yunnan province. *Forest Research*, 15(1):101–104.
- [Ma et al., 2006] Ma, M., Jiang, H., Liu, S., Zhu, C., Liu, Y., and Wang, J. (2006). Estimation of forest-ecosystem site index using remote-sensed data. *Acta Ecologica Sinica*, 26(9):2810–2815.
- [MADR, 2015] MADR (2015). Plan de acción para la reforestación comercial. Technical report, Ministerio De Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio De Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá, Colombia.
- [Maiti, 2006] Maiti, S. (2006). Properties of mine soil and its affects on bioaccumulation of metals in tree species: case study from a large opencast coalmining project. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 20(2):96–110.
- [Maitia, 2015] Maitia, Subodh; Kumarb, A. A. J. (2015). Bioaccumulation of metals in timber and edible fruit trees growing on reclaimed coal mine overburden dumps. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*.
- [Majid, 2012] Majid, N. M.; Islam, M. M. M. L. (2012). Heavy metal uptake and translocation by mangium (*acacia mangium*) from sewage sludge contaminated soil. *Australian Journal of Crop Science*, 6(8):1228–1235.
- [Malagón, 2003] Malagón, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista Académica de Ciencias de la Tierra*, 27(104):319–341.
- [Marschner's, 2011] Marschner's (2011). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. School of Agriculture, Food and Wine The University of Adelaide, Australia, third edit edition.
- [Maryam, 2015] Maryam, G; Majid, N. I. M. A. O. A. A. (2015). Phytoremediation of copper-contaminated sewage sludge by tropical plants. *Journal of Tropical Forest Science*, 27(4):535–547.
- [Matsumoto, 2000] Matsumoto, Y; Maruyama, Y. A. L. (2000). Maximum gas exchange rate and osmotic potential in sun leaves of tropical tree species. *Tropics*, 9(3):195–209.

- [McKenney and Pedlar, 2003] McKenney, D. W. and Pedlar, J. H. (2003). Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, 175(1-3):497–507.
- [Mengel and Kirkby, 2000] Mengel, K. and Kirkby, E. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal*. International Potash Institute.
- [Mollinedo et al., 2005] Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. M., and Rudy, L. C. (2005). Relación Suelo-árbol y Factores de Sitio en plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*). 29(1):67–75.
- [Nambiar and Harwood, 2014] Nambiar, E. S. and Harwood, C. (2014). Productivity of acacia and eucalypt plantations in southeast asia. 1. bio-physical determinants of production: opportunities and challenges. *International Forestry Review*, 16(2):225–248.
- [Nambiar et al., 2014] Nambiar, E. S., Harwood, C. E., and Kien, N. D. (2014). Acacia plantations in Vietnam: research and knowledge application to secure a sustainable future. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 77(1):1–10.
- [Nimmo, 2004] Nimmo, J. R. (2004). *Encyclopedia of Soils in the Environment*, chapter Porosity and Pore Size Distribution, pages 295 – 303. Elsevier Inc.
- [Nurudin et al., 2013] Nurudin, M., Ohta, S., Hardiyanto, E., Mendham, D., Wicaksono, A., Heriyanto, J., and Watanabe, M. (2013). Relationships between soil characteristics and productivity of acacia mangium in south sumatra. *Tropics*, 22(1):1–12.
- [Osman, 2013] Osman, K. (2013). *Forest Soils. Properties and Management*. Springer International Publishing.
- [Palmer et al., 2009] Palmer, D., Höck, B., Kimberley, M., Watt, M., Lowe, D., and Payn, T. (2009). Comparison of spatial prediction techniques for developing *Pinus radiata* productivity surfaces across New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 258(9):2046–2055.
- [Pavlotzky, 2012] Pavlotzky, B; Murillo, O. (2012). Ganancia Genética esperada en *Acacia mangium* en los Chiles, zona norte de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1):93–106.
- [Peña, 2002] Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Alianza Editorial, Madrid, España.
- [Peña, 2005] Peña, D. (2005). *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial, Madrid, España.

- [Perin et al., 2013] Perin, J., Hébert, J., Brostaux, Y., Lejeune, P., and Claessens, H. (2013). Modelling the top-height growth and site index of Norway spruce in Southern Belgium. *Forest Ecology and Management*, 298:62–70.
- [Pilon et al., 2009] Pilon, M., Cohu, C. M., Ravet, K., Abdel-Ghany, S. E., and Gaymard, F. (2009). Essential transition metal homeostasis in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3):347–357.
- [Rencher and Schaalje, 2008] Rencher, A. and Schaalje, B. (2008). *Linear Models in Statistics. Second edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- [Rivas et al., 2004] Rivas, L., Phanor, H., Amézquita, E., and Molina, D. (2004). Manejo y uso de suelos de la altillanura colombiana. análisis económico de una estrategia para su conservación y mejoramiento: Construcción de la capa arable. Technical report, Centro Internacional de Agricultura Tropical. CIAT.
- [Rubilar et al., 2010] Rubilar, R. a., Allen, H. L., Alvarez, J. S., Albaugh, T. J., Fox, T. R., and Stape, J. L. (2010). Silvicultural manipulation and site effect on above and below-ground biomass equations for young *Pinus radiata*. *Biomass and Bioenergy*, 34(12):1825–1837.
- [Sabatia and Burkhart, 2014] Sabatia, C. O. and Burkhart, H. E. (2014). Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables. *Forest Ecology and Management*, 326:142–156.
- [Scrucca, 2004] Scrucca, L. (2004). qcc: an R package for quality control charting and statistical process control. *R News*, 4(June):1–46.
- [Seiler, 2012] Seiler, S. F. (2012). Short-term changes in biomass partitioning of two full-sib clones of *Pinus taeda* L. under differing fertilizer regimes over 4months. *Trees*, 26(3):951–961.
- [Sein, 2011] Sein, Ch & Mitlhner, R. (2011). *Acacia mangium Willd. Ecology and silviculture in Vietnam*. CIFOR, Center for International Forestry Research.
- [Sen, 1990] Sen, Ashish; Srivastava, M. (1990). *Regression Analysis Theory, Methods, and Applications*. Springer - Verlag Inc. Springer Texts in Statistics.
- [Shibli Mohd; Nik Muhamad Majid; Noor Azhar, 2013] Shibli Mohd; Nik Muhamad Majid; Noor Azhar, M. S. A. A. (2013). Growth performance, biomass and phytoextraction efficiency of acacia mangium and melaleuca cajuputi in remediating heavy metal contaminated soil. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(4):310–316.

- [Soltani and Sinclair, 2012] Soltani, A. and Sinclair, T. (2012). *Modeling Physiology of crop development, growth and yield*. CAB International, Oxford - UK , Cambridge - USA, cab intern edition.
- [Strigul et al., 2012] Strigul, N., Florescu, I., Welden, a. R., and Michalczewski, F. (2012). Modelling of forest stand dynamics using Markov chains. *Environmental Modelling & Software*, 31:64–75.
- [Sun et al., 2008] Sun, X., He, Z., and Kabrick, J. (2008). Bayesian spatial prediction of the site index in the study of the Missouri Ozark Forest Ecosystem Project. *Computational Statistics and Data Analysis*, 52(7):3749–3764.
- [Taiz L. & Zeiger, 2010] Taiz L. & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*, volume 1. Suderland.
- [Team, 2015] Team, R. C. (2015). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, vr. 3.2.2. edition.
- [Torres & Del Valle, 2007] Torres & Del Valle, J. I. (2007). Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forests*, 34(3):293–305.
- [UPRA, 2015] UPRA (2015). Zonificación para plantaciones forestales con fines comerciales - Colombia. Escala 1:100.000. Technical report, Unidad de Planificación de Tierras Rurales, Adecuación de Tierras y Usos Agropecuarios, UPRA, Unidad de Planificación de Tierras Rurales, Adecuación de Tierras y Usos Agropecuarios. Bogotá, Colombia.
- [USDA, 2014] USDA (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Soil Survey Staff, United States Department of Agriculture.
- [Velde and Meunier, 2008] Velde, B. and Meunier, A. (2008). *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Venn, 2001] Venn, T.J. & Harrison, S. (2001). Stand yield models for australian eucalypts and acacia plantations in philippines. Technical report, Harrison S, Herbohn J (eds) Socio-economics evaluation of the potential for Australian tree species in the Philippines.
- [Verbeke et al., 2009] Verbeke, G., Fitzmaurice, G., Davivan, M., and Molenberghs, G. (2009). *Longitudinal Data Analysis*. Taylor & Francis Group.
- [Wang et al., 2010] Wang, F., Li, Z., Xia, H., Zou, B., Li, N., Liu, J., and Zhu, W. (2010). Effects of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species on soil properties and nitrogen transformation during forest restoration in southern China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(2):297–306.

- [Wang et al., 2005] Wang, Y., Raulier, F., and Ung, C.-H. (2005). Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods A case study of lodgepole pine productivity. *Forest Ecology and Management*, 214(1-3):201–211.
- [West, 2014] West, P. (2014). *Growing Plantation Forests*. Springer International Publishing Switzerland.
- [Whitehead and Beadle, 2004] Whitehead, D. and Beadle, C. L. (2004). Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2):113–140.
- [Yue et al., 2014] Yue, C., Mäkinen, H., Klädtke, J., and Kohnle, U. (2014). An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on spatially and temporally disjunct measurement series. *Forest Ecology and Management*, 323:10–19.
- [Zapata, 2006] Zapata, R. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- [Zertuche and Cantú Sifuentes, 2008] Zertuche, L. and Cantú Sifuentes, M. (2008). A performance comparison among the Hotelling T² and the rank classification control charts. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 9(3):205–215.