



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Predicción de rendimientos para  
plantaciones de *Acacia mangium*  
Willd. en la altillanura plana a partir  
de variables biofísicas

Silvia Marcela Caguasango Eraso

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias - Escuela de Posgrados  
Bogotá, Colombia  
2017



# Predicción de rendimientos para plantaciones de *Acacia mangium* Willd. en la altillanura plana a partir de variables biofísicas

**Silvia Marcela Caguasango Eraso**  
Ingeniera Forestal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ciencias Agrarias**

**Director:**

**Ph.D., MSc, I. Agrónomo, Jaime Humberto Bernal Riobo**  
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA

**Codirectora:**

**Ph.D., MSc, Agróloga, Yolanda Rubiano Sanabria**  
Universidad Nacional

Grupo de Investigación:

Desarrollo sostenible y gestión ambiental

Línea de investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias - Escuela de Posgrados  
Bogotá, Colombia  
2017





## A mis padres Gerardo y María Teresa

Por su inigualable amor, apoyo, compañía, confianza y ejemplo, componentes indispensables en mi formación como ser humano y como profesional. Es un gran privilegio tenerlos como padres, tanto esfuerzo y sacrificio a veces incomprensidos, sólo se le entregan a alguien muy querido. Muchas gracias por darme tanto de todo y todo de ustedes. Este logro de vida, los anteriores y todos los que vendrán siempre serán suyos. Con todo mi cariño y admiración.

*”La educación es el motor fundamental para transformar la sociedad(... ). Sin una educación capaz de contemplar las funciones más importantes de la inteligencia cultivaremos siervos y no pensadores, nuestra especie será enferma, formará personas enfermas para un sistema enfermo...”*

*Augusto Cury*



# Agradecimientos

Deseo expresar toda mi gratitud principalmente a mis padres y hermanos Margarita, Gerardo, Natalia, Lugosi y Nacho por la confianza, apoyo y comprensión durante toda mi vida.

Agradezco a la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo y a la empresa Monómeros S.A. por el apoyo económico recibido durante mis estudios.

Al Doctor Jaime Bernal por su dirección, a mi codirectora la Doctora Yolanda Rubiano Sanabria por su permanente apoyo, valiosos aportes y confianza.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) por la información y datos aportados, al Ingeniero Albert Julesmar Gutiérrez por su amable disposición para el desarrollo de la presente investigación.

A la Escuela de Posgrados de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y su cuerpo docente, por aportar en mi formación académica.

Al International Plant Nutrition Institute (IPNI) por el reconocimiento recibido y muy especialmente al Doctor Raúl Jaramillo por su permanente apoyo y confianza.

A los Docentes Fernando Santa y Enrique Darghan por su incondicional y paciente respaldo en el procesamiento de datos e información desde el inicio hasta el final de este trabajo.

Al Doctor Alfredo Alvarado por sus valiosos aportes y sugerencias en nutrición forestal.

Al I.A. Jeiner Buitrago por su oportuna colaboración en el procesamiento de imágenes.

A mis amigas y colegas Johana Herrera Montoya e Ivon Fernanda Almonacid por sus aportes geográficos. A mi gran y único amor Dani López Martín por su indispensable apoyo, aliento y compañía en la culminación de este proceso.

A todos mis amigos por su amistad y apoyo durante toda este tiempo y por seguir compartiendo conmigo los buenos y no tan buenos momentos. Y a todos aquellos que de una manera u otra aportaron para la exitosa culminación de la presente investigación.

Muchas gracias.



---

## Resumen

A pesar de las limitadas condiciones edafoclimáticas propias de la altillanura plana colombiana, como suelos muy ácidos, de baja fertilidad y periodos prolongados de sequía, la especie arbórea *Acacia mangium* ha logrado establecerse, debido principalmente a su fácil adaptabilidad y rápido crecimiento.

No obstante, luego del desarrollo de programas fertilización y de mejoramiento genético a través de la selección de los mejores genotipos para ser usados en programas de reforestación comercial, se ha encontrado que en algunas áreas sembradas de esta región, los rendimientos (volumen  $m^3ha^{-1}$ ) se presentan como económicamente inviables e inferiores a plantaciones establecidas en otras regiones y países.

De acuerdo con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF), el incremento medio anual (IMA) promedio para los rodales de la altillanura es de  $6m^3ha^{-1} año^{-1}$  [CONIF, 2013a]. Ambas instituciones resaltan la necesidad de correlacionar la información silvicultural obtenida con variables biofísicas (clima, relieve, suelos) y labores de manejo, con el fin de encontrar los mejores sitios de establecimiento y tratamientos silviculturales para esta especie en la altillanura plana colombiana.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación, fue identificar los parámetros biofísicos que condicionaron el crecimiento de la especie *Acacia mangium* en plantaciones comerciales de 1, 3 y 5 años de edad en la altillanura plana colombiana, implementando un modelo autoregresivo de primer orden (AR1) en función de la producción de volumen ( $m^3ha^{-1}$ ).

Se contó con el registro de 45 variables de dos años de medición, que incluyó parámetros físicos y químicos edáficos, contenidos foliares y características del terreno como profundidad efectiva, pendiente del terreno y el tipo de mecanización implementada en el suelo, antes del establecimiento de la plantación.

Se encontró que los contenidos de carbono orgánico en el suelo por encima del  $> 3\%$  y las labores de mecanización total del lote previas al establecimiento de los rodales, favorecen significativamente la producción de volumen. Así mismo, se identificó que los terrenos con las menores pendientes ( $< 7\%$ ) resultan más favorables para el adecuado crecimiento de esta especie. En contraste, se determinó que las concentraciones de zinc en tejido foliar mayores a  $100mgkg^{-1}$  y de cobre edáfico mayores a  $3mgkg^{-1}$ , ejercen un efecto poco favorable en la producción de volumen de *A. mangium* en esta región.

Finalmente, con el propósito de aportar herramientas de manejo y zonificación forestal para

la zona de estudio, se graficaron intervalos de predicción. De esta manera, se encontró que en el departamento del Meta existen algunos suelos que bajo labores específicas de manejo podrían ser aptos para el establecimiento de nuevos rodales de esta especie, con un rango probable de rendimiento entre 30 y 50  $m^3ha^{-1}$ . Así mismo, se identificaron suelos principalmente en el departamento de Vichada, con características poco deseables y en consecuencia no aptos para el desarrollo de plantaciones comerciales de *A. mangium*.

**Palabras clave:** Acacia, volumen, modelo autoregresivo, oxisol, ultisol, altillanura.

## Abstract

In spite of the limited edaphoclimatic conditions typical of the Colombian flat altillanura, such as very acid soils, low fertility and prolonged periods of drought, the tree species *A. mangium* has been established, mainly due to its easy adaptability and rapid growth.

However, after the development of fertilization and breeding programs through the selection of the best genotypes to be used in commercial reforestation programs, it has been found that in some areas planted in this region yields (volume  $m^3ha^{-1}$ ) are presented as economically unviable and inferior to plantations established in other regions and countries.

The objective of the present investigation was to identify the biophysical parameters that conditioned the growth of the *A. mangium* species in commercial plantations of 1, 3 and 5 years of age in the Colombian flat altillanura, implementing a first order autoregressive model (AR1) in function of volume production ( $m^3ha^{-1}$ ).

It was recorded 45 variables of two years of measurement, including soil physical and chemical parameters, foliar contents and soil characteristics such as effective depth, slope of the land and the type of mechanization implemented in the soil before planting.

It was found that the contents of organic carbon above  $< 3\%$  and the work of total mechanization of the lot before the establishment of the stands, favor significantly the production of volume. Likewise, it was identified that the land with lower slopes ( $< 7\%$ ) are more favorable for the adequate growth of this species. In contrast, it was determined that concentrations of zinc in foliar tissue greater than 100  $mgkg^{-1}$  and of edaphic copper greater than 3  $mgkg^{-1}$ , which exert an unfavorable effect on the production of *A. mangium* volume in this region.

Finally, in order to provide forest management and zoning tools for the study area, prediction intervals were plotted. In this way, it was found that in the department of Meta there are some soils that under specific management tasks could be suitable for the establishment of new stands of this species, with a probable range of performance at 4 years of age between

30 and 50  $m^3ha^{-1}$ . Also, soils were identified mainly in the department of Vichada, with undesirable characteristics and consequently not suitable for the development of commercial plantations of *A. mangium*.

**Keywords:** Acacia, volume, autoregressive model, oxisol, ultisol, altillanura.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Introducción</b>	<b>20</b>
<b>1. Objetivos</b>	<b>21</b>
1.1. General . . . . .	21
1.1.1. Específicos . . . . .	21
<b>2. Revisión de literatura</b>	<b>22</b>
2.1. Calidad de Sitio (CS) . . . . .	22
2.2. Acacia mangium Wild. “Acacia” . . . . .	23
2.2.1. Requerimientos edafoclimáticos . . . . .	27
2.3. Modelos estadísticos . . . . .	29
2.3.1. Modelo Autoregresivo de primer orden: AR (1) . . . . .	31
2.3.2. Intervalos de predicción . . . . .	32
2.3.3. Modelado en Ciencias Forestales . . . . .	32
2.4. Altillanura plana colombiana . . . . .	33
2.4.1. Acacia en la altillanura plana . . . . .	38
<b>3. Materiales y métodos</b>	<b>40</b>
3.1. Estrategia metodológica . . . . .	40
3.2. Localización plantaciones forestales . . . . .	40
3.3. Métodos . . . . .	43
3.3.1. Registro de datos en parcelas de muestreo . . . . .	43
3.3.2. Mapa de pendientes del terreno . . . . .	43
3.3.3. Base de datos . . . . .	43
3.3.4. Análisis descriptivo y exploratorio de la información . . . . .	44
3.3.5. Descripción oferta edáfica y diagnóstico nutricional . . . . .	45
3.3.6. Selección de variables y formulación del modelo . . . . .	46
3.3.7. Cálculo de intervalos de predicción . . . . .	47
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>48</b>
4.1. Depuración de la base de datos . . . . .	48
4.2. Análisis exploratorio y descriptivo de los datos . . . . .	48



---

4.3. Oferta edáfica de la altillanura plana para <i>A. mangium</i> . . . . .	50
4.3.1. Parámetros químicos . . . . .	50
4.3.2. Parámetros físicos . . . . .	55
4.3.3. Características biofísicas . . . . .	59
4.3.4. Diagnóstico nutricional - contenidos foliares . . . . .	64
4.4. Análisis de componentes principales (ACP) . . . . .	67
4.4.1. Selección de variables . . . . .	73
4.5. Modelo de predicción de rendimientos . . . . .	74
4.5.1. Variable de respuesta: Volumen ( $m^3ha^{-1}$ ) . . . . .	74
4.5.2. Modelo Autoregresivo (AR1) . . . . .	78
4.5.3. Especificación del modelo . . . . .	79
4.5.4. Estimación de parámetros . . . . .	81
4.5.5. Diagnóstico del modelo . . . . .	82
4.6. Caracterización del crecimiento y adaptabilidad de <i>Acacia mangium</i> a la altillanura plana . . . . .	87
4.7. Zonas potenciales para producción de <i>Acacia mangium</i> en la altillanura plana	90
<b>5. Conclusiones</b>	<b>96</b>
<b>Referencias</b>	<b>106</b>

# Índice de tablas

2-1. Registros silviculturales de rodales de <i>Acacia mangium</i> Willd., en diferentes países. . . . .	25
2-2. Requerimientos edafoclimáticos y rangos de tolerancia de la especie <i>Acacia mangium</i> . . . . .	29
2-3. Descripción general de Unidades Cartográficas de Suelos (UCS). . . . .	35
2-4. Incremento medio anual (IMA) de rodales de <i>Acacia mangium</i> Willd., en la altillanura plana. . . . .	38
3-1. Variables registradas para cada periodo de muestreo en plantaciones de <i>Acacia mangium</i> . . . . .	44
3-2. Criterios generales de interpretación de análisis químicos de suelos. . . . .	45
3-3. Criterios de interpretación de contenidos foliares para <i>Acacia mangium</i> con base en materia seca. . . . .	46
4-1. Descripción general y diagnóstico nutricional de variables químicas edáficas para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2). . . . .	51
4-2. Capacidad de intercambio catiónico efectiva y saturación de bases en el complejo de cambio. . . . .	53
4-3. Descripción general de variables físicas edáficas para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2). . . . .	56
4-4. Descripción general de variables del paisaje para los dos periodos de muestreo (año 1 y año 2) . . . . .	59
4-5. Descripción general y diagnóstico nutricional de concentraciones foliares de <i>A. mangium</i> en dos periodos de muestreo (año 1 y año 2) . . . . .	65
4-6. Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de contenidos foliares. . . . .	68
4-7. Correlación de variables foliares originales con componentes. . . . .	69
4-8. Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de variables químicas edáficas. . . . .	70
4-9. Correlación de variables químicas edáficas originales con componentes. . . . .	70
4-10. Valores propios y porcentaje de varianza para componentes de variables químicas edáficas. . . . .	71
4-11. Correlación de variables edáficas físicas originales con componentes. . . . .	72
4-12. Variables originales seleccionadas del ACP. . . . .	73

---

4-13.Covariables a incluir en el modelo explicativo. . . . .	74
4-14.Estadígrafos descriptivos para producción de volumen de plantaciones de <i>A. mangium</i> en los dos periodos (año 1 y años 2) de muestreo. . . . .	74
4-15.Metodologías implementadas y configuración de variables y base de datos. . . . .	77
4-16.Parámetros estimados y su significancia. . . . .	81
4-17.Resumen del diagnóstico numérico de modelo propuesto. . . . .	82
4-18.Descripción general de Unidades Cartográficas de Suelos (UCS). . . . .	91
4-19.Calificación de producción de volumen de madera ( $m^3ha^{-1}$ ) obtenidos para cada Unidad Cartográfica de Suelo (UCS). . . . .	92
4-20.Intervalo de predicción para Unidades Cartográficas de Suelos (UCS). . . . .	92

# Índice de figuras

2-1. Individuo de <i>Acacia mangium</i> en condiciones naturales. . . . .	24
2-2. Rodales de <i>Acacia mangium</i> de tres años de edad de calidad de sitio media en Sumatra Indonesia). . . . .	26
2-3. Distribución porcentual de plantaciones forestales de <i>Acacia mangium</i> en Colombia. . . . .	27
2-4. Panorámica de altillanura plana. Puerto Carreño (Vichada) . . . . .	36
2-5. Unidades Cartográficas de Suelos y localización de perfiles modales . . . . .	37
2-6. Plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en la altillanura plana de menor crecimiento ( $IS = IV$ ). . . . .	39
2-7. Plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en la altillanura plana de mayor crecimiento ( $IS = I$ ). . . . .	39
3-1. Diagrama de flujo metodología general . . . . .	41
3-2. Localización general de las parcelas de muestreo y unidades cartográficas de suelos en el área de estudio. . . . .	42
4-1. Control multivariante de clasificación por rangos para parcelas de muestreo. . . . .	50
4-2. Distribución de tamaño de poro en suelos del área de estudio. . . . .	58
4-3. Mapa de pendientes para Zona 1 . . . . .	61
4-4. Mapa de pendientes para Zona 2 . . . . .	62
4-5. Mapa de pendientes para Zona 2 . . . . .	63
4-6. Coeficientes de bioacumulación de diferentes metales en hojas . . . . .	66
4-7. Factores de bioacumulación de metales en árboles maderables establecidos en suelos de minas de carbón en recuperación. . . . .	67
4-8. Productividad de plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en el primer (año 1) periodo de muestreo. . . . .	75
4-9. Productividad de plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en el segundo (año 2) periodo de muestreo. . . . .	75
4-10. Comportamiento del volumen promedio de plantaciones de <i>Acacia mangium</i> en los dos periodos de muestreo . . . . .	76
4-11. Dispersograma rezagado hasta el cuarto periodo. . . . .	79
4-12. Correlograma para perturbaciones hasta cuarto rezago. . . . .	80
4-13. Diagnóstico gráfico de linealidad en el modelo propuesto. . . . .	83
4-14. Diagnóstico gráfico de homocedasticidad en los residuales del modelo obtenido. . . . .	84

---

4-15.	Gráfico cuantil - cuartil. Diagnóstico gráfico de normalidad residual. . . . .	85
4-16.	Diagrama de residuales. Diagnóstico gráfico de normalidad residual. . . . .	85
4-17.	Histograma de residuales. Diagnóstico gráfico de normalidad residual. . . . .	85
4-18.	Dispersograma rezagado corregido. . . . .	86
4-19.	Correlograma corregido. . . . .	87
4-20.	Perfil con horizonte Ap con alto contenido de MO y su correspondiente rodal con alta productividad. . . . .	88
4-21.	Perfil con horizonte capa de plintita a 40cm y su correspondiente rodal con baja productividad. . . . .	88
4-22.	Descripción general de Unidades Cartográficas de Suelos (UCS). . . . .	92
4-23.	Zonas productivas para <i>A. magium</i> en la altillanura plana . . . . .	94
4-24.	Aptitud para plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Escala 1:100.000. . . . .	95



# Introducción

Después del petróleo y el gas, el mercado forestal es el tercero por su volumen, en el mundo [FAO, 2016]. El crecimiento tanto de la población como de su capacidad adquisitiva, incrementan continuamente la demanda de madera, la cual se supe de plantaciones comerciales e infortunadamente de bosques naturales. En Colombia existen alrededor de 0,3 millones de hectáreas plantadas [FAO, 2016], que producen el 0,34 % de la madera que se consume en el mundo, cifras poco representativas, teniendo en cuenta que el área apta para reforestación a nivel nacional es de cerca de veinticinco millones (25.000.000) de hectáreas, lo que equivale al 21,8 % del territorio nacional [UPRA, 2015].

En este momento en Colombia existe gran interés en la especie *Acacia mangium* Willd., debido a la fácil adaptabilidad y rápido crecimiento que presentan las actuales plantaciones. No obstante, luego de varios años de desarrollo de programas de mejoramiento genético a través de la selección de los mejores genotipos para ser usados en programas de reforestación comercial, se ha encontrado que en algunas regiones sembradas, los rendimientos no son económicamente viables y son inferiores a plantaciones establecidas en otras regiones y países.

Si bien el mejoramiento genético y demás herramientas de manejo silvicultural han dado importantes avances a nivel mundial, un tratamiento más específico (silvicultura de precisión), adaptado a las necesidades y condiciones del territorio colombiano es indispensable, puesto que tendría mayor repercusión en la productividad de los rodales a través de estrategias de manejo y ordenación forestal eficaces [Bontemps, 2014].

Del 6,10 % del área con vocación forestal para la producción comercial en la Orinoquia, los departamentos Meta y Vichada tienen la mayor extensión con áreas superiores a 2.500.000 hectáreas cada uno [UPRA, 2015], lo que los convierte en zonas promisorias para la siembra de especies maderables en el país, que a futuro abastecerán de materia prima a diferentes industrias madereras nacionales e internacionales.

La Orinoquia colombiana posee condiciones climáticas que permiten el establecimiento de la especie, pero debe analizarse con detalle la situación específica del suelo para lograr un crecimiento óptimo. Sin los debidos criterios técnicos pueden presentarse inconvenientes, pues la *Acacia* es prodigiosa en materia ambiental, pero en términos económicos para que sea productiva es indispensable el manejo [Torres & Del Valle, 2007].

En un alto porcentaje las reforestadoras de la Orinoquia han optado por plantar *A. mangium*, dada su alta capacidad adaptativa y plasticidad biológica a diferentes ambientes, su aptitud de crecimiento y la posibilidad de generar rápidos cambios en el paisaje, de lo cual se referencian ejemplos evidentes de adaptación a regiones con características edáficas y climáticas similares, como son los llanos de Venezuela y el cerrado brasileño [CONIF, 2013].

A nivel nacional, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR, 2015], reporta para *A. mangium* incrementos medios anuales (IMA) promedio de 26 a  $30m^3ha^{-1} año^{-1}$  y turnos (tiempo de aprovechamiento) de 12 años. No obstante, de acuerdo con León y García [2007], el IMA registrado para las plantaciones establecidas en la altillanura es en promedio de  $10m^3ha^{-1} año^{-1}$ .

Las plantaciones forestales como actividad económica, son una excelente alternativa para el uso de la tierra, por lo que su exitosa continuidad en el tiempo, dependerá de la capacidad de manejo de los profesionales para obtener altas productividades y madera de calidad. Por lo tanto, es importante generar una integración entre los sitios, genotipos y prácticas silviculturales, como estrategia para superar problemas de estrés ambiental y crecimiento [Gonçalves et al., 2013].

Una de las actuales herramientas de manejo de plantaciones forestales denominada *Calidad de Sitio (CS)* permite hacer una interpretación holística del crecimiento y la productividad de un rodal. Éste concepto se basa en la interacción de parámetros de crecimiento de los individuos (altura, diámetro, incremento medio anual) y las características del medio en el que se desarrollan [Sabatia and Burkhart, 2014].

En este sentido, con la presente investigación se identificaron algunas características del medio que condicionaron significativamente la productividad de la especie *A. mangium* en la altillanura, para obtener información que se convierta en una herramienta de manejo y base en la toma de decisiones en una futura zonificación de la altillanura plana colombiana con fines de reforestación comercial.



# 1 Objetivos

## 1.1. General

Desarrollar un modelo que relacione el volumen rodal en plantaciones de *Acacia mangium* Willd., a partir de variables biofísicas disponibles de interés forestal.

### 1.1.1. Específicos

- Identificar algunos parámetros biofísicos que afectan el crecimiento de la especie *Acacia mangium* Willd., en la altillanura plana.
- Representar gráficamente intervalos de predicción del volumen en plantaciones forestales de *Acacia mangium* Willd., asociado a unidades cartográficas de suelo.

## 2 Revisión de literatura

El manejo de plantaciones forestales es objeto de diversas investigaciones a nivel mundial con el propósito entre otros, de entender su dinámica como ecosistema, lograr el incremento de la productividad y así satisfacer eficientemente los requerimientos del mercado.

Las plantaciones forestales como actividad económica, son una excelente alternativa para el uso de la tierra, por lo que su exitosa continuidad en el tiempo, dependerá de la capacidad de manejo de los profesionales para obtener altas productividades y madera de calidad. Por lo tanto, es importante generar una integración entre los sitios, genotipos y prácticas silviculturales, como estrategia para superar, problemas de estrés ambiental y crecimiento [Gonçalves et al., 2013].

### 2.1. Calidad de Sitio (CS)

Una de las herramientas de uso frecuente (desde finales del siglo XIX) en el manejo forestal y actualmente incluida en los modelos de crecimiento, es el *índice de Sitio (IS)* [Rubilar et al., 2010], un parámetro silvicultural que estima la capacidad de producción de un rodal a partir de la altura dominante y edad base de un número determinado de árboles [Anyomi et al., 2013, Johansson, 2006, Wang et al., 2005]. Es una expresión matemática, razón, fórmula o dimensión que relaciona la altura, el incremento medio anual (IMA) o volumen con respecto a la edad del rodal [Laamrani et al., 2014, Krisnawati, 2016].

Calidad de Sitio (CS) es un concepto reciente, empleado para identificar y cuantificar, la aptitud del lugar donde se encuentra establecida o dónde lo será a futuro, una plantación forestal [Yue et al., 2014]. Se basa en la interacción de parámetros de crecimiento de los individuos (altura, diámetro, área basal, volumen) y las características del medio en el que se desarrollan, tales como clima, relieve, suelos, pendiente del terreno y tantas como el investigador desee incluir en el análisis [Sabatia and Burkhart, 2014].

La Calidad de Sitio (CS) es el resultado de la interacción de variables ambientales con la vegetación existente, es el equivalente a capacidad de uso de la tierra en el área agrícola, que ha servido para demostrar que al contrario de lo que se pensaba en el pasado, los suelos degradados, infértiles, poco profundos y mal drenados, no son en general, aptos para la

producción forestal de alto rendimiento [Farrelly et al., 2011][Seiler, 2012].

El desarrollo de plantaciones forestales como respuesta a las condiciones de sitio, ha sido investigada alrededor del mundo por diferentes autores como Sabatia & Burkhart [2014], Yue *et al.*, [2014], Bontemps & Bouriaud [2014], Stovall *et al.*[2012], Rubilar *et al.*[2010], entre otros, a través de modelos que intentan explicar y predecir las diferencias de productividad, en función de las variables climáticas, el suministro de nutrientes y las variantes de manejo silvicultural. La base de estos modelos es la función biológica de los sistemas que conducen al crecimiento y permiten una interpretación de las variables ambientales y del sitio que están condicionando la productividad [Keyser and Brown, 2014, Perin et al., 2013, Whitehead and Beadle, 2004].

Por ende la *Calidad de Sitio (CS)*, el *Índice de Sitio (IS)* y todas las implicaciones de manejo, tienen significado exclusivamente para la especie en cuestión con respecto a un área determinada, dado que un lugar con un excelente calidad de sitio (potencial productivo alto) para una especie, podría ser muy deficiente (potencial productivo bajo) para otra [Kitikidou et al., 2012] [Bontemps, 2014].

Hace algunas décadas, mencionar el tema de nutrición y fertilización forestal se consideraba un sin sentido, pues los árboles debían “crecer solos” y de acuerdo a las prácticas de entonces, “en suelos de vocación forestal”, es decir, aquellos en los que no se podía realizar actividades agrícolas [Rubilar et al., 2010]. La idea de que las plantaciones forestales debían ocupar suelos de baja fertilidad para darle espacio a los sembradíos agrícolas en los mejores terrenos, parecía ser aceptada por los especialistas forestales, sin considerar las necesidades nutricionales de los árboles, tendencia que aún en algunos lugares del mundo perdura [Mollinedo et al., 2005].

Hoy en día, no se duda de que los árboles puedan crecer de esa manera y en esos sitios; sin embargo, se trata de maximizar su rendimiento, ya sea a través de especies adaptadas a condiciones específicas, o de mejorar el medio en el que los árboles deben crecer a través de prácticas silviculturales que implican el manejo y por ende, conocimiento de las propiedades del suelo. Variables como la textura, estructura, profundidad efectiva, pH, contenido de materia orgánica, pedregosidad y aún el color, han sido evaluadas individualmente o en conjunto, para explicar el crecimiento de rodales forestales [Epron et al., 2013].

## 2.2. *Acacia mangium* Wild. “Acacia”

*A. mangium* es una especie heliófita perteneciente a la familia Leguminosae, nativa del noroeste de Australia, del este de Indonesia, incluyendo las islas Molucas y Papúa-Nueva

Guinea (Ferrari y Wall, 2004), crece naturalmente en suelos altamente intemperizados, arcillosos y franco arenosos, ácidos y fuertemente ácidos en bosques húmedos y muy húmedos tropicales con precipitaciones anuales entre 1500 y 3000 mm, temperatura media anual de 27 y altitudinalmente por debajo de los 300 msnm [Nurudin et al., 2013].



Figura 2-1: Individuo de *Acacia mangium* en condiciones naturales.

Fuente: [West, 2014].

Un individuo maduro puede alcanzar 25 a 30 m de altura y 45 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP). Su fuste es recto y libre de ramas hasta más de la mitad de la altura total del árbol, aunque presenta algunas tendencias a producir más de un eje y bifurcarse a diferentes alturas[Pavlotzky, 2012].

La madera presenta poca albura, es de color crema blanco y el duramen de color café claro, con bandas café oscuro. Es moderadamente pesada, con una gravedad específica de  $0,50\text{gcm}^{-3}$ , es de fácil secado y trabajabilidad, por lo que es comúnmente empleada en mueblería, construcción, tableros y aglomerados, está calificada como semidura, resistente y apta para múltiples usos (Torres Vélez & Del Valle, 2007). Muy apetecida mundialmente

por la calidad de su pulpa por la industria papelera [Alvarado, 2012].

En el mundo existen cerca de 7 millones de hectáreas sembradas con esta especie, distribuidas en Asia, África, América del Sur, América Central y Oceanía; siendo el sudeste asiático (Malasia, Tailandia, Indonesia, India, Filipinas y Vietnam) la región con mayor número de hectáreas plantadas (3.500.000). En Latinoamérica se encuentran plantaciones comerciales en Venezuela, Panamá, Costa Rica, Colombia y Brasil [FAO, 2016].

En la Tabla **2-1** se relacionan los rendimientos de algunos rodales comerciales en diferentes países. Es importante mencionar que son incontables los modelos de crecimiento y tablas estándar que se emplean para estimar el volumen comercial de especies arbóreas y cada silvicultor o empresa reforestadora adopta las que se ajustan a su rodal o plantea unas propias [Krisnawati, 2016]. Así mismo, las condiciones ambientales de cada lugar varían, si bien existen algunas similitudes en el tipo suelo y clima, el manejo silvicultural (podas, raleos, entresacas), manejo de la fertilidad y el material genético, época de siembra de cada rodal, entre otras, es completamente disímil. Por tal razón, se debe ser cuidadoso al hacer comparaciones y se destaca que los registros presentados a continuación (Ver Tabla **2-1**), se presentan con el fin de mostrar el potencial industrial y de producción que tiene la especie.

Tabla **2-1**: Registros silviculturales de rodales de *Acacia mangium* Willd., en diferentes países.

País	Edad (años)	Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ )	IMA (altura) ( $m an\tilde{o}^{-1}$ )	IMA (DAP) ( $cm an\tilde{o}^{-1}$ )	Fuente
Vietnam	7	60,7	2,8	2,7	[Sein, 2011]
Brasil	7	43	**	**	[Garay et al., 2004]
Vietnam	6	30	1,9	2,6	[Nambiar et al., 2014]
Sumatra (Indonesia)	4,5	198	5	4	[Nurudin et al., 2013]
		99	3,5	2,8	
Filipinas	4	**	3,5	6,5	[Venn, 2001]
Costa Rica	4	30,3	**	**	[Pavlotzky, 2012]
América Central	3	82,5	2,5	3,2	[CATIE, 1992]
		43,2	1,9	2,4	
		17,3	1,3	1,6	
Indonesia	3	**	3,5	3,5	[Krisnawati, 2011]
Altillanura plana (Colombia)	3,5	27,5	2,8	2,6	CONIF [2013a]

IMA: Incremento Medio Anual; DAP: Diámetro a la altura del pecho. \*\*No reportado.

Los autores referenciados en la Tabla **2-1** reportan suelos de los órdenes ultisol y oxisol de acuerdo con el sistema de clasificación *USDA* (United States Department of Agriculture), en

las plantaciones de Brasil, Costa Rica, Colombia y América Central. Para los rodales de los países asiáticos (Vietnam, Indonesia y Filipinas) los autores reportan los suelos homólogos de acuerdo con el sistema de clasificación *WRB* (World Reference Base) tales como Ferrasoles y Acrisoles.

Es de anotar que para las plantaciones de Sumatra (Indonesia) (Figura 2-2) y de América Central (Costa Rica, Honduras y Panamá), los rendimientos presentados corresponden a rodales con calidades de sitio y manejo silvicultural diferente, pero de la misma edad, evidenciando la alta variabilidad que se presenta a escala regional [Bontemps, 2014]. En Filipinas por ejemplo, en los mejores sitios se han reportado IMA de  $45m^3ha^{-1} an\tilde{o}^{-1}$  y en sitios de calidad media de  $25m^3ha^{-1} an\tilde{o}^{-1}$  [Venn, 2001].



Figura 2-2: Rodales de *Acacia mangium* de tres años de edad de calidad de sitio media en Sumatra Indonesia).

Fuente: [Krisnawati, 2011]

De acuerdo con la Dirección de Cadenas Productivas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2015), en Colombia, existen plantaciones en los departamentos de Vichada con una extensión de 11934,9 ha, Córdoba 8154,7 ha, Meta 7965,5 ha, Antioquia 2381,2 ha, Casanare 430,5 ha y otros con pequeñas áreas como Arauca, Bolívar, Sucre y Tolima (Ver Figura 2-3).

Estas plantaciones son propiedad de las empresas: Reforestadora Cacerí (Antioquia), Grupo Kanguroid, Núcleo Córdoba (Córdoba), Agroforestadora Rancho Victoria, Cooperativa CORVEICA, Carbono Cero, CANAPRO, Inmunizar (Meta), Inverbosques, Aldea Forestal,

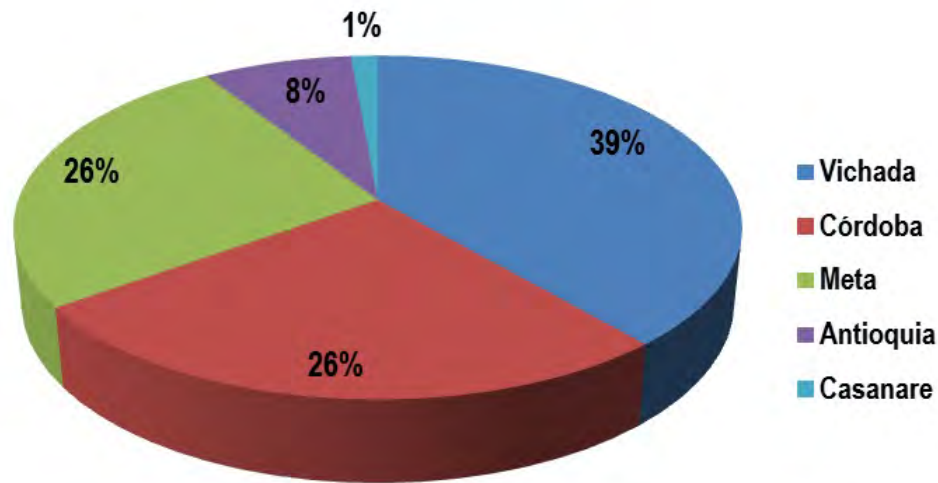


Figura 2-3: Distribución porcentual de plantaciones forestales de *Acacia mangium* en Colombia.

Fuente: Adaptado de Dirección de Cadenas Productivas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, (2015).

COPOVERDE, Reforestadora La Paz, Ecobosques (Vichada) y Refocosta en Casanare.

### 2.2.1. Requerimientos edafoclimáticos

#### Suelos

No es una especie exigente, puesto que crece casi en cualquier tipo de suelo (a excepción de los salinos o inundados), “crece sobre las rocas”, es la frase que se ha popularizado entre los reforestadores. La especie se adapta y crece en forma promisorio en distintas áreas, aún en condiciones difíciles de suelo, ya sea porque son infértiles o porque presentan cambios de estructura provocados por el pisoteo del ganado [Nambiar and Harwood, 2014, Hardiyanto and Nambiar, 2014].

Crece también en suelos erosionados, con pendiente fuerte, pH hasta de 3,5 y soporta periodos de sequía de 7 meses. Se desarrolla satisfactoriamente en suelos minerales, especialmente profundos de origen aluvial, aunque en suelos superficiales ha mostrado buen desarrollo [CATIE, 1992, Krisnawati, 2011]. En su área de origen (Queensland, Australia), los árboles se desarrollan generalmente sobre ultisoles ácidos y esporádicamente, en suelos derivados de rocas básicas. En Indonesia se reportan individuos sobre ultisoles y oxisoles [Sein, 2011].

En América central, ha crecido en forma satisfactoria en suelos de los órdenes ultisol, alfisol,

entisol, inceptisol y andisol; con pH de 4,5, bajos contenidos nutricionales, superficiales y arcillosos [Pavlotzky, 2012].

Por ser una leguminosa, esta especie establece asociaciones simbióticas con microorganismos que la convierten en una efectiva fijadora de nitrógeno; las bacterias noduladoras incluyen géneros como *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* [Osman, 2013]. Así mismo, se ha demostrado el efecto benéfico en el crecimiento con ectomicorrizas como *Pisolithus albus* y *P. tinctorius* [Amadou, 2014]. En diversas plantaciones se ha visto a nivel superficial, la red de nódulos que establece como estrategia de captación de nutrientes [Ferrari, 2004].

CATIE [1992], reporta asociación con *Thelephora ramaroides* como facilitadora en la absorción de fósforo, no obstante, se ha demostrado que el efecto benéfico sólo se presenta en vivero cuándo *A. mangium* es plántula, en otro estado *T. ramaroides* se comporta como un parásito [Amadou, 2014].

## Precipitación

El mayor potencial de *A. mangium* se ha reflejado en condiciones de bosques húmedos y muy húmedos, de las tierras bajas tropicales. La especie es nativa de áreas donde la precipitación media anual varía de 1000 a 4500 mm anuales [Sein, 2011]. Su mayor ocurrencia de forma natural, se ha reportado en zonas con 4400 mm anuales y en lugares donde ha sido plantada, se han obtenido buenos resultados con valores totales de precipitación entre los 1500 y 3100 mm anuales [Krisnawati, 2011].

## Temperatura

Dónde *A. mangium* es nativa, en la época más cálida del año, la temperatura llega hasta 34°C y en la más fría, a 12°C [Krisnawati, 2011]. Si bien la especie soporta escarcha en forma ocasional, normalmente no se le encuentra en esa condición [Sein, 2011]. En América Central, el rango de temperatura de los sitios donde se ha plantado, varía de 21°C a 27°C [Pavlotzky, 2012]; en elevaciones que van desde 30msnm en Panamá, hasta 1100 msnm en Costa Rica [Ma, 2002, Pavlotzky, 2012].

## Factores limitantes

Dadas las condiciones de su distribución natural y los resultados de algunas pruebas preliminares en diversas localidades del trópico, esta especie debe plantarse, preferiblemente en lugares húmedos, donde la precipitación sea normalmente superior a 2000 mm por año y la



temperatura sea estable, ya que los cambios abruptos generan problemas en su desarrollo [Inagaki, 2008]. Los periodos secos pronunciados (mayores a 6 meses), las inundaciones y la salinidad son indiscutiblemente factores limitantes en su crecimiento [Hardiyanto and Nambiar, 2014, Nurudin et al., 2013, Sein, 2011].

En Colombia, la Acacia se introdujo en la década de 1990 con propósitos ambientales de recuperación de suelos degradados por minería en el departamento de Antioquia, pero por sus cualidades biológicas y potencial maderable cuando se cultiva con estándares técnicos, ha sido plantada en nuevos proyectos de reforestación comercial en zonas como el Bajo Cauca Antioqueño, sur de Córdoba, Magdalena Medio y Llanos Orientales (CONIF, 2013). Es tolerante a suelos poco profundos, compactados por ganadería y arcillosos [CATIE, 1992]. Ha sido reconocida por su capacidad de crecimiento y alta producción de biomasa, en suelos degradados, ácidos, de baja fertilidad y bajos contenidos de materia orgánica [Garay et al., 2004].

Tabla 2-2: Requerimientos edafoclimáticos y rangos de tolerancia de la especie *Acacia mangium*.

Característica	Rango de tolerancia	Óptimo
Altura (m.s.n.m)	0 - 1100	100 - 800
Precipitación	1000 - 4500 mm	1500 - 2900 mm
Periodo seco	De 2 a 3 meses	Ninguno
Temperatura media	12 a 34°C	22 - 29°C
Zonas de vida	bs-T; bh-T; bmh-T	bh-T
Profundidad efectiva	Superficiales a profundos	Profundos
Pendiente	0 - 50 %	0 - 25 %
Textura	Arenosa; Franco arenosa; Arcillosa	Franco arenosa
pH	3,5 - 6	4,5 - 5,5
Fertilidad	Desde muy baja a alta	Alta
Viento	Mediana resistencia	
Factores limitantes	Salinidad, anegamiento	

bs-T: Bosque seco tropical; bh-T: Bosque húmedo tropical; bmh-T: Bosque muy húmedo tropical.

Adaptado de: Krisnawati et al., [2011]; Pavlotzky & Murillo, [2012]; Torres & Del Valle, [2007].

## 2.3. Modelos estadísticos

Con el objetivo de encontrar, describir y predecir las relaciones entre eventos en el entorno que nos rodea, se ha propuesto establecer ecuaciones o fórmulas que representen dichas can-

tidades en el mundo real. De acuerdo con [Graybill, 1974], existen cuatro tipos de modelos que son muy ricos en el número de situaciones que pueden representar en el mundo real, dos de ellos son clasificados como cualitativos y dos como cuantitativos.

Modelos Cuantitativos	Modelos Cualitativos
1. Modelo General Lineal	3. Modelos de Diseño
2. Modelo de Regresión Lineal	4. Modelos de Componentes de Varianza

El *Modelo General Lineal* es aquél que es usado para determinar  $Y$  a partir del conocimiento de  $x$ , comúnmente se escribe de la forma:

$$Y = (\mu)x + \epsilon \quad (2-1)$$

Dónde  $Y$  y  $\epsilon$  son variables aleatorias y  $(\mu)x$  es función de  $x$  y está definida como la parte determinística del modelo, mientras que el componente estocástico lo conforman  $Y$  y  $\epsilon$ , siendo esta última una variable aleatoria no observada. En general la forma funcional  $(\mu)x$  es conocida pero contiene parámetros desconocidos. La palabra “lineal” implica que  $(\mu)x$  es una función lineal de parámetros desconocidos. En un caso simple  $(\mu)x$  es definida por  $(\mu)x = \beta_0 + \beta x$ , dónde  $\beta_0 + \beta$  son parámetros desconocidos que pueden tomar cualquier número real y de esta manera el modelo puede ser escrito como:

$$Y = \beta_0 + \beta x + \epsilon \quad (2-2)$$

Dónde:  $Y$ : Variable aleatoria observable.

$\beta_0 + \beta$ : Parámetros desconocidos.

$x$ : Variable observable no aleatoria.

$\epsilon$ : Variable no observable aleatoria.

El segundo tipo de modelo cuantitativo, denominado *Modelo de Regresión Lineal*, tiene una cercana similaridad con el Modelo General Lineal, sin embargo, la principal diferencia radica en que en el modelo lineal general la(s) variable(s) independiente no es aleatoria, mientras que en el modelo de regresión lineal sí lo es [Graybill, 1974].

Es importante considerar que de acuerdo con el tipo de datos que se esté trabajando (transversales, series de tiempo, agrupados), el cumplimiento de los supuestos estadísticos varía, por ejemplo, en datos transversales es muy común encontrar problemas de heteroscedasticidad, mientras que en los de series de tiempo la autocorrelación es el más frecuente [Gujarati, 2010], definida ésta como “la correlación rezagada de una serie dada consigo misma, rezagada por un número de unidades de tiempo” [Peña, 2005].

Teniendo en cuenta que los datos en series de tiempo siguen un ordenamiento natural respecto del tiempo, es muy posible que las observaciones sucesivas muestren intercorrelaciones, sobre todo si el intervalo de las observaciones sucesivas es muy corto, como un día, una semana, un mes o inclusive un año [Gujarati, 2010, Peña, 2005]

### 2.3.1. Modelo Autoregresivo de primer orden: AR (1)

El modelo autoregresivo de primer orden se caracteriza porque la variable de respuesta se explica en parte por su valor en el periodo anterior, más un término de error [Gujarati, 2010].

$$Y_t = \beta Y_{t-1} + \epsilon_t \quad (2-3)$$

Este se conoce como esquema autoregresivo de primer orden de Markov, o simplemente como esquema autoregresivo de primer orden, y suele denotarse como  $AR(1)$ . El nombre autoregresivo es apropiado porque puede interpretarse como la regresión de  $Y_t$  sobre sí misma con un rezago de un periodo. Es de primer orden porque sólo participan  $Y_t$  y su valor pasado inmediato, es decir  $Y_{t-1}$ ; es decir, el rezago máximo es 1. Si el modelo fuera  $Y_t = Y_{t-1} + Y_{t-2} + \epsilon_t$ , sería un  $AR(2)$ [Verbeke et al., 2009, Peña, 2005].

En un modelo  $AR(p)$  el valor de la serie en el momento  $t$  es una combinación lineal de las últimas  $p$  observaciones de la variable. En el caso más simple, el valor de la serie en el momento  $t$  solo depende de la observación previa [Peña, 2005].

#### Principales causas de la existencia de autocorrelación

**Inercia:** Cuando existen tendencias marcadas que influyen en los valores futuros de la serie [Gujarati, 2010].

**Sesgos de especificación:** Cuando se elige mal la forma funcional o cuando se omiten variables, lo cual genera un comportamiento sistemático en el término estocástico [Graybill, 1974].

**Preparación de los datos:** En datos de corte transversal al “ordenar” los datos con respecto alguna variable, decreciente, etc., se puede introducir un proceso “aparentemente autocorrelacionado” [Sen, 1990].

Una de las consecuencias inmediatas producto de la autocorrelación, será la ineficiencia de los estimadores, puesto que sus varianzas estarán sobre o subestimadas, lo cual imposibilitará utilizar las pruebas de contrastes “test estadístico usuales para verificar la validez de

las estimaciones. Aunque los estimadores siguen siendo lineales, insesgados y consistentes y han perdido (como consecuencia de autocorrelación) su propiedad de varianza mínima, la insesgadez será útil para resolver el problema [Hahn and Meeker, 1991].

### 2.3.2. Intervalos de predicción

Un intervalo de predicción es un intervalo elaborado con una serie de datos de las muestras, de modo tal, que contenga observaciones futuras [Sen, 1990].

Es importante mencionar que el intervalo de predicción es similar a un intervalo de confianza en cuanto a que la probabilidad de captura (confianza) es un resultado a largo plazo. Es decir, la confianza es la proporción a largo plazo de los casos, en las mismas condiciones y con datos diferentes, que predirían adecuadamente lo que decimos que daría [Peña, 2002, Hahn and Meeker, 1991].

Dichos intervalos contienen una o más observaciones futuras, o alguna función de dichas observaciones, provenientes de un previo muestreo de la población o proceso [Rencher and Schaalje, 2008].

Se asume que los términos del error en el modelo de regresión múltiple son independientes, están normalmente distribuidos, con media cero y varianza constante. Para un valor dado de  $x_k$  ( $k = 1, 2, \dots, p$ ), el intervalo estimado de la variable dependiente  $y$  es llamado intervalo de predicción [Hahn and Meeker, 1991, Sen, 1990].

### 2.3.3. Modelado en Ciencias Forestales

Con el interés de entender la dinámica y optimizar el rendimiento de rodales comerciales de diferentes especies establecidas alrededor del mundo, el modelado estadístico se ha convertido en una poderosa herramienta de manejo.

[Wang et al., 2010], compararon el uso de métodos paramétricos y no paramétricos para la predicción del índice de sitio en rodales de pino en Norteamérica, encontrando que los modelos aditivos generalizados (GAM) (método no paramétrico), presentaron el mejor ajuste.

Así mismo, [Aertsen et al., 2010], compararon y evaluaron cinco (5) diferentes técnicas de modelado: regresión lineal múltiple (MLR), árboles de clasificación y regresión (CART), árboles de regresión potenciados (BRT), modelos aditivos generalizados (GAM), y redes neuronales artificiales (ANN), teniendo en cuenta medidas de desempeño, tales como la facilidad de interpretación ecológica y de uso. Concluyeron que en la mayoría de los casos GAM superó las otras cuatro técnicas de modelado, además que cuando la interpretabilidad ecológica de los datos es de gran importancia, BRT es una buena alternativa, mientras

que cuando la facilidad de uso es la prioridad, las técnicas MLR y CART son las mejores opciones. A pesar del buen rendimiento predictivo, ANN no son la mejor opción dada la complejidad de sus modelos.

[McKenney and Pedlar, 2003], emplearon árboles de regresión (tree based regression) involucrando variables edáficas, topográficas y algunas variables climáticas para establecer modelos espaciales de índice de sitio en especies de pino en Canadá, logrando esquematizar en mapas la distribución espacial de la productividad de estas plantaciones. Con el uso de las mismas variables y de técnicas de regresión múltiple [Louw and Scholes, 2006], plantearon modelos predictores de calidad de sitio en Sudáfrica. Por el contrario, [Sun et al., 2008], a través de modelos de predicción espacial Bayesiana, encontraron altamente significativas las variables profundidad del suelo y pendiente del terreno, como explicativas de la productividad de los rodales.

Investigaciones desarrolladas por [Ma et al., 2006], demostraron que el uso de sensores remotos para la estimación de la productividad en áreas forestales de gran tamaño, es una técnica rápida y útil. La inclusión de diferentes técnicas como modelos de cadenas de Markov, también han sido desarrolladas con el objetivo de modelar la dinámica y productividad de rodales forestales [Strigul et al., 2012]. [Aertsen et al., 2011], por su parte, recomienda el análisis de aceptabilidad de multicriterio estocástico para modelar bosques.

Diversas técnicas de interpolación espacial, también han sido empleadas, tales como distancia inversa ponderada (IDW), kriging ordinario (OK), regresión kriging (KR) y mínimos cuadrados parciales (PLS), para comparar e ilustrar la variación espacial del incremento medio anual (IMA) de plantaciones de *Pinus patula* en Nueva Zelanda por [Palmer et al., 2009].

## 2.4. Altillanura plana colombiana

Ubicada en la región de la Orinoquía y conocida también como la subregión de la Altiplanicie de Meta y Vichada, tiene una extensión de 9.864.412 ha, correspondiente al 8,6 % del territorio nacional [IGAC, 2016]. Se extiende desde el municipio de Puerto López, sobre la margen derecha del río Meta, hasta la desembocadura del Orinoco. En este territorio predomina una sabana herbácea extensa y continua, presentándose también especies leñosas, aisladas o agrupadas en bosques de galería, que bordean los cursos de agua [Rivas et al., 2004].

Varía altitudinalmente entre los 150 y 175 *msnm*, donde la precipitación media anual es de 2200 a 2500 *mm* y la temperatura media de 24° [León and García, 2007]. Corresponde a clima tropical lluvioso [Amzéquita et al., 2013] (o megatermal) de bosque (Ami) en el sistema de clasificación de Koeppen [Eslava et al., 1986], con épocas bien definidas de lluvia y de

sequía y temperaturas bastante uniformes a través del año.

Esta subregión de la Orinoquía está identificada como un bloque tectónico que fue levantado en el Plesitoceno Superior y ocupa un terreno de morfología plana conocida como *Altillanura no inundable de origen estructural - denudacional*; además presenta diferentes grados de disección y se desarrolla sobre limolitas, arcillolitas y areniscas del Terciario Superior y comienzos del Pleistoceno. Los depósitos superficiales no consolidados están formados por capas en posición horizontal compuestos de arcillas, limos, arenas con capas de corazas petroféricas; estos materiales también se encuentran intercalados y en posición horizontal [IGAC, 2016].

De acuerdo con IGAC, [2004] e IGAC, [2014], los suelos de la Altillanura colombiana son altamente evolucionados predominando el cuarzo en la fracción arena y caolinita, óxidos de hierro y aluminio en la fracción arcilla. Son ácidos, con baja disponibilidad de fósforo, bajas concentraciones de bases intercambiables y materia orgánica, altos niveles de hierro y predominio de aluminio en el complejo de cambio. Físicamente son suelos con estructuras estables, de textura arenosa a arenosa franca, con una capacidad de almacenamiento de agua muy baja. En la Tabla **2-3** se presentan algunas características geomorfológicas de las unidades cartográficas de suelos en las que en la actualidad se encuentran establecidas plantaciones de *A. mangium*.

Tabla 2-3: 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 Dytropepts Typic Hapludox
SVA	Altillanura	Peniplanos	Área 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].

En la Figura 2-5 se muestra la distribución espacial de las unidades cartográficas de suelos y la localización de sus perfiles modales, en los departamentos de Meta y Vichada.

La alteración en la altillanura plana (Ver Figura 2-4) presenta grado avanzado, lo cual se manifiesta en la composición mineralógica de arenas y limos (prácticamente cuarzo con trazas de fitolitos en la fracción ligera y en la fracción pesada de circón, turmalina, anatasa y materiales opacos de Fe. En la fracción arcillosa predominan caolinita, oxihidróxidos de Fe y Al, integrados 2:1:1, con aluminio interlamilar, pirofilita y gibsita. Ello corresponde fundamentalmente a procesos dominantes de ferralización (formación de Oxisoles: Haplustox (19,6 %), Hapludox (14,5 %), como prototipos y algunos Haplaquox), mediante procesos de alta transformación y pérdida de elementos Ca, Mg, K, Na y Si, entre otros y, en mucha menor extensión, ferruginación (proceso responsable de la formación de Ultisoles: Kandiodults (1,7 %), Hapludults (0,9 %), Endoaquults (0,8 %) y Paleodults (0,6 %), relacionado con

traslocación de arcillas, alteración avanzada y alta acidez, que han obrado desde el Plio-Pleistoceno, bajo la acción de cambios climáticos. Al interior de este proceso se manifiesta, en algunas zonas depresionales, subprocesos de óxido-reducción y plintización. Los inceptisoles distróficos (*Dystrudepts* y *Dystrustepts*), transicionales a los Oxisoles, son muy frecuentes [Malagón, 2003].



Figura 2-4: Panorámica de altillanura plana. Puerto Carreño (Vichada)

Fuente: Corpoica, [2013].



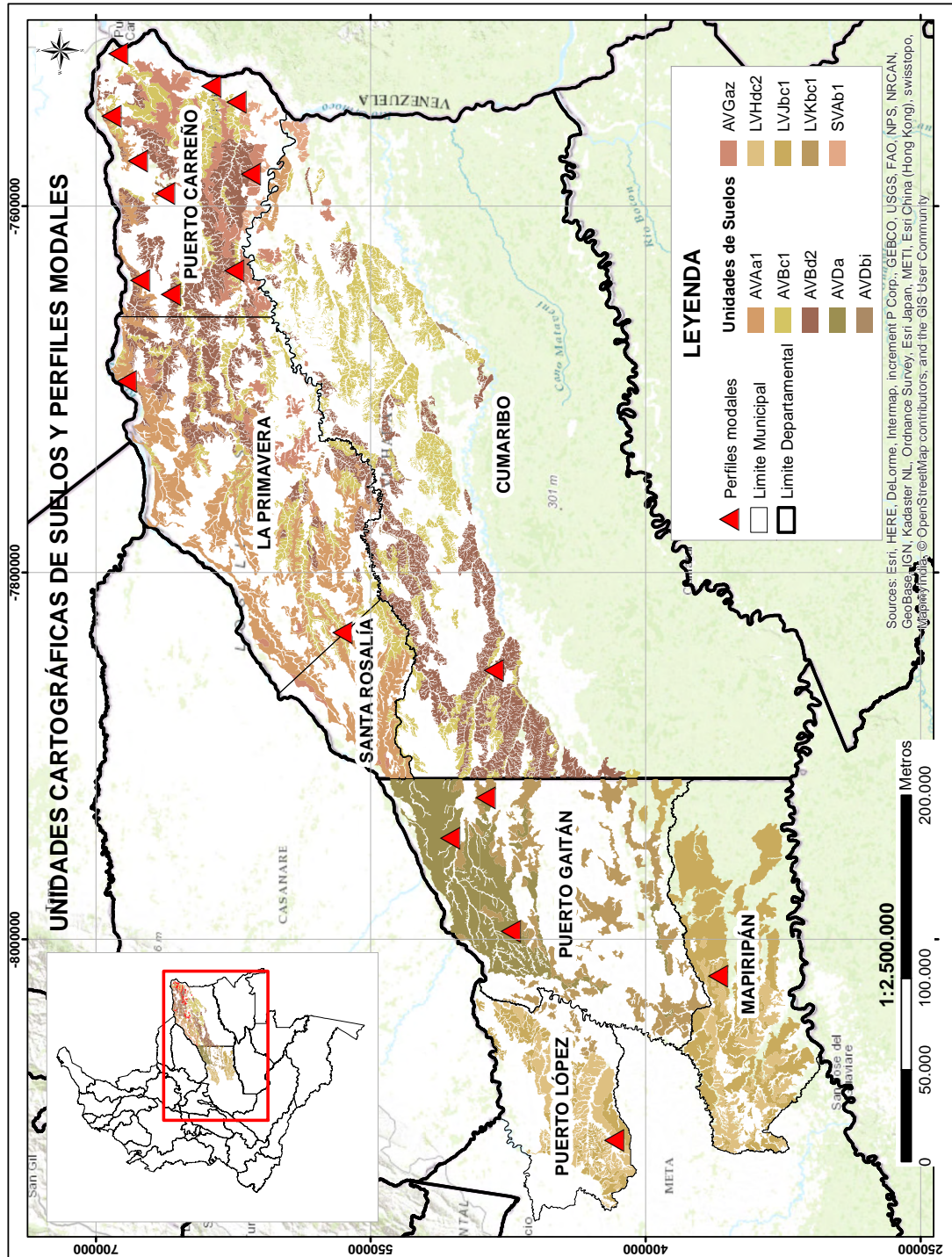


Figura 2-5: Unidades Cartográficas de Suelos y localización de perfiles modales  
 Fuente: Adaptado de IGAC, [2004, 2014].

### 2.4.1. Acacia en la altillanura plana

Las plantaciones establecidas en esta zona presentan una amplia heterogeneidad puesto que han sido establecidas con diferentes procedencias de material vegetal, densidades de siembra, tcnicas de establecimiento, esquemas de manejo, etc., obteniendo plantaciones con diferentes tasas de crecimiento reflejadas en su capacidad productiva [CORPOICA, CONIF, 2014]. En la Tabla 2-4 se presenta un resumen con los incrementos medios anuales (IMA) de algunos parámetros silviculturales y la clasificación de sitio para cada uno de ellos.

Tabla 2-4: Incremento medio anual (IMA) de rodales de *Acacia mangium* Willd., en la altillanura plana.

Clase	IS (m)	DAP ( $cm\ año^{-1}$ )	Altura ( $m\ año^{-1}$ )	G ( $m^2ha^{-1}\ año^{-1}$ )	V ( $m^3ha^{-1}\ año^{-1}$ )
I	16,5	4	4,5	2,5	9
II	14,5	2,6	2,9	1,5	5,7
III	12,7	2,2	2,3	1,4	5,3
IV	10,5	1,7	1,7	1	3,7

IS: Índice de sitio. DAP: Diámetro a la altura del pecho. G: Área basal. V: Volumen.

Fuente: Corpoica, CONIF [2013].

Estos reportes hacen parte del diagnóstico de plantaciones con especies forestales utilizadas en reforestación comercial, realizado por Corpoica y CONIF, mediante el muestreo general de 63 parcelas establecidas en la altillanura. Como se observó los sitios calificados como IV (Ver Figura 2-6) son los que reportan los valores más bajos, mientras que los sitios I tienen los mejores crecimientos (Ver Figura 2-7).

De acuerdo con Rivas et al., [2004], la baja productividad de los cultivos agrícolas y forestales en la altillanura, está directamente relacionada con el uso de implementos inapropiados, asociado con la intensa precipitación típica de la región, que deriva en severos daños de la estructura física del suelo, lo que conduce al sellamiento de la capa superficial y la consecuente reducción drástica de las tasas de infiltración, flujo de aire y agua, afectando la disponibilidad de nutrientes, de por sí bajos en los suelos de la altillanura.

Dada la alta susceptibilidad de estos suelos a la degradación, se han establecido algunas estrategias para la contrucción y mantenimiento de la capa arable, que incluye el mejoramiento físico del suelo mediante la labranza vertical con cinceles, aplicación de enmiendas de fertilización para mejorar sus condiciones químicas y la siembra de material vegetal, adaptado a condiciones de acidez y baja fertilidad, como la Acacia, para impulsar la actividad biológica.