



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Fertilidad de suelos en plantaciones forestales del trópico colombiano

José Julián Rojas Restrepo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias

Medellín, Colombia

2015

Fertilidad de suelos en plantaciones forestales del trópico colombiano

José Julián Rojas Restrepo

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ciencias, Geomorfología y Suelos

Director:

Nelson Walter Osorio V. Ph.D

Línea de Profundización en Geomorfología y suelos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias

Medellín, Colombia

2015

Resumen

El desarrollo forestal requiere el establecimiento de plantaciones con mejores rendimientos y disminución en sus turnos de aprovechamiento. Por tanto, las prácticas silviculturales en la plantación forestal toman un papel importante para alcanzar su mayor potencial. Lograr lo propuesto, requiere un manejo determinante, adecuado y profundo de todas las etapas del desarrollo de las especies. Así, el manejo de la nutrición vegetal se debe potencializar y mejorar, para ello, se debe tener un conocimiento adecuado de los procesos que ocurren en el suelo.

La fertilidad del suelo en las plantaciones forestales del trópico, es el manejo de los nutrientes del suelo, y debido a que los suelos del trópico son generalmente ácidos, relacionados con pH bajos y de poca disponibilidad de cationes como calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo y en los cuales se puede presentar toxicidad por aluminio y manganeso, por tanto, se deben adelantar las acciones necesarias para garantizar la nutrición a los árboles, en tal sentido, actividades como definir la especie adecuada, realizar análisis químico del suelo, inoculación micorrizal, aplicación de enmiendas, fertilización química y mejoramiento genético, son actividades indispensables y obligatorias para alcanzar el desarrollo forestal que requiere el planeta.

En tal sentido, el objetivo de este trabajo fue estudiar la importancia del manejo de la fertilidad del suelo en el desarrollo de la plantación forestal con fin comercial.

Palabras clave: Fertilidad de suelos / Nutrientes / Plantaciones forestales / Rendimientos / Silvicultura de plantaciones.

Abstract

Forest development requires the establishment of plantations with better yields and decreased use shifts. Therefore, silvicultural practices in forest plantation take a major role in achieving their full potential. To achieve this purpose, a deep knowledge and accurate management throughout all stages of the species is required. Plant nutrition should be potentiated and enhanced, there for; adequate knowledge of the processes happening inside the soil must be taken into account.

Soil fertility in forest plantations in the tropics, is the management of soil nutrients and because tropical soils are generally acid, associated with low pH and low availability of cations such as calcium, magnesium, potassium, sodium, phosphorus and in which aluminum and manganese can be toxic, measures must be taken to ensure the nutrition of the trees. In that sense, activities like defining the appropriate species, performing

chemical analysis of the soil, mycorrhizal inoculation, implementing amendments, chemical fertilizing and breeding are essential and mandatory to achieve the forest development required by the planet.

In this regard, the objective of this work was to study the importance of managing soil fertility in the development of forest plantation with commercial purpose

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
Introducción	13
1. El suelo y la nutrición forestal	17
1.1 El suelo forestal	17
1.3 Aspectos que inciden en la nutrición forestal	20
1.3.1 Materia Orgánica y Humus	20
1.3.2 Capacidad de intercambio catiónico.....	21
1.3.3 Capacidad de intercambio aniónico	21
1.3.4 Los Coloides.....	22
1.3.5 Reacciones del suelo (el pH)	22
1.3.6 Absorción de los nutrientes.....	23
2. Fertilidad del suelo	25
2.1 Fertilidad química del suelo	25
2.2 Fertilidad física del suelo	25
2.3 Fertilidad biológica del suelo	26
2.4 Ciclaje de nutrientes.....	28
3. Problemas en el manejo de la fertilidad en los suelos del trópico	31
3.1 Acidez del suelo.....	32
3.2 Exceso de humedad	33
3.3 Disponibilidad de nutrientes	34
3.4 Degradación del suelo	35
3.5 Incendios forestales.....	37
3.6 Condiciones externas	37
4. Prácticas para mejorar la producción forestal en el trópico	39
4.1 Análisis de suelos	39
4.2 Encalamiento.....	40
4.3 Fertilización química	43

4.4	Inoculación micorrizal	44
4.5	Practica silvicultural	46
5.	Plantaciones forestales en Colombia	51
5.1	Los suelos en Colombia	54
5.2	Sector forestal en Antioquia.....	58
5.3	Especies forestales de interés comercial en Colombia	60
5.3.1	<i>Pinus caribaea</i>	63
5.3.2	<i>Pinus oocarpa</i>	63
5.3.3	<i>Pinus patula</i>	64
5.3.4	<i>Pinus tecunumanii</i>	65
5.3.5	<i>Eucalyptus grandis</i>	66
5.3.6	<i>Eucalytus globulus</i>	67
6.	Conclusiones y recomendaciones	69
	Bibliografía	71

Lista de figuras

Figura 1: Esquema simplificado del reciclaje de residuos orgánicos en plantaciones y bosques (adaptado de Bernhard y Loumeto, 2002).	29
Figura 2a: Posibles restricciones en el suelo para el desarrollo forestal. Nótese Línea roja al interior del suelo que corresponde a una cementación por hierro	49
Figura 2b: Posibles restricciones en el suelo para el desarrollo forestal. Nótese la línea blanca al interior del suelo que corresponde a una cementación por sílice.	49
Figura 3. Zonificación de áreas por aptitud forestal comercial en Colombia	53
Figura 4: Zonas Potenciales para el Desarrollo de la Actividad Forestal (Fuente: FAO, MADR 2012)	54
Figura 5: Condiciones de humedad en el territorio colombiano (Tomado de Jaramillo 2004).....	55
Figura 6: Ordenes de suelos en Colombia (tomado de Jaramillo 2004).....	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los arboles (Aristizábal 2003).	18
Tabla 2: Elementos esenciales para la nutrición de los árboles y su función. (Aristizábal 2003).....	19
Tabla 3: Efecto del pH sobre la solubilidad de algunos elementos que pueden afectar el desarrollo de la planta, así como sobre algunos procesos relacionados con la nutrición. 35	35
Tabla 4. Zonificación de aptitud forestal por núcleo en Colombia (CONIF, 2008).	52
Tabla 5: Distribución de los órdenes de suelos de Colombia por regiones naturales. Con base en información presentada por IGAC (2003).....	577
Tabla 6. Zonificación forestal por subregiones en Antioquia (2005).....	588
Tabla 7: Plantaciones forestales comerciales en Antioquia 2003 – 2010 (cadena forestal de Antioquia 2011)	588
Tabla 8: Rangos para interpretar los resultados del análisis químico de suelos.	61
Tabla 9: Resultados de análisis químicos para proyectos forestales en Antioquia...	611

Introducción

Para el siglo XXI la demanda de madera proveniente de los bosques naturales será tan alta, que solo una actividad reforestadora intensa podrá compensar en parte la presión que se estará ejerciendo sobre ellos (Ramírez, 1991), por tanto, es indispensable adelantar acciones para el buen manejo de este recurso, de forma racional y sostenible, para que el bosque siga existiendo y brinde todos los servicios ambientales y sociales (Musálem, 2006).

Para asegurar el sustento de madera y conservar la mayor cantidad de área boscosa del mundo, se hace necesario tener un mejor desarrollo de la silvicultura, en tal sentido, (Vásquez, 2001), argumenta, que es a través de la investigación y del mejoramiento genético de los árboles, como se podrá lograr mayores crecimientos, mejor calidad de la madera, más resistencia a plagas y enfermedades y mayor adaptabilidad en las distintas zonas de reforestación.

El éxito de la plantación forestal con fin comercial radica en su manejo, este deber ser apropiado y oportuno, desde la etapa inicial que comienza con la selección de la semilla, hasta la extracción del producto final. Por tanto, este manejo de la plantación forestal en el trópico, debe incluir procesos tales como la selección de la fuente semilleras, la recolección y procesamiento de las semillas, establecimiento y montaje del vivero forestal, adecuada selección y preparación del sitio donde se establecerá la plantación, seguimiento y control silvicultural y elección del mejor método de cosecha (Trujillo, 2009).

La práctica silvicultural que más adolece el sector forestal del trópico, es el manejo de la fertilidad del suelo, y este componente de la actividad silvicultural, es de suma importancia para alcanzar mejores rendimientos y disminución en los turnos de aprovechamiento. En general, el manejar la nutrición forestal es una tarea difícil, dado el poco o nulo conocimiento del sector de muchos de los nuevos inversionistas, además, por cuanto es común encontrar en los lugares donde se desarrollan proyectos forestales, comentarios como: *“un señor por mi finca tiene una pinera y él nunca le aplico nada y tiene esos pinos todos bonitos”*, sin olvidar el famoso y aún constante comentario *“eso pinos dañan el suelo y secan las quebradas”*.

El presente trabajo hace referencia al manejo de la fertilidad del suelo en la plantación forestal comercial como parte del manejo silvicultural, vale la pena destacar que en la fertilidad del suelo, no son solo importantes los aspectos químicos, sino también las propiedades físicas y biológicas de los suelos donde se establece la actividad forestal,

además, que estas propiedades varían según el clima y según el manejo que se dé al suelo (Arias, 2007).

Planteamiento del problema

En la zona tropical los suelos donde se desarrollan las plantaciones forestales son generalmente ácidos, debido al exceso de precipitación que lava las bases intercambiables del suelo, tales como el calcio, magnesio, potasio y sodio (Malagon, 2003), en contraste el aluminio intercambiable aumenta hasta llegar a ser tóxico para los árboles, debido a que afecta las raíces impidiendo su buen desarrollo radicular, ya que el aluminio que ingresa dentro del sistema de la planta precipita el fósforo que es un nutriente esencial (Arias, 2007).

Louman *et al* (2001) expresan de igual forma que los factores que más influyen en la calidad de los suelos tropicales son probablemente el pH y la humedad. Por tanto, es necesario entender y manejar las situaciones que afectan desde el punto de vista edáfico el desarrollo forestal en el trópico para tener éxito en el objetivo principal de realizar una mejor nutrición a los árboles y así obtener mayores rendimientos.

Justificación

La actualidad forestal requiere el poseer plantaciones con mejores rendimientos y disminución de turnos de aprovechamientos. En este sentido, todo el manejo silvicultural de la plantación toma un papel importantísimo para lograr dicho objetivo. Así, la nutrición durante el desarrollo de la plantación es de vital relevancia para cumplir lo propuesto.

Para comprender la fertilidad del suelo en las plantaciones forestales del trópico, se requiere conocer el componente suelo donde se ubica la plantación, sus características y sus limitantes. Además, se debe entender que la nutrición forestal debe ser balanceada, puntual y necesaria en toda la etapa de desarrollo de la plantación, esto implica reconocer que existen pérdidas de nutrientes en el suelo tanto por erosión, lixiviación y la competencia con pastos o malezas.

Asimismo, tener presente que las plantaciones forestales pueden causar disminución en la fertilidad del suelo, ya que por la remoción de biomasa del sitio, las copas de los árboles se llevan nutrientes con la cosecha (Osorio, 2008).

La adecuada nutrición de los árboles no es una tarea sencilla que se deba tomar a la ligera, puesto que la mayoría de los suelos donde se adelantan plantaciones forestales son insuficientes para atender las demandas nutricionales de los árboles en desarrollo, por tanto, (Evans, 1992) menciona que se ha aumentado la necesidad y el interés por la fertilización forestal, debido al incremento en la demanda de nutrimentos por parte de las

especies de crecimiento rápido en suelos de fertilidad baja, lo que conlleva a un agotamiento del suelo.

Otro aspecto importante en el manejo de la fertilidad del suelo en las plantaciones forestales, es la cultura forestal en la zona donde se adelantan los proyectos, la capacitación del personal de campo es vital para que las labores silviculturales se realicen de forma correcta y adecuada, y con ello alcanzar los objetivos propuestos del proyecto forestal.

Objetivo

Discutir la importancia del manejo de la fertilidad del suelo que favorezca un desarrollo nutricional adecuado de la plantación forestal en suelos tropicales.

1.El suelo y la nutrición forestal

1.1 El suelo forestal

El suelo definido en muchos textos, es un cuerpo natural, trifásico, compuesto por una parte sólido (minerales y materia orgánica), parte líquida (solución del suelo) y otra gaseosa (O₂, CO₂, etc.). Hillel (1998) citado por Jaramillo (2002) argumenta que las interacciones dinámicas que ocurren en él, sirve como medio de crecimiento y regeneración continua para la vida en la tierra.

El suelo para la plantación forestal es aquel lugar donde se ubica el material vegetal, crece y da producción, además, del suelo se extrae agua y nutrientes requeridos en su etapa de desarrollo (Harrison, 2001), igualmente, es un sistema que posee horizontes que son el resultado de procesos pedogenéticos que actúan sobre él; por tanto, es una mezcla de componentes minerales, materia orgánica, bacterias, aire y agua (Zapata 2006), así, entender y reconocer estos elementos y sus horizontes es importante para determinar sus potencialidades y limitantes en el desarrollo forestal.

1.2 Nutrición forestal

Al igual que para cualquier otro tipo de plantas, los requerimientos nutricionales de los árboles maderables son los mismos, unos en cantidades grandes, llamados macronutrientes, tales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), Calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), y otros se requieren en cantidades pequeñas por lo que se conocen como micronutrientes o elementos traza, entre ellos el hierro (Fe), cobre (Cu), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), níquel (Ni) y molibdeno (Mo), los cuales son absorbidos por la planta en medio líquido (agua). Además, el carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) son tomados del aire vía fotosíntesis y del agua del suelo (Alvarado, 2007).

Los nutrientes son necesarios para el desarrollo de los árboles y los requerimientos de los mismos deben ser satisfechos para que el crecimiento ocurra en forma normal, por tanto, sin la plena disponibilidad de estos para el árbol, se ocasionara deficiencias y esto disminuirá el crecimiento en general (Aristizábal, 2003).

El crecimiento de los árboles ocurre en dos grandes fases: vegetativa y reproductiva. Durante la fase vegetativa la planta desarrolla el sistema de absorción y anclaje (raíces), el sistema de soporte y conducción (tallos y ramas) y el sistema fotosintético (hojas), durante la fase reproductiva se forman las flores y los frutos con semillas (Aristizábal, 2003).

En las tablas 1 y 2, se muestra los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, la forma química aprovechable para la planta, su rango de concentración en el tejido vegetal y su función en la nutrición de las plantas. (Tomado de Aristizábal, 2003)

Tabla 1: Nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los árboles (Aristizábal 2003).

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración requerido en tejido vegetal
C	CO ₂	450 g kg ⁻¹
H	H ₂ O	60 g kg ⁻¹
O	O ₂ , H ₂ O	450 g kg ⁻¹
N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	20-60 g kg ⁻¹
P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	1-4 g kg ⁻¹
K	K ⁺	20-50 g kg ⁻¹
Ca	Ca ²⁺	5-15 g kg ⁻¹
Mg	Mg ²⁺	1-4 g kg ⁻¹
S	SO ₄ ²⁻	1-4 g kg ⁻¹
Fe	Fe ²⁺	5-500 mg kg ⁻¹
Mn	Mn ²⁺	5-300 mg kg ⁻¹
Cu	Cu ²⁺	20-50 mg kg ⁻¹
Zn	Zn ²⁺	10-50 mg kg ⁻¹
B	H ₃ BO ₃	20-100 mg kg ⁻¹
Cl	Cl ⁻	100 mg kg ⁻¹
Mo	MoO ₄ ²⁻	0.1 mg kg ⁻¹
Ni	Ni ²⁺	0.1 mg kg ⁻¹

Cada uno de los elementos esenciales para la nutrición del árbol cumple una función, en la tabla 2 se muestran algunas de las más relevantes

Tabla 2: Elementos esenciales para la nutrición de los árboles y su función. (Aristizábal 2003).

ELEMENTO	FUNCIÓN
C	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, ATP, NADP, clorofila, reguladores de crecimiento (p.e., IAA)
H	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos.
O	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, aceptor de electrones
N	Aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, clorofila
P	ATP, NADP, lípidos de las membranas celulares, ácidos nucleicos, fosfo-azúcares
S	Sulfo-aminoácidos (cisteína y metionina), responsable de la conformación estructural y estabilidad de proteínas, coenzima A, responsable de aromas y sabores
K	Activador de más de 60 enzimas. Esencial en síntesis de proteínas, responsable de la turgencia y apertura de estomas
Ca	Activador de enzimas. Esencial para la permeabilidad de la membrana. Asociado con las pectinas de la pared celular
Mg	Activador de enzimas y ATP, componente de la clorofila
Mn	Activador de enzimas, esencial en la fotólisis del agua
Zn	Cofactor de varias enzimas (dehidrogenasas, aldolasa, fosfatasas, DNA y RNA polimerasa)
Ni	Parte fundamental de la enzima ureasa
Fe	Componente de citocromos, peroxidasa y ferredoxina, en los cuales es responsable de reacciones redox
Cu	Componente de la citocromo oxidasa (respiración) y plastocianina (fotosíntesis), superóxido dismutasa (radicales O ₂ lignina), y responsable de reacciones redox
Mo	Componente de la nitrato reductasa (reducción del NO ₃) y de la nitrogenasa (reducción de N ₂ en Rhizobios)
B	Crecimiento de tubo polínico, estabilidad de la estructura de la pared celular por formación de enlaces cis-diol con compuestos orgánicos.
Cl	Osmosis, balance de cargas y fotólisis del agua

En general, el elemento que más limita el crecimiento de los árboles en las plantaciones forestales del trópico es el nitrógeno (N), aunque en la región tropical el fósforo (P) puede ser igualmente limitante principalmente en Ultisoles y Andisoles (Alvarado, 2007).

Los árboles absorben los nutrientes del suelo a través de grandes sistemas de raíces, solo el carbono, el oxígeno y el hidrógeno para la síntesis orgánica lo toman del agua y del CO₂ atmosférico, los demás nutrientes esenciales deben ser extraídos del suelo, en

particular de la solución del suelo que es la fase líquida que la compone tanto el agua como los solutos que allí están disueltos. (Barber, 1995).

Las arcillas y la materia orgánica por su naturaleza coloidal, poseen elementos disponibles y cambiables, estos son los nutrientes que están presentes en el suelo (Sánchez, 2007), además, también son importantes en el aporte de nutrientes, los fertilizantes, la precipitación (lluvia) y los microorganismos que ayudan a la fijación biológica de alguno de los nutrientes.

1.3 Aspectos que inciden en la nutrición forestal

La nutrición de los árboles está influenciada por diferentes aspectos o propiedades, que están directamente relacionados con la disponibilidad de los nutrientes para la planta, a continuación se describen algunos de importancia para el desarrollo del presente trabajo.

1.3.1 Materia Orgánica y Humus

Todos los residuos de origen vegetal y animal que llegan al suelo conforman la materia orgánica, luego por procesos de descomposición se reducen a partículas más pequeñas y de formas más solubles, las cuales pueden ser absorbidas por las plantas para su adecuada nutrición (Jaramillo, 2002).

La descomposición de estos residuos son la materia prima para la formación del denominado humus, el cual está formado por un complejo de macromoléculas en estado coloidal constituido principalmente por proteínas, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, entre otros en constante estado de degradación y síntesis (Zapata, 2006).

Por tanto, el humus resultante de la descomposición y síntesis de los restos orgánicos de las plantas, como las raíces, las hojas, los frutos, las ramas y de microorganismos como bacterias, algunos hongos y algas, produce una serie de productos coloidales que, en unión con los minerales arcillosos, originan los complejos organominerales coloides que son de carga negativa, lo que les permite absorber H^+ y cationes metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e intercambiarlos en todo momento de forma reversible (Orsag, 2010).

La materia orgánica del suelo (MOS) juega un papel trascendental en la mantención de la fertilidad integral del suelo, considerando la fertilidad química, física y biológica (Sierra y Rojas, 2001), además (Arguello 1991) expresa que la humedad y la temperatura son los dos factores abióticos que controlan la tasa de descomposición del MOS, además, menciona que la temperatura decisiva para la producción y degradación de restos

vegetales en el trópico es de 25°C, puesto que temperaturas menores, se permite la acumulación de materia orgánica con la consecuente mejora de algunas propiedades del suelo, sin embargo a temperaturas mayores, se presenta una acelerada degradación de los restos vegetales ocasionando con esto problemas en la fertilidad.

La mineralización y la humificación de la materia orgánica tiene efectos específicos sobre las propiedades del suelo (Bernhard y Loumeto 2002), debido a que con la mineralización se liberan nutrientes ligados a los residuos de la materia orgánica y es una actividad eminentemente microbiológica y de gran importancia para la nutrición de las plantas, puesto que consiste en las transformaciones del N y del S, a formas fácilmente aprovechables. Además, Orozco (1999) argumenta que durante las reacciones de descomposición de los restos orgánicos se produce una oxidación rápida y violenta con una consecuente liberación de elementos nutritivos principalmente NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , además de agua y CO_2 .

La humificación por otro lado, consiste según Kumada (1987), en un conjunto de procesos que transforman la materia orgánica en compuestos que tienen una alta capacidad de absorción de la luz visible y unos altos contenidos de grupos orgánicos carbonilo y carboxilo.

En el suelo normalmente se presentan simultáneamente los procesos de descomposición, mineralización y humificación, además, (Jaramillo, 2002) argumenta que el suelo está sometido a procesos de humificación, cuando los procesos que sufre la materia orgánica, lo llevan a producir preferencialmente humus en lugar de compuestos inorgánicos.

1.3.2 Capacidad de intercambio catiónico

Como se mencionó, las plantas absorben los nutrientes del suelo y éste debe de tener la capacidad de intercambiar cationes entre la solución del suelo y la fase sólida, a este proceso se le conoce como la capacidad de intercambio catiónico. Así, los cationes que son retenidos y protegidos contra los procesos que intentan evaluarlos del suelo como la lixiviación y que son necesarios para la adecuada nutrición de los árboles como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y NH_4^+ , son retenidos superficialmente obedeciendo a diferencias de carga electrostática y pueden ser intercambiados por otros de la solución del suelo (Jaramillo, 2002).

1.3.3 Capacidad de intercambio aniónico

En el suelo se presenta capacidad de intercambio aniónico, la cual se debe a desequilibrios de carga eléctrica en las partículas del suelo. Esto es un proceso reversible por el cual las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa

liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases (Fernández, 2002).

Los aniones principales de intercambio, se encuentran en menor concentración que los cationes en la fase acuosa de la mayoría de los suelos, estos son: NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y CO_3^{2-} , generalmente la capacidad de los suelos para retener aniones es muy pequeña y ocurre solamente en algunos tipos de suelos que generan cargas positivas caso Oxisoles y Andisoles (Blanco, 2003).

1.3.4 Los Coloides

En el suelo los coloides están representados por las partículas de tamaño arcilla y por los compuestos húmicos (diámetro menor de 0.002 mm), son los responsables de la actividad química que se desarrolla en el suelo por su alta superficie específica, así como de buena parte de su comportamiento físico, los coloides del suelo pueden presentar cargas negativas y positivas simultáneamente o permanente (Conti, 2003), además, el autor indica que mediante la acción de diferentes mecanismos los componentes del suelo que pueden aportar carga superficial son los minerales silicatados laminares, los óxidos libres y el humus aportan carga variable principalmente negativa, los silicatos aportan principalmente carga permanente y negativa, las arcillas 1:1 y los óxidos de Fe, Al y Mn aportan carga variable.

Por tanto, la función más importante de los coloides es contribuir con la nutrición de las plantas, puesto que estos poseen carga negativas que contribuyen a la retención e intercambio de los cationes importantes para la nutrición de las plantas, además, la cantidad y el tamaño de los coloides del suelo determinan su capacidad para atraer y retener los nutrientes (Hoyt, 2007).

1.3.5 Reacciones del suelo (el pH)

El pH es una relación entre los contenidos de protones H^+ y de iones OH^- en la solución del suelo, que corresponde al logaritmo negativo de la actividad de protones H^+ en un medio acuoso (Osorio, 2012) además, la disponibilidad de los nutrientes para la planta está condicionada por el pH del suelo, debido que los suelos con pH mayores de 5,5 se aumenta la disponibilidad de nutrientes como Ca, Mg, P, K, Fe, entre otros (Kemmitt *et al.*, 2006).

En términos generales los suelos ácidos son los que presentan pH menores de 6,5, suelos neutros los que tiene pH entre 6.5 y 7.3 y los suelos básicos son aquellos con valores de pH mayores de 7.3, no obstante cada especie vegetal crece mejor en un rango de pH determinado, los valores entre 5.5 y 6.5 favorece tanto la solubilidad como la disponibilidad de los nutrientes en el suelo (Ibáñez, 2007). Valores bajos de pH ($\text{pH} \leq 5.5$)

son indicadores de la presencia de aluminio intercambiable, y como lo expresa Osorno (2012), este inhibe el desarrollo de las raíces de las plantas, impidiendo que estas penetren más en el perfil y logren obtener agua y nutrientes, lo que podría afectar negativamente el rendimiento de los cultivos.

1.3.6 Absorción de los nutrientes

Cuando el nutriente se encuentra en la solución del suelo, la absorción de este por el árbol ocurre después de que ha llegado a las raíces por cualquiera de los siguientes mecanismos (Salisbury y Ross, 1994):

- Difusión a través de la solución del suelo a lo largo de un gradiente de concentración creado por la absorción de iones por la raíz.
- Flujo masal cuando el agua mueve iones hacia la raíz a lo largo de un gradiente de potencial hídrico entre la raíz y el suelo, creado por la transpiración.
- Interceptación de raíces, debido a que el crecimiento de las raíces intercepta el nutriente en el suelo.

Es importante mencionar que la absorción de cationes y aniones (nutrientes) por parte de la raíz de la planta, va acompañada de una transferencia de H^+ , OH^- y HCO_3^- desde la raíz hacia la solución del suelo. Lo anterior se hace para mantener el balance de cargas eléctricas en el citoplasma, esto contribuye con el que aumento de la acidez del suelo (Salisbury y Ross, 1994).

Cuando las plantas absorben los nutrientes disponibles, reducen significativamente su concentración en el suelo, sin embargo, esta disponibilidad pueden ser abastecida de nuevo mediante la adición de fertilizantes y/o enmiendas orgánicas, teniendo muy presente los resultados del análisis químico, y las exigencias de la especie (Vásquez, 2001)

Para lograr plantaciones con buen rendimiento y calidad, el equilibrio de los nutrientes en el suelo debe ser mantenido, por lo que el desequilibrio puede resultar en deficiencias, toxicidades o interferencia de un nutriente con la absorción de los demás (Palomeque, 2009).

Es claro que existen otros aspectos que también inciden en la nutrición de los árboles, aspectos tanto físicos como biológicos, que no se argumentaran en detalle en este trabajo, como tampoco las funciones de los nutrientes en la planta, su paso y movilidad al interior del árbol

2. Fertilidad del suelo

Grubb (1995) define la fertilidad del suelo como la capacidad del mismo para suministrarle nutrientes esenciales a la planta para su crecimiento y desarrollo. Además, manifiesta que en la fertilidad del suelo las propiedades del mismo tiene un efecto directo sobre el crecimiento de las especies maderables, por lo tanto, conocer y entender las propiedades químicas, físicas y biológicas que caracterizan a este recurso, es necesario para adelantar una buena y adecuada nutrición forestal.

2.1 Fertilidad química del suelo

La fertilidad química se determina normalmente a través de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, más precisamente en la solución del suelo o en la fase intercambiable (Villarreal, 2000). Esto se realiza a través de un análisis en laboratorio y/o en plantas, diagnóstico que posteriormente permite definir estrategias de fertilización (Ibáñez, 2008).

En general la fertilidad química hace referencia a la reserva de nutrientes en el suelo y su aporte a las plantas, se caracteriza principalmente por las siguientes variables: la capacidad de cambio de cationes y aniones, el pH, contenido de materia orgánica, aspectos que se mencionaron anteriormente (Burle *et al.*, 1997).

Sin embargo, es importante mencionar que en la solución del suelo, existen enlaces químicos como el iónico y covalente, que favorecen la disponibilidad de los nutrientes para la planta, ya que con el intercambio iónico, los iones disueltos en la fase líquida, pueden sustituir a iones de la fase sólida. (Ibáñez, 2008).

2.2 Fertilidad física del suelo

Se define la fertilidad física del suelo como la capacidad del suelo en brindar las condiciones estructurales adecuadas para el anclaje, sostén y crecimiento de la plantación forestal. Entre las propiedades físicas que la definen están: la estructura, textura, la porosidad, retención hídrica, densidad aparente, resistencia a la penetración, entre otras.

La estructura del suelo podría presentarse como la principal propiedad de la fase sólida, puesto que determina en gran medida el espacio que queda disponible para las otras dos fases, la líquida y la gaseosa, además, esta propiedad tiene una influencia directa en la porosidad, densidad aparente, régimen hídrico, régimen térmico, permeabilidad, aireación, distribución de la materia orgánica, entre otras (Jaramillo, 2002).

Desafortunadamente, la estructura del suelo se afecta fuertemente por el impacto que ejercen actividades en la plantación, tales como la cosecha de los árboles, la preparación del sitio para la siembra, la fertilización inicial y el control de malezas. Estas prácticas pueden alterar la estructura del suelo, causar compactación y reducir el crecimiento de los árboles, ya que aumenta la resistencia del suelo a la penetración de raíces, reduciendo la aireación y cambiando los flujos de agua y disponibilidad de nutrimentos (Alvarado, 2007).

Para tener éxito en el desarrollo forestal, se importante comprender las características mencionadas del suelo. Por tanto, es necesario analizar y estudiar las ventajas y desventajas de las prácticas silviculturales en el desarrollo de la plantación forestal, para con ello, conservar la estructura del suelo y así permitir el uso futuro del recurso.

Castro (1995) identifica entre las principales causas del deterioro físico del suelo las siguientes:

- El exceso de mecanización.
- Monocultivo.
- Pérdida de la materia orgánica.
- Problemas de mal drenaje.

2.3 Fertilidad biológica del suelo

La fertilidad biológica del suelo, se refiere al papel de los organismos vivos (macro y microorganismos) como el caso de los microorganismos benéficos que se encuentran en la rizósfera y que son determinantes en la salud de la planta y la fertilidad del suelo porque participan en muchos procesos clave del ecosistema (Kannaiayan, 2003) citado por Bernal (2009).

Los microorganismos en el suelo, lo componen las bacterias, actinomicetos, hongos, algas, virus y protozoarios (Higuera, 2008). Además, son importantes en los procesos de transformación de nutrientes (Fijación de nitrógeno), transformación de compuestos orgánicos que la planta no puede tomar a formas inorgánicas, aumento del desarrollo radicular de la planta para mejora la asimilación de nutrientes y mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

En los procesos de nutrición vegetal son varios los microorganismos que transforman elementos o compuestos químicos a formas asimilables para las plantas (Munévar, 1991). Se debe tener muy presente que en el suelo, tanto la biodiversidad, como el tamaño de las poblaciones de organismos y su actividad depende en muchos casos de prácticas de manejo tales como el laboreo, el control fitosanitario y el manejo de residuos de cosecha, la cobertura y la fertilidad natural del sitio (Krishnapillay, 2000).

La actividad de los microorganismos en el suelo está muy relacionada con el contenido de humedad que se presente en el suelo (Bernhard y Loumeto, 2002) además, según el tiempo de permanencia en el suelo podemos encontrar organismos en tres categorías, los edafobios, que cumplen todo su ciclo biológico en el suelo, los Edafófilos, que no tienen que cumplir obligatoriamente todo su ciclo biológico en el suelo pero que prefieren el ambiente de éste para vivir y los edafógenos que se pueden encontrar casualmente en el suelo, pero que no presentan ninguna adaptación especial para vivir en él (Rendón, 2013).

Los microorganismos del suelo al crecer y tomar nutrientes, evitan que éstos queden libres y se pierdan por lixiviación, poniéndolos posteriormente a disposición de las plantas a medida que mueren o se alimentan, como el caso de las lombrices de tierra que hacen más asimilables los nutrientes para las plantas al transformar el suelo que va circulando por su sistema digestivo (Gliessman, 1997). Dado, que las lombrices aceleran la descomposición de los restos vegetales, incrementando la tasa de transformación de nutrientes, promueve además, la agregación del suelo, la porosidad y aumenta la infiltración de agua y el transporte de solutos (Domínguez, 2004).

Los dos principales grupos de microorganismos del suelo y que son importantes para la fertilidad y buen desarrollo vegetal, son las bacterias y los hongos (Orsag, 2010), las bacterias son los microorganismos más numerosos y más pequeños del suelo. Osorio (2014) considera que las bacterias cumplen diversas actividades y en muchos casos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Algunas bacterias son capaces de utilizar el nitrógeno atmosférico (N_2), el cual puede pasar a la planta cuando mueren contribuyendo a la nutrición, este proceso es llamado fijación de nitrógeno (Pritchett, 1991), sin embargo, las condiciones ambientales que más favorecen el desarrollo de las bacterias en el suelo son la humedad, temperatura, pH y la cantidad de materia orgánica presente en el sitio, el autor sostiene que las condiciones de acidez en el suelo inhiben un buen número de bacterias.

Por otro lado, los hongos son organismos que participan activamente en la descomposición de compuestos resistentes a las bacterias, tales como celulosa, hemicelulosa, lignina, grasas y almidones (Pritchett, 1991). Además, los hongos juegan un papel importante en la nutrición forestal, por la capacidad de formar asociaciones con las raíces llamadas micorrizas. Cochran *et al.* (1994) argumentan que dicha asociación aumenta la superficie de absorción de las raíces y así tomar nutrientes no asequibles

directamente por la raíz, tal como ocurre con el fósforo, y del mismo modo documentan, que por lo menos el 85% de las plantas presentan algún tipo de asociación micorrícica.

Sin embargo, en algunos casos los organismos vivos en el suelo, pueden causar problemas fitosanitarios en las plantaciones forestales como es el caso de la hormiga arriera, la cual no se alimenta directamente de las planta, sino que cortan sus hojas para luego trasladarlas a su nido, en donde las utilizan para cultivar un hongo del cual se alimentan (Trujillo, 2009).

2.4 Ciclaje de nutrientes

Los residuos que se depositan en el suelo provienen de la vegetación viva que crece sobre ellos (hojas, ramas, flores, corteza y madera), aunque se puede incluir de igual forma, las raíces en descomposición y los animales muertos que viven en o sobre el suelo (Alvarado, 2007).

El ciclo o ciclaje de nutrientes, es el movimiento e intercambio de materia orgánica e inorgánica para regresar a la producción de materia viva, y como lo consideran Reis y Barros (1990), los procesos envueltos en el reciclaje de nutrientes pueden agruparse en los de tipo geoquímico (adiciones por meteorización, fijación biológica de nitrógeno, adición de fertilizantes, lixiviación, pérdidas por quema y erosión); de tipo biogeoquímico (absorción y acumulación de nutrimentos, acumulación y descomposición de residuos); o de tipo bioquímico (translocación de nutrimentos).

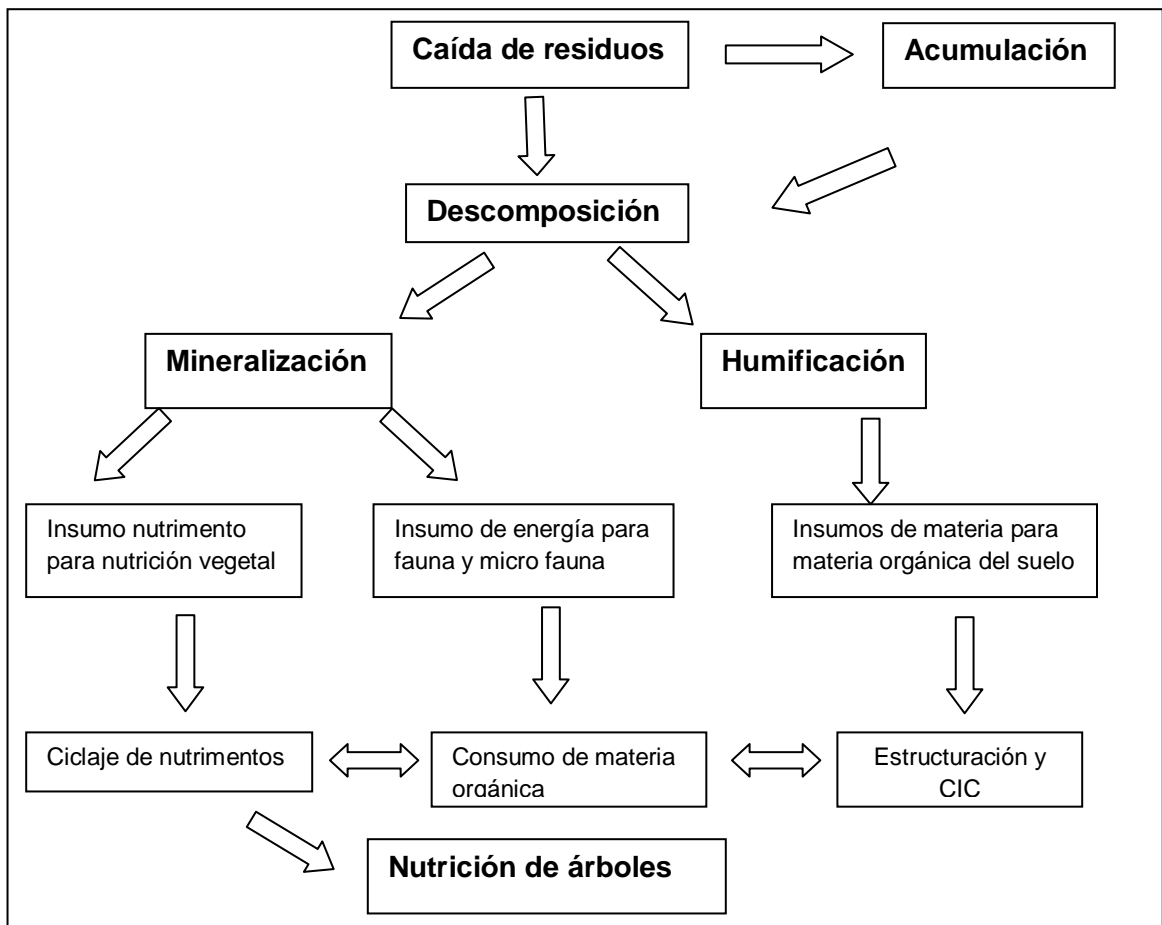
Como se ha mencionado, la biodiversidad presente en el suelo permite la recirculación de los nutrientes, reduciendo de forma importante las pérdidas de estos (Figura 2-1).

El ciclaje y la pérdida de nutrientes del suelo en los ecosistemas forestales, han demostrado ser críticos para garantizar el adecuado funcionamiento de las plantaciones forestales, puesto que las pérdida de nutrientes y la interrupción de los procesos de ciclaje y captura, podrían estar asociados con descensos en la productividad forestal Nilsson *et al.* (1995) citados por Londoño y Montoya (2007).

Altieri (1997) expresa que los árboles y arbustos con raíces profundas como en el caso de las leguminosas, contribuyen con el ciclaje de nutrientes, puesto que extraen nutrientes de las partes profundas del suelo y los depositan en la superficie al caer sus hojas del mismo modo, Gliessman (1997), manifiesta que las gramíneas son capaces de tomar el potasio (K) no asimilable por otras plantas y depositarlo en el suelo al morir su partes aéreas, de igual forma fijan N_2 de la atmósfera y también ayudan a solubilizar el fósforo. Igualmente Santa Regina *et al.* (2001) citados por Ramírez y Zapata (2004), estiman que la hojarasca foliar es el responsable de cerca del 80% de la cantidad total de nutrientes retornados al suelo por los árboles.

No obstante, para tener un buen ciclaje de los nutrientes en el suelo, es importante estudiar y entender su movimiento a través del suelo, Londoño y Montoya (2004), estudiaron láminas de infiltración de agua en tres coberturas boscosas (pino, roble y ciprés) en la región de Piedras Blancas departamento de Antioquia, encontrando que el comportamiento de la infiltración está relacionado con el patrón de lluvias, con el dosel del sistemas forestal y con la hojarasca que cubre el suelo, estos son los factores más importantes para la infiltración de agua.

Figura 1: Esquema simplificado del reciclaje de residuos orgánicos en plantaciones y bosques (adaptado de Bernhard y Loumeto, 2002).



Sin embargo, en plantaciones forestales de pino y ciprés en la zona de piedras Blancas se ha verificado el fenómeno de hidrofobicidad de la hojarasca presente (Jaramillo, 2001), demostrando que el bosque que tenga menos alterada su capa superficial, tendrá mayores ritmos de infiltración debido a que el suelo se halla protegido del impacto directo de lluvia y de la escorrentía superficial.

Ramírez y Zapata (2004) evaluaron la producción de hojarasca en bosques de *Quercus humboldtii*, *pinus patula* y *cupressus lusitánica*, encontrando que el patula muestra mayor producción de hojarasca y por ende es el que más bioelementos regresa al suelo, sin embargo, confirman el bajo retorno al suelo del fósforo (P) a través de la hojarasca, el cual es insuficiente para suplir la demanda de este elemento por los árboles.

3. Problemas en el manejo de la fertilidad en los suelos del trópico

En el trópico húmedo donde se ubica Colombia, el exceso de precipitación lava o lixivia las bases que están en el suelo y cationes tales como calcio, magnesio, potasio y sodio (Malagón, 2003), por lo anterior, son varios los problemas que se pueden presentar en las plantaciones forestales en el trópico colombiano, en particular en el manejo de la fertilidad del suelo, más concretamente por el manejo de los nutrientes en estos suelos.

En general, los suelos del trópico son relacionados con pH bajos, en los cuales se puede presentar toxicidad por aluminio y manganeso, además con frecuencia se tiene escasez de nutrientes esenciales para las plantas particularmente el fósforo (Sarmiento, 1984). No obstante, además de los problemas nutricionales de estos suelos, también se presentan problemas físicos, que según sea el uso para el que se destine el suelo, se propondrá su manejo.

El mal uso del suelo puede generar compactación y/o problemas de erosión; es decir, se tiene degradación física que afecta la potencialidad nutricional del suelo, en este sentido, (Bertsch, 2001) manifiesta que se altera la aireación y el espacio poroso que son necesarios para el buen crecimiento y desarrollo del sistema radicular de los árboles.

Además, las variaciones en la cantidad anual de lluvia en las zonas tropicales, que van desde mínima en las zonas desérticas, hasta miles de milímetros en las regiones selváticas del Pacífico Colombiano (Vásquez, 2001), influyen en el manejo de la fertilidad del suelo, y más aún, si las precipitaciones se presentan en las áreas planas, donde el escurrimiento superficial del agua es lento o no se presenta, en consecuencia el suelo queda sometido a encharcamientos en largos períodos de tiempo, por lo tanto, es de esperarse problemas de toxicidad con algunos elementos que se tornan muy solubles en condiciones reductoras como el Hierro (Fe) y el Manganeso (Mn).

Por tanto, analizaremos algunos de los problemas más concurrentes que se tienen en el manejo de la fertilidad de suelo en el trópico, y que además que son fundamentales para mejorar el desarrollo del sector forestal.

3.1 Acidez del suelo

La acidez o acidificación del suelo es un proceso espontáneo que se da durante la pedogénesis, durante ella, ocurre un proceso de continua meteorización química que empobrece el suelo debido a la pérdida de cationes alcalinos y alcalinotérreos como el K^+ , Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} , e incremento de los cationes metálicos como Al^{+3} , Fe^{+3} y Mn^{+4} (Zapata, 2004).

Para el desarrollo forestal, es importante reconocer y entender lo que representa un suelo ácido, y como lo expresan Caires *et al.* (2006) y Alvarado *et al.* (2010) la acidificación de los suelos contribuye además de lo presentado por Zapata (2004) en:

- Disminuir la fertilidad del suelo y generar bajos rendimientos de los cultivos.
- Provocar variaciones en la estructura de la microflora y microfauna del suelo.
- Disminuir la fijación biológica de nitrógeno.

En Colombia aproximadamente el 80% de los suelos son ácidos (Malagón, 2003). Por lo tanto, es muy probable que cuando se adelante una plantación forestal, el suelo en el que se desarrolle el proyecto sea ácido, de este modo, se requerirá un adecuado manejo para corregir o enmendar este problema oportunamente, y de esta manera lograr mejorar el rendimiento forestal.

Esta acidez del suelo, unida a la poca disponibilidad de nutrientes, es una de las mayores limitantes de la productividad de los suelos tropicales, aunque la acidificación es un proceso natural, las actividades humanas como la agricultura y la polución entre otras, aceleran este proceso (Hue, 2008). Por tanto, debido al aumento de las áreas acidificadas en el mundo y a la necesidad de producir más alimentos, Zapata (2004) expresa lo fundamental de entender la acidez del suelo, con el fin de desarrollar adecuadas prácticas de manejo, que permitirán además, aumentar la producción alimentaria, y en lo concerniente, a lograr mejorar e incrementar el desarrollo del sector forestal.

Jaramillo (2011) describe una clasificación taxonómica de suelos ácidos de acuerdo al sistema taxonómico americano y manifiesta además, que se tienen suelos ácidos distribuidos en casi todos los órdenes del sistema, sin embargo, hay algunos órdenes en los cuales estos son los suelos dominantes, por ejemplo, los órdenes Oxisoles y Ultisoles que agrupan solo suelos ácidos y que se caracterizan por presentar:

- Evolución avanzada.
- Alta lixiviación de bases
- Bajo contenido de minerales meteorizables
- Predominio de sesquióxidos de Fe y Al
- Arcillas 1:1 en la fracción arcilla.

Los suelos ácidos más frecuentes en Colombia, como lo manifiesta Jaramillo (2004), corresponden a los Inceptisoles, seguidos por los órdenes Entisol, Oxisol y Andisol.

Además, según el mapa de suelos de Colombia del IGAC (2003), presentado resumidamente por Jaramillo (2004), la distribución de los órdenes de suelos en el país se presenta en las siguientes proporciones: Inceptisol (31.4%), Entisol (24.3%), Oxisol (20%), Ultisol (10.1%), Andisol (4.5%), Mollisol (1.2%), Espodosol (0.9%), Alfisol (0.8%), Vertisol (0.6%), Histosol (0.5%) y Aridisol (0.4%).

3.2 Exceso de humedad

La humedad del suelo afecta directamente el crecimiento de las plantas, con una baja disponibilidad de agua se reduce la absorción de nutrientes y el cultivo lo expresa en un bajo crecimiento (Rodríguez, 2009). El exceso de humedad por el contrario, puede dañar drásticamente los árboles, debido a que cuando el suelo se satura de agua la deficiencia de oxígeno causa reducción rápida en la absorción de nutrientes, además los pelos radicales responsables de la nutrición comienzan a sufrir pudrición (Montagnini, 2004).

Las posibles causas del exceso de humedad en el suelo, son debido al ingreso de agua por las lluvias y la presencia de horizontes impermeables o una capa freática alta Jaramillo (2002). Además, Zapata (2006), expresa que la profundidad del perfil del suelo influye en el contenido de humedad, dado que perfiles delgados almacenan poca cantidad de agua, mientras que perfiles profundos almacenan una mayor cantidad, además que la textura del suelo influye en el contenido de humedad, puesto que suelos arenosos tienen tendencia a tener menor contenido de humedad que los suelos limosos y estos a su vez, menos que los suelos arcillosos.

En las plantaciones forestales, una técnica muy utilizada para eliminar el exceso de humedad causado por una capa freática alta u horizontes impermeables y por las altas lluvias, es instalar canales abiertos de drenaje, su posición dependerá de la profundidad del horizonte impermeable y además, asegurar que la descarga de las aguas no ocasione problemas de erosión en la salida (FAO, 2000).

Sin embargo, conocer la cantidad y distribución de las lluvias, es un factor determinante en la escogencia de especie a establecer en la plantación forestal, debido a que las especies que se desarrollan bien donde llueve la mayoría de los meses, no se desarrollan bien donde la estación seca es muy severa, en tal sentido. Vásquez (2001), expresa que muchas especies poseen patrones específicos para sobrevivir en climas húmedos tropicales, como es el caso de la Teca, (*Tectona grandis*), pero se desarrolla mejor donde hay una estación seca de tres a cuatro meses. En cambio, el especie pino, como el *Pinus patula*, sólo crece bien donde la precipitación anual está por encima de 1000 mm.

3.3 Disponibilidad de nutrientes

El déficit de humedad, también tiene afectación directa en el desarrollo de las plantaciones forestales, puesto que afecta la disponibilidad de nutrientes para los árboles, además, McDowell (1998) y Xue (1996) expresan que existe relación entre la disminución de concentración de nutrientes conforme aumenta el volumen del agua. Del mismo modo, Burch, Waldner y Fritschi (1996) han documentado que el 28% del total de nutrientes son lavados en los primeros 5 mm de lluvia en las tormentas, mostrando la relación directa que tiene el agua de lluvia en la movilización de elementos en el suelo.

Baker y Laflen (1983) mencionan también, que la cantidad, permanencia y ubicación de un nutriente en el perfil del suelo, es un factor importante que determina la concentración del mismo en la solución del suelo; además, la localización de un nutriente en el perfil del suelo, determinara su afectación en el proceso de escorrentía superficial, debido a que cuando los nutrientes están en la superficie del suelo, las pérdidas por este fenómeno son mayores (Timmons *et al.*, 1973).

Por tanto, el crecimiento de las plantaciones forestales se encuentra limitado por la disponibilidad de nutrientes, los cuales pueden afectar el crecimiento de los árboles si estos se presentan en exceso o en déficit (Campo, 2003).

Morales (2001), expone que las deficiencias o excesos de nutrientes en el suelo pueden favorecer la aparición de enfermedades forestales dado que afectan el metabolismo y limitan la formación de los mecanismos de defensa naturales de la planta, promoviendo el ataque de ciertos patógenos como es el caso de “mal de ciprés” en el ciprés de cordillera en la Patagonia Argentina, del mismo modo (Agrios, 1996), manifiesta que en otras partes del mundo, distintos estudios evidenciaron fenómenos de mortalidad forestal asociados a deficiencias nutricionales.

Además, dada la distribución de órdenes de suelos en Colombia, donde los Inceptisoles, entisoles y oxisoles son cerca del 75.7 % del territorio nacional, en los cuales se da un proceso muy activo de lixiviación; Zavala *et al.*, (2005) manifiestan que al ocurrir precipitaciones fuertes, los nutrientes no son retenidos adecuadamente, provocando el agotamiento y la reducción de la actividad biológica, lo cual a su vez provoca la disminución de toda clase de producción y el desarrollo de las plantaciones forestales

Sin embargo, muchos nutrientes catiónicos de importancia para las plantas y microorganismos, tales como el NH_4^+ , K^+ , y Ca^{++} , son retenidos en el suelo aún en áreas con precipitaciones altas, debido a la interacción electrostática de las partículas de suelo con carga negativa (Porta *et al.*, 1999). Asimismo, como se mencionó anteriormente, el pH es un buen indicador de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, esto se debe a la

presencia de los iones Al^{3+} , H^+ y OH^- que son determinantes de la solubilidad de nutrientes en el suelo, además es un indicador de la escasez de las formas disponibles de alguno de ellos, como en el caso de calcio, magnesio, potasio y sodio (Osorio, 2012).

Tabla 3: Efecto del pH sobre la solubilidad de algunos elementos que pueden afectar el desarrollo de la planta, así como sobre algunos procesos relacionados con la nutrición.

ELEMENTO O PROCESO	pH DE MÁXIMA DISPONIBILIDAD	FUENTE
N	6 – 8	Guerrero (1991)
P	5.6 – 6.6	Guerrero (1991)
K y S	> 6	Guerrero (1991)
Ca y Mg	> 6.5	Guerrero (1991)
Fe	< 6	Guerrero (1991.)
Mn	< 5.5	Sánchez y Salinas (1983)
Cu y Zn	5 – 7	Guerrero (1991)
B	5 – 7	Guerrero (1991)
Al	< 5.5	Bohn <i>et al.</i> , (1993)
Na	> 8.5	Porta <i>et al.</i> , (1994)
Nitrificación	6 – 8	Orozco (1999)
Desnitrificación	6 – 8	Orozco (1999)

De acuerdo a lo anterior, con una adecuada interpretación del análisis químico del suelo se puede mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantaciones forestales, ya sea con aplicación de fertilizantes o enmiendas que contribuyan a corregir la acidez y se logre alcanzar las dimensiones óptimas de los árboles y así reducir el turno de aprovechamiento.

3.4 Degradación del suelo

La degradación del suelo es el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, dicho cambio puede ocurrir por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos, y en términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en la fertilidad y consecuentemente, en su capacidad de sostener actividades productivas (Veiga, 1992).

Según Bertoni y Lombardi Neto (1985) (citado por Veiga (1992), los suelos se vuelven gradualmente menos productivos por cuatro razones principales:

- Degradación y/o alteración de la estructura del suelo.
- Disminución de la materia orgánica.
- Erosión del suelo.
- Pérdida de los nutrientes.

La degradación del suelo, es un serio problema en las regiones tropicales y subtropicales, donde las prácticas inadecuadas en el suelo, tienen impactos a corto y largo plazo, tanto en la producción de alimentos, en la calidad del ambiente, con efectos en lo político y económico (Lal, 2001). Sin embargo, para enfrentar los problema de degradación de los suelos en el trópico Lal (2001) y Norton *et al.*, (2003) plantean que deben proponerse alternativas de manejo agroecológico del suelo, con métodos de bajo costo y efectivos para controlar la erosión, con lo que se previene la degradación de los suelos y con mínimos riesgos al ambiente.

No obstante, es importante adelantar y priorizar en las siguientes alternativas para mitigar los problemas de degradación y erosión del suelo en las regiones tropicales:

- Desde la academia, se requieren más y mejores profesionales, responsables de la producción agrícola, forestal y agropecuaria, que amplíen sus conocimientos relacionados con el manejo y conservación del suelo.
- Alternativas que mejoraren e incrementen los rendimientos de los cultivos, para el caso de las plantaciones forestales, que se incluyan aporte de abonos orgánicos y la implementación de diferentes tipos de biofertilizantes.
- Que la preparación del terreno para adelantar las actividades agropecuarias y forestales, se realicen de manera eficaz y acorde a la situación puntual del terreno.

En Colombia la degradación de los suelos muestra niveles preocupantes, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1998) la pérdida de suelo es del orden de 170.000 a 200.000 t/ha por año. Además, cerca de 56 millones de hectáreas se encuentran afectadas por erosión y de ellas 60% se ubican en la región Andina (Rivera y Gómez, 1991). En la zona cafetera colombiana, el cultivo del café ha sido reemplazado por otras coberturas, principalmente pasturas sin árboles que son manejadas en forma convencional (Mett, 2001), este cambio ha incrementado el deterioro del recurso suelo, especialmente por su alta susceptibilidad a erosión, asociada con suelos muy jóvenes y predominio de pendientes fuertes (mayores a 70%), sometidos a una precipitación abundante y con eventos de alta intensidad (Rivera y Gómez, 1991). Lo anterior influye directamente sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica y la posterior contaminación de las fuentes de agua, ya sea por el aumento de sedimentos y por los nutrientes lixiviados.

Por tanto, para emprender un manejo de la fertilidad del suelo, es importante reconocer los aspectos o circunstancias que conllevan a la pérdida de los nutrientes por la degradación del suelo, los cuales según Baker y Laflen (1983) pueden ocurrir de tres maneras:

- Por percolación en el perfil del suelo (lixiviación).
- En solución en el agua de escorrentía.
- Adsorbidos a los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía.

En tal sentido, es necesario buscar alternativas de coberturas que permitan beneficios tanto económicos como ecológicos, para lo cual, las plantaciones forestales comerciales se consideran actualmente como alternativas para la región Andina Colombiana, siendo importantes generadores de beneficios adicionales como la protección del suelo, la conservación de la biodiversidad, la calidad y la abundancia de agua (Rodríguez *et al.*, 2009).

3.5 Incendios forestales

La quema tradicionalmente hace parte de la actividad de limpieza de terrenos para establecer nueva plantación forestal (Alvarado, 2007). Sin embargo, aunque algunos técnicos consideran imposible descartar las quemas de las actividades forestales, otros rechazan radicalmente el uso de esta práctica debido principalmente al efecto del fuego sobre las propiedades del suelo principalmente en la reducción del contenido de materia orgánica, aumento de la acidez y por ocasionar erosión del suelo descubierto (Ramnarine, 2001).

La fertilidad química del suelo después del incendio llega a ser mucho mayor que su valor inicial, sin embargo esta fertilidad es momentánea ya que la mayor parte de los nutrientes solubles que son incorporados tras el incendio procedentes de las cenizas, se pierden muy rápidamente por lavado o lixiviación cuando aparecen las primeras lluvias (Bernabelen, 2008).

Después de un incendio normalmente se disminuye la acidez del suelo debido a la destrucción de ácidos orgánicos y aporte de carbonatos, cationes básicos y óxidos procedentes de las cenizas (Granged, 2011). No obstante después de un incendio se presenta un descenso en la capacidad de intercambio catiónico especialmente en los primeros centímetros dependiendo de la severidad del incendio, del contenido previo de materia orgánica y naturaleza de los minerales de las arcillas (Gil *et al.*, 2010).

Por tanto, el mayor peligro de los incendios en la actividad forestal, es el lavado o la erosión del suelo sobre todo en pendientes fuertes o en sitios que carecen de un estructura edáfica con vegetación capaz de fijar y aprovechar rápidamente los nutrientes, puesto que se aumenta de esta forma la probabilidad de que la acción del viento, la erosión y la lixiviación laven el aporte de nutrientes (Bodi, 2007).

3.6 Condiciones externas

Además de las mencionadas situaciones que pueden inferir con la adecuada nutrición de los árboles en el trópico, existen otras situaciones externas al ambiente edáfico que puede ser en su momento, limitantes del adecuado desarrollo forestal, entre estas, se puede mencionar el costo de los fertilizantes químicos, orgánicos y enmiendas, el

transporte o flete de los productos y en otros casos, la falta de mano de obra no calificada.

En este sentido, Marín (2013) indica que los precios en Colombia para los productos como urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, al momento del despacho en puerta de la fábrica superan entre el 30 y 50% el precio mundial, que además, este precio de los fertilizantes en Colombia representa un factor determinante para la pérdida de rentabilidad y competitividad en la agricultura colombiana, además, especifica que seis compañías concentran casi el 92% de la oferta nacional de fertilizantes.

El silvicultor reconoce que el costo de los fletes en el transporte mayor y menor en los proyectos forestales, podría expresarse como una problemática en el manejo de la fertilidad del suelo. En Colombia, esta situación para a el mediano y pequeño silvicultor representa en muchos casos la negativa en la aplicación de productos nutritivos para el adecuado desarrollo de la plantación, en consecuencia no se obtendrá el rendimiento esperado, por tanto, es indispensable la escogencia del sitio donde se desarrollara el proyecto forestal, contar con vías de acceso y cercanía a vías terciarias, será la clave para minimizar estas situaciones que van en contra de la adecuada nutrición forestal.

4. Prácticas para mejorar la producción forestal en el trópico

En esta capítulo se abordará algunas prácticas que desde el punto de vista edáfico contribuyen para mejorar la producción forestal y más aún en el trópico Colombiano. Sin embargo, es importante mencionar que las acciones para alcanzar dicho objetivo, son todas aquellas actividades que hacen parte del manejo silvicultural, el cual comienza desde definir el objetivo de la plantación, una adecuada elección del sitio y de la especie a utilizar, así, como de la obtención de un excelente material vegetal procedente de una semilla con alta calidad genética.

Por tanto, analizaremos las actividades que se deben adelantar desde el componente suelo, para mejorar el desarrollo del sector forestal.

4.1 Análisis de suelos

El análisis del suelo es una herramienta importante para evaluar y/o evitar problemas de desbalance de nutrientes en las plantas, y dado que el suelo es la fuente de la mayoría de ellos, pueden ser vistos como el proveedor natural de las plantas (Cuesta, 2010). Los resultados del análisis del suelo tienen que ser considerados como índices, puesto que no representan la cantidad realmente disponible del nutriente en el suelo, por esta razón, es mejor considerar estos resultados en términos cualitativos y no cuantitativos (Osorio, 2012). En tal sentido, Zapata (2009), considera que tales índices de disponibilidad son específicos para un método de extracción determinado.

El principal objetivo del análisis, es evaluar la capacidad del suelo para suministrarle nutrientes a la planta y con base en una apropiada interpretación, se pueden definir los niveles críticos y de toxicidad para cada elemento y para cada especie (Alvarado, 2007).

Cuesta (2010) considera esencial para el manejo de la fertilidad del suelo en el trópico, el realizar adecuadas recomendaciones para aplicar los niveles satisfactorios de nutrientes. En este sentido, se hace además importante conocer el comportamiento normal de

nutrición de la especie a establecer, para con ello poder obtener para Colombia plantaciones forestales con un buen desarrollo y crecimiento.

El resultado de análisis del suelo, permite además, determinar el pH, los contenidos de Ca, Mg, K y acidez intercambiable, la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE), y el porcentaje de saturación de acidez. La mayor parte de la acidez provienen del Aluminio, por lo que generalmente se habla de acidez intercambiable (Al^{+3} , H^+) (Cuesta, 2010).

Existen algunas técnicas para el diagnóstico de la fertilidad del suelo, además para determinar las necesidades de nutrientes en las plantas, para lo cual Cuesta y Villaneda (2010) presentan la siguiente secuencia:

- Análisis del suelo.
- Análisis de tejidos vegetales.
- Síntomas de deficiencia de nutrientes de la planta.
- Ensayos de invernadero o de campo.

De igual forma, afirman acertadamente, que el análisis del suelo utilizado en forma adecuada puede ayudar en el diagnóstico de los desórdenes nutricionales en las especies forestales, sin embargo, se debe tener muy presente, que el resultado de dicho análisis, en muchos casos no reflejan el estado de fertilidad real de los suelos.

4.2 Encalamiento

Encalar es el proceso de aplicar cales o enmiendas al suelo para corregir su acidez, en el cual se dan reacciones de neutralización; es decir, la cal consume H^+ de las diferentes fuentes de acidez del suelo aumentando el pH del suelo (Zapata, 2004).

El encalado es una práctica agrícola que se usa desde tiempos remotos para mejorar la productividad de los suelos ácidos, por lo que este proceso tiene un efecto múltiple sobre diferentes características químicas, físicas y microbiológicas del suelo, por este motivo el encalado es objeto de estudio en el mundo (Osorno, 2012).

Se conoce como cal principalmente al carbonato de calcio proveniente de rocas calizas o mármol y dolomitas, pero actualmente se utilizan una gran variedad de rocas ultra básicas que algunos las denominan “harinas de roca” para encalar y por eso se habla mejor de enmiendas o correctivos para el suelo (Osorno, 2012)

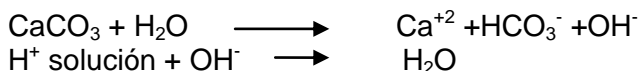
Las cales o enmiendas tiene como acción fundamental modificar favorablemente las propiedades físicas y/o químicas, particularmente la acidez del mismo, en este caso, el término enmienda incluye a los correctivos de la acidez del suelo (Osorno, 2012).

Las cales o enmiendas usadas en el encalamiento como correctivos de la acidez, son productos comerciales tipificados como fuentes minerales de origen natural o industrial que portan en su composición carbonatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos y silicatos de calcio y/o magnesio, y debido a su diferente naturaleza química, estos materiales difieren en su capacidad para neutralizar la acidez del suelo (Molina, 1998; Castro y Gómez, 2010).

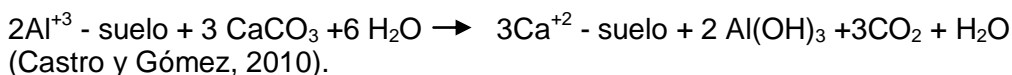
Las prácticas de encalamiento de suelos ácidos en la actualidad son muy frecuentes, y se reconoce la importancia y beneficios del encalamiento, sin embargo, Castro y Gómez (2008) manifiestan que dicha práctica no es vista ni bien entendida en su significado y repercusión forestal.

No obstante, Alvarado y Fallas (2004) manifiestan como el encalado y la inoculación con micorrizas de los suelos es una de las prácticas que más se emplean para corregir especialmente las deficiencias y aprovechamiento del fósforo. Además, esto permite reducir los niveles de toxicidad por aluminio y favorecer la disponibilidad de nutrimentos como el calcio (Ca), magnesio (Mg) y molibdeno (Mo), elementos que limitan el desarrollo y la producción de las plantaciones forestales en suelos andisoles. Del mismo modo (Alvares *et al.*, 2013) encontraron como el encalado estimuló el porcentaje de colonización, independientemente de la inoculación con HMA, para corregir deficiencia de fósforo en un Andisol cultivado con *Pinus halepensis* en el oriente del estado de México.

Es de recordar, que la acidez puede ser activa (hidrogeniones de la solución del suelo (H⁺)) y/o acidez intercambiable (causada principalmente por el aluminio (Al⁺³)). Esta corrección de acidez, como lo manifiesta Castro (2010), se origina gracias a una reacción química que ocurre cuando se aplica la cal, la cual se muestra a continuación:



La reacción química para neutralizar acidez intercambiable es:



Encalar mejora las propiedades del suelo y generalmente se mejora en la productividad, Sin embargo, el exceso del encalado en suelos tropicales es muy peligroso y puede tener resultados catastróficos en la agricultura (Fassbender, 1986).

Osorno (2012) manifiesta que los siguientes son los tipos de cales y/o enmiendas más comunes que sirven para abonar:

- Carbonato de calcio o cal agrícola: CaCO_3 es conocido como calcita se obtiene a partir de la roca caliza y es la enmienda más utilizada.
- Oxido de calcio: Oxido de calcio o cal viva (CaO), se obtiene por la calcinación del carbonato de calcio. Su manejo debe ser cuidadoso debido a la alta alcalinidad de este material, es muy caustico, esto principalmente porque su reacción es exotérmica.
- Hidróxido de calcio: este material se conoce como cal apagada y se obtiene hidratando el CaO , su manejo es más fácil y reacciona rápidamente.
- Cal dolomita: es un carbonato doble de calcio y magnesio en relaciones variables.
- Carbonato de magnesio: es conocido como magnesita y se aplica en suelos ácidos muy deficientes en magnesio.
- Oxido de magnesio: este material resulta de la calcinación del carbonato de magnesio.
- Escorias de alto horno o escorias básicas.
- Roca fosfórica.
- Yeso.
- Silicato de magnesio.

Del mismo modo, aplicar cales en suelos ácidos tiene un efecto positivo, debido al incremento de la comunidad de microorganismos benéficos como bacterias, hongos y actinomicetos (Xue *et al.*, 2010). Así mismo, Richardson *et al.*, 1988 manifiestan que el encalamiento mejora en las plantas la fijación biológica de nitrógeno y el crecimiento de las raíces en suelos ácidos.

Generalmente las plantaciones forestales en el trópico se dan en suelos ácidos, donde la acidez reduce significativamente el crecimiento medio anual, Alvarado y Fallas (2004) evaluaron en Costa Rica el encalado en el cultivo de la teca y encontraron que con la adición de 1 kg de carbonato de calcio por planta se aumentó el crecimiento anual hasta en un 59%.

Dada la diversidad de suelos en el trópico, no se pueden hacer recomendaciones generales de aplicación de encalado. Molina (1998) argumenta que los suelos dominados por minerales arcillosos de tipo 2:1 (motmorillonita, vermiculita, illita) que predominan en regiones templadas pero que también están presentes en zonas tropicales y subtropicales, y estos se comportan en forma diferente de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles, Oxisoles e Inceptisoles) dominados por mineralogía de arcillas de óxidos e hidróxidos de Fe y Al y los dominados por caolinita y alófana en los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles).

Vásquez (2001) revela que la aplicación de cal en suelos pobres y ácidos ha tenido efecto positivo en los rendimientos en coníferas, encontrando, que el encalar el *Pinus*

caribaea, en suelos con altos contenidos en aluminio e hidrógeno, se manifestó una respuesta significativa en incremento de diámetro y altura.

Además, la aplicación de cales en suelos ácidos tiene un efecto positivo en el incremento de comunidades de microorganismos benéficos del suelo como bacterias, hongos y actinomicetos (Xuel *et al.*, 2010), en general en suelos ácidos predominan los hongos, luego al encalar y subir el pH predominan las bacterias (Baath y Anderson, 2003).

4.3 Fertilización química

La incorporación de la fertilización química en el manejo de las plantaciones forestales se ha estado utilizando en forma creciente, existen diversos ensayos y estudios de nutrición y fertilización para determinar el efecto de diferentes tipos de fertilizante sobre el desarrollo forestal; sin embargo, Alvarado y Raigosa (2007) expresan que estos ensayos a pesar ser caros y necesitar varios años, son concluyentes en el diagnóstico de problemas nutricionales en los árboles.

Judd *et al.*(1996) y Fisher y Binkley (2000) mencionan que con la aplicación de fertilización química en las plantaciones forestales, se favorece el rápido crecimiento del sistema radical, y con ello, se estimula el desarrollo de las copas y por ende la producción de madera, sin embargo, mencionan que el incremento en la concentración de nutrientes en el área foliar del árbol, puede o no indicar un aumento en la producción total de madera, esto, debido a que no todas las hojas reciben la misma cantidad de luz y que la cantidad de transpiración que realice el tejido fotosintético, puede verse disminuido por falta de humedad en el suelo.

Van Goor (1963) y Bruning (1964) citados por Vázquez (2001) encontraron que las coníferas tienen requerimientos nutricionales diferentes que las latifoliadas, pero marcados requerimientos por potasio y magnesio, aunque menores por nitrógeno y fósforo, y que en definitiva las mejores respuestas se tienen en la combinación de los tres elementos (N-P-K).

Alvarado *et al.* (2006), demostraron las respuesta significativa de la especie *Pinus caribaea* a la fertilización en suelos ácidos franco arcillosos y pocos profundos del trópico en Turrialba Costa Rica, con la adición de 30 g por árbol de NPK cada 15 días después del trasplante, incrementando el crecimiento promedio en altura en los primero seis meses. Del mismo modo, Herrero *et al.*, (1985) indicó que el *Pinus caribaea* creciendo en suelos ácidos, franco arcillosos y pocos profundos en Pinar del Río, Cuba, respondió favorablemente a la aplicación de fosforo (P) sin embargo, los mejores rendimientos se obtiene con la aplicación de fórmulas que incluyan nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K) a razón de 50 kha⁻¹ durante los primeros 4 años.

En estudios sobre la distribución de biomasa del *Pinus oocarpa* con diferentes edades, Waterloo (1994) documenta que la acumulación de los macro nutrientes aumenta con la edad de la plantación; se alcanza el máximo de acumulación entre los 6 y 8 años de edad, lo cual coincide con el desarrollo de la copa, además, que con el aumento de nutrimentos en las hojas se favorece la fotosíntesis

Vásquez (2001) expresa que las principales razones para fertilizar las plantaciones forestales, es el de corregir deficiencias específicas de nutrientes o una falta generalizada de fertilidad en el suelo que afectan el desarrollo de los árboles, además, para estimular el crecimiento de los árboles aún en sitios donde el este es moderado.

A pesar de que los beneficios de la fertilización forestal pueden demostrar y observar con facilidad, la implementación de un sistema de fertilización adecuado para cada sitio en particular no es tan fácil. En tal sentido, resulta importante y beneficioso poder conocer los resultados de aplicación en otras regiones con las especies que deseamos establecer, esto complementado a un adecuado análisis del suelo con su respectiva recomendación, podrá contribuir a mejorar el rendimiento en volumen y disminuir los turnos de aprovechamiento.

En el trópico, debido a la baja disponibilidad de nutrientes en la mayoría de los suelos, Gómez (2012) indica que se requiere mejorar la nutrición de las plantas en las etapas iniciales y que son críticas para el futuro desarrollo de la plantación.

Al momento de aplicar los correctivos químicos al suelo con la fertilización, el silvicultor para obtener el resultado esperado con el producto, se deberá realizar la aplicación en el lugar indicado, que corresponde, al sitio correcto para que el producto esté disponible para el sistema radicular de la planta.

4.4 Inoculación micorrizal

Las micorrizas representan la asociación simbiótica entre algunos hongos y las raíces de plantas y árboles (Trappe, 1994). Además, el autor define a las micorrizas en términos funcionales y estructurales como “órganos de absorción dobles que se forman cuando los hongos simbiotes viven dentro de los órganos de absorción sanos (raíces, rizomas o talos) de las plantas terrestres, acuáticas o epífitas”. En esta asociación, la planta le proporciona al hongo carbohidratos (azúcares, producto de su fotosíntesis) y un hábitat para completar su ciclo de vida. Por su parte, el hongo le permite a la planta una mejor captación de agua y nutrimentos con baja disponibilidad en el suelo (principalmente fósforo), así como defensas contra fitopatógenos. Por tanto, ambos simbiotes, hongo y planta, resultan mutuamente beneficiados por lo que la asociación se considera como un “mutualismo”.

Read (1991) y Finlay (2008) expresan que esta asociación se presenta en aproximadamente el 90% de las plantas, por lo que se ubica en todos los ecosistemas del mundo. Además, destacan que existen hongos que pueden encontrarse en varios

tipos de suelo y climas teniendo un patrón de distribución mundial, lo que indica que están aparentemente adaptados a diversos hábitats. No obstante, argumentan que los factores físicos y químicos del suelo pueden restringir su distribución.

La inoculación micorrizal puede ser valiosa en situaciones en que no existan hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el suelo o su número sea muy bajo, o donde las poblaciones nativas no sean lo suficientemente agresivas y eficaces (Sieverding, 1991; Siqueira y Saggin-Junior, 2001).

La red de hifas (pequeñas raicillas) producidas por los HMA en el suelo durante su asociación con la planta huésped, provee una mayor superficie de absorción de los pelos radiculares de las plantas (Bagyaraj, 2006). Por tanto, la función principal de la micorriza en especial las hifas, es facilitarle a la planta la adquisición y absorción de agua, nitrógeno y en especial el fósforo (Diez, 2006). Sin embargo, esta asociación proporciona otros beneficios a las plantas, entre los que destacan la protección ante el ataque de parásitos, patógenos y nematodos. Asimismo, contribuye al aumento del área de exploración de la raíz, lo que incrementa el flujo de agua del suelo a la planta (Camargo-Ricalde, 2002).

Olsson *et al.*, (1999) manifiestan que las hifas de los hongos hacen parte de la biomasa del suelo y son importante sumidero de carbono al ser consumidas por la fauna del suelo como los nemátodos y los microartrópodos.

Osorio (2014) manifiesta que los hongos micorrizales son una alternativa para el manejo de los suelos del trópico altamente meteorizados como Oxisoles y Ultisoles, y en consecuencia son importantes en el manejo de los nutrientes del trópico.

Existen varios tipos de hongos micorrízicos (ectomicorrizas, endomicorrizas y ectendomicorrizas) que se diferencian entre sí por sus características morfo-anatómicas, y por las plantas hospederas que colonizan (Brundrett *et al.*, 2005) citado por Sierra *et al.*, (2012).

En general, son más frecuentes las endomicorrizas que forman asociación aproximadamente en el 80% de las plantas vasculares, especialmente en plantas del trópico (Strasburger 2004); mientras que las ectomicorrizas son características de ciertos grupos de árboles y arbustos de regiones templadas.

Para las plantaciones forestales en el trópico, la inoculación es una práctica silvicultural fundamental. Además, como lo expresa Vásquez (2001), las especies forestales más utilizadas en reforestación como *Pinus* spp y *Eucalyptus* spp forman asociaciones ectomicorrízicas con un alto grado de dependencia entre los simbiotes, Strasburger (2004) argumenta que el *Pinus silvestris* muy común en el hemisferio Norte, en regiones relativamente frías, puede formar ectomicorriza con 25 especies de hongos.

Resultados de inoculación con *Glomus fasciculatum* en vivero y campo para especies forestales de alto interés forestal en el trópico como la teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), mostraron que en vivero la teca obtuvo mayor incremento en diámetro basal, altura total, peso seco del follaje y en el sistema radicular, mientras que en campo la melina reflejó diferencias significativas en diámetro y altura total (Hernández, 2009).

Estudios realizados en coníferas como el pino romerón, mostraron la dependencia de la especie a la asociación con HMA (Diez, 2006). Del mismo modo, ensayos de micorrización en *pinus radita* en distintos sustratos de vivero, demostró que los sustratos ricos en nutrientes favorecen la micorrización del pino con las especies *Rhizopogon luteolus* y *Scleroderma verrucosum* (Jara, 2005).

Ramírez (2010) comprobó la asociación del *Pinus. devoniana* y *Pinus pseudostrobus*, con los hongos *Pisolithus tinctorius* cepa Española, *Pisoliths tinctorius comercial* (PHC) y *Scleroderma texense*, además, que los efectos de la micorrización parecen acrecentarse conforme aumenta la edad de los árboles.

En sitios severamente degradados y desprovistos de vegetación por problemas de erosión del municipio de Morelia México, Gómez *et al.* (2013) realizaron inoculación del *Pinus pseudostrobus* con el hongo ectomicorrízico *Pisolithus tinctorius*, observando el incremento en la supervivencia del pino, lo cual indica el potencial que tiene dicha asociación para reforestar sitios altamente degradados.

Es evidente que con las prácticas silviculturales mencionadas se puede incrementar la productividad de las plantaciones forestales. Sin embargo, Mesén (1995) argumenta que si se logra aumentar la productividad de una plantación de manera genética, este mejoramiento perdurara a lo largo de las generaciones sin necesidad de repetir la inversión en fertilizantes en el futuro; no obstante, entendiendo y reconociendo lo importante de esta apreciación, el mejoramiento genético no es tema que abordamos en este trabajo.

4.5 Práctica silvicultural

En el desarrollo del sector forestal, es indispensable cuando se desea establecer una nueva plantación, poseer un adecuado plan de establecimiento y manejo forestal (PEMF), el cual debe ser elaborado por un técnico capacitado y con una apropiada experiencia en silvicultura.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) describe al PEMF como el documento que debe involucrar todas las recomendaciones y normas técnicas que regulan las acciones a ejecutar en una plantación forestal, de acuerdo con principios de utilización racional y de rendimientos sostenibles de los recursos naturales renovable y

del medio ambiente. Dicho documento debe involucrar como mínimo aspectos tales como:

- Descripción de las condiciones biofísicas de la zona.
- Extensión y ubicación geográfica del predio.
- Área a reforestar.
- Preparación del terreno
- Definir la especie a utilizar y conocer la procedencia del material vegetal (semilla o plántula).
- Establecimiento y manejo de plantación con cronogramas coherentes para las actividades, con sus respectivos tiempos y plazos de ejecución.
- Análisis de suelos para la programación de aplicaciones nutritivas.
- Podas y control de rebrotes.
- Protección forestal.
- Manejo silvicultural (entresacas y aprovechamiento)
- Flujo de caja del proyecto, con ingresos y egresos, fuentes de financiación y cálculo de los indicadores financieros tales como: Tasa interna de retorno Beneficio/costo entre otros.

Indispensable entonces, analizar de antemano las problemáticas antes mencionadas (Capítulo 3) para tener éxito en la escogencia del sitio a plantar, debido a que también es una práctica de manejo de la fertilidad, el aprovechar la fertilidad natural de los suelos. Sin embargo, en Colombia es muy común el escuchar comentarios o apreciaciones como *“sembrar pinos acidifica y esteriliza el suelo”* o *“los pinos acaban con los suelos”*, situación que de alguna manera afecta el sector forestal colombiano, puesto que desmotiva a los nuevos inversionistas.

De acuerdo con Ladrach (1980) “la creencia de que las coníferas acidifican los suelos parece estar basada en la historia de Europa Occidental en donde durante los siglos 15, 16 y 17 los bosques naturales fueron eliminados casi en su totalidad para obtener leña, madera para la construcción o fueron talados para convertirlos en zonas agrícolas. Posteriormente en los siglos 17 y 18, al ver que los bosques desaparecían, y junto con ellos sus beneficios como la caza, se realizaron establecimientos de coníferas (abetos, alerce y pinos) mezclados con robles y hayas, luego los campesinos comúnmente retiraban de las plantaciones las ramas caídas para leña y la hojarasca de acículas de las coníferas como paja para los animales. Por tanto, debido a dicha práctica de eliminación de hojarasca y sus nutrimentos durante varios periodos generó que los investigadores del siglo 20 hallaran que los suelos debajo de las coníferas estaban empobrecidos y que el pH era inferior en comparación a los suelos de los bosques adyacentes”.

Del mismo modo, es frecuente en el sector forestal las siguientes apreciaciones; la plantación comercial es un cultivo de muy largo plazo y que en muchos casos resulta costoso su mantenimiento, además de que es una actividad netamente de personas adineradas. Ciertamente la actividad forestal requiere de una serie de costos en toda su etapa de desarrollo y producción, sin embargo, una manera de minimizar dichos costos, es ser práctico y eficiente en la toma de las decisiones en todo el proyecto productivo, además, que existen muchos manuales que dan pautas claras de cómo desarrollar la reforestación y como abordar su posterior aprovechamiento.

Montenegro y Malagón (1990) han reconocido que para el trópico, la práctica silvicultural de preparación del terreno con labranza del suelo, tiene el objetivo fundamental de mejorar el espacio físico del suelo en el cual se van a desarrollar las raíces de las plantas. Además, es una estrategia que ayuda a disminuir costos puesto que ayuda a combatir algunas malezas y plagas; del mismo modo, entre los objetivos específicos del laboreo del suelo se tienen los siguientes:

- Facilitar la germinación de las semillas o el adecuado crecimiento de la plántula.
- Incorporar materia orgánica.
- Favorecer la entrada y acumulación de agua para las plantas.
- Mejorar las condiciones de aireación
- Disminuir los costos de preparación del terreno en el establecimiento.

En el trópico, para el establecimiento de nuevos cultivos es muy común la actividad de retirar la vegetación existente principalmente rastrojos para posteriormente quemarlos, además de la aplicación de herbicidas, dichas acciones con certeza alteraran la fertilidad química del sitio, y consecuentemente es de esperarse que se deteriore la fertilidad física y biológica.

Para iniciar un nuevo proyecto productivo, es preciso entender y reconocer que existen limitantes en el suelo de tipo físico, químico y biológico, que van en detrimento del desarrollo forestal, por tanto, el descubrirlos y analizarlos con anticipación, se podrá tener criterios claros para la toma de decisiones que permitan mejorar los proyectos madereros del trópico; por tanto, reconocer estas restricciones en el suelo para el buen crecimiento y desarrollo vegetal, son los aspectos que se pretende resaltar con el actual documento.

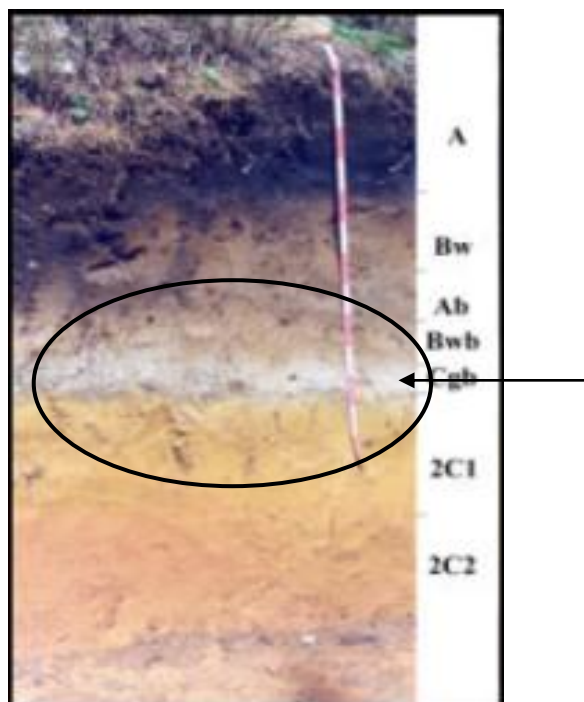
Consecuentemente, es importante reconocer en campo las diferentes situaciones que limitan el crecimiento y desarrollo normal de los árboles, este es el primer paso para ser hábiles en el manejo de la fertilidad del suelo, comenzando por ejemplo con los siguientes escenarios, si al recorrer el predio se encuentran zonas con encharcamientos prolongados tanto en zonas planas como en pendientes medias, es de apreciar que allí la alta saturación de agua origine condiciones de reducción, puesto que la saturación de agua y la ausencia de oxígeno durante un tiempo largo pueden producir compuestos tóxicos para la planta. Otro caso común es la presencia de formaciones rocosas, comúnmente llamados suelos o zonas muy pedregosas, donde normalmente no hay un buen desarrollo del horizonte A, del mismo modo, si al observar un corte en el suelo, sea por una barranca, una vía o por otra circunstancia, se presentan bandas o líneas gruesas o delgadas (figura 4-2a y 4-2b) que no correspondan a lo normal del suelo, esto puede sugerir la presencia de una restricción física en el sitio.

En las figura 2 (a y b), se ilustran algunas posibles restricciones en el suelo para el desarrollo normal de crecimiento radicular de los arboles (Jaramillo, 2002)

Figura 2a: Posibles restricciones en el suelo para el desarrollo forestal. Nótese Línea roja al interior del suelo que corresponde a una cementación por hierro



Figura 2b: Posibles restricciones en el suelo para el desarrollo forestal. Nótese la línea blanca al interior del suelo que corresponde a una cementación por sílice. A la derecha se muestra una escala de horizontes de suelo: A, Bw, Ab, Bwb, Cwb, 2C1, 2C2.



En las figuras anteriores, en el caso de la 2a se tiene un suelo con presencia de un horizonte plácico, el cual es comúnmente delgado, de color negro a rojo oscuro, que se encuentra cementado ya sea por hierro, o hierro y manganeso o por complejos de hierro y materia orgánica. Más o menos se localiza comúnmente dentro de los 50 cm superficiales y es paralelo a la superficie. El horizonte plácico tiene una baja permeabilidad y resulta impenetrable para el agua o las raíces, del mismo modo.

En la figura 2b, se tiene un suelo con presencia de un horizonte mineral cementado con sílice llamado Duripán y que le presenta restricciones al buen desarrollo radicular es las especies forestales (Jaramillo, 2002).

5. Plantaciones forestales en Colombia.

Colombia presenta ventajas comparativas con relación a otros países en cuanto a la producción de biomasa, mejores rendimientos y ciclos biológicos más cortos como es el caso del eucalipto, con el que se pueden lograr rendimientos de hasta 30 (m³/ha/año) con un turno de 8 años (Trujillo, 2009). Las ventajas climáticas además, permiten establecer plantaciones de diversas especies de pinos en la zona alta andina, con la particularidades como el *Pinus caribea* en la Orinoquia, el *Eucaliptus grandis* en la zona media andina y *Tectona grandis* en la zona baja tropical (PROEXPORT, 2010).

Sin embargo, es importante recordar que el desarrollo forestal con fin comercial en Colombia, según lo reporta Vásquez (2001), comienza en la década de los sesenta, donde la empresa Cartón de Colombia inicia los programas de reforestación industrial para abastecer las necesidades de su empresa. Además esta empresa inicia programas de investigación con las especie pinos, cipreses y eucaliptos que han arrojado aportes importantes al desarrollo de este sector en el país.

Luego, para el periodo comprendido entre 1980 y 1986, Colombia alcanza el mayor auge de la reforestación con un promedio de 27100 ha año⁻¹ (Vásquez, 2001). Esto debido a los incentivos tributarios y fiscales que fueron otorgados a esta actividad económica, y que además permitieron importantes avances en la investigación y nuevas tecnologías en este campo.

Piedrahita (2001) presenta datos de Smurfit Cartón de Colombia en los cuales el país a dicha fecha poseía en pie cerca de 165 mil hectáreas de bosques plantados, repartidos entre plantaciones con fines comerciales (120 mil) y plantaciones con fines de protección (45 mil). Además, de la misma fuente se indica que los bosques plantados decrecen a un ritmo de 7 mil hectáreas por año debido a que se planta menos de lo que se aprovecha para poder abastecer la demanda del país.

La Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF), reportó en el año 2008 que teniendo en cuenta áreas abiertas, pastizales y suelos que actualmente tenían otros usos (excluye las áreas cubiertas por bosques), en Colombia de las 114 millones de hectáreas de su extensión, existen 17 millones con aptitud forestal distribuidas en varios pisos altitudinales, y que a la fecha, solo se estaba usando el 1,5% (aproximadamente 253.066 ha) del potencial forestal del país.

En el año 2011, el plan nacional de acción para la reforestación comercial diseñado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), estableció una meta de 600.000 hectáreas al 2014. Esto implicaba un crecimiento de 71.43% con respecto a las 350.000 hectáreas cultivadas en ese año.

Por lo tanto, para potencializar el desarrollo forestal en Colombia se requería de una zonificación de aptitud forestal, la cual como lo expresa Bello (2011), es aquella distribución para determinar las regiones o áreas más aptas para el establecimiento de plantaciones forestales. Esto se hace con base en el concepto de oferta ambiental, donde se ubiquen sectores con suelos productivos de fácil accesibilidad, con condiciones socioeconómicas favorables para obtener un sistema rentable; por tanto para Colombia, se tiene la zonificación forestal es realizada por CONIF en el 2008 (ver tabla 4).

Tabla 4. Zonificación de aptitud forestal por núcleo en Colombia (CONIF, 2008).

Departamento	Sin Restricciones	Con restricciones menores
Antioquia	1.477.221	2.137.309
Atlántico	35.820	40.152
Bolívar	355.475	94.177
Caldas	22.420	146.284
Cauca	90.227	182.036
Cesar	376.935	392.104
Córdoba	189.753	233.770
Cundinamarca	150.116	150.887
Huila	50.022	163.283
Magdalena	500.166	194.942
Nariño	365.621	295.872
Santander	281.353	451.824
Sucre	136.263	167.934
Tolima	229.705	145.193
Quindío	32.130	17.846
CORPORINOQUIA (Jurisdicción)		
Arauca		930.025
Boyacá	2.892	2.877
Casanare	24.295	1.705.973
Meta	339.403	2.604.763
Vichada	467.834	2.128.105
Total	5.127.650	12.185.356
Total zonas con Aptitud forestal 17.313.006 (Año 2008)		

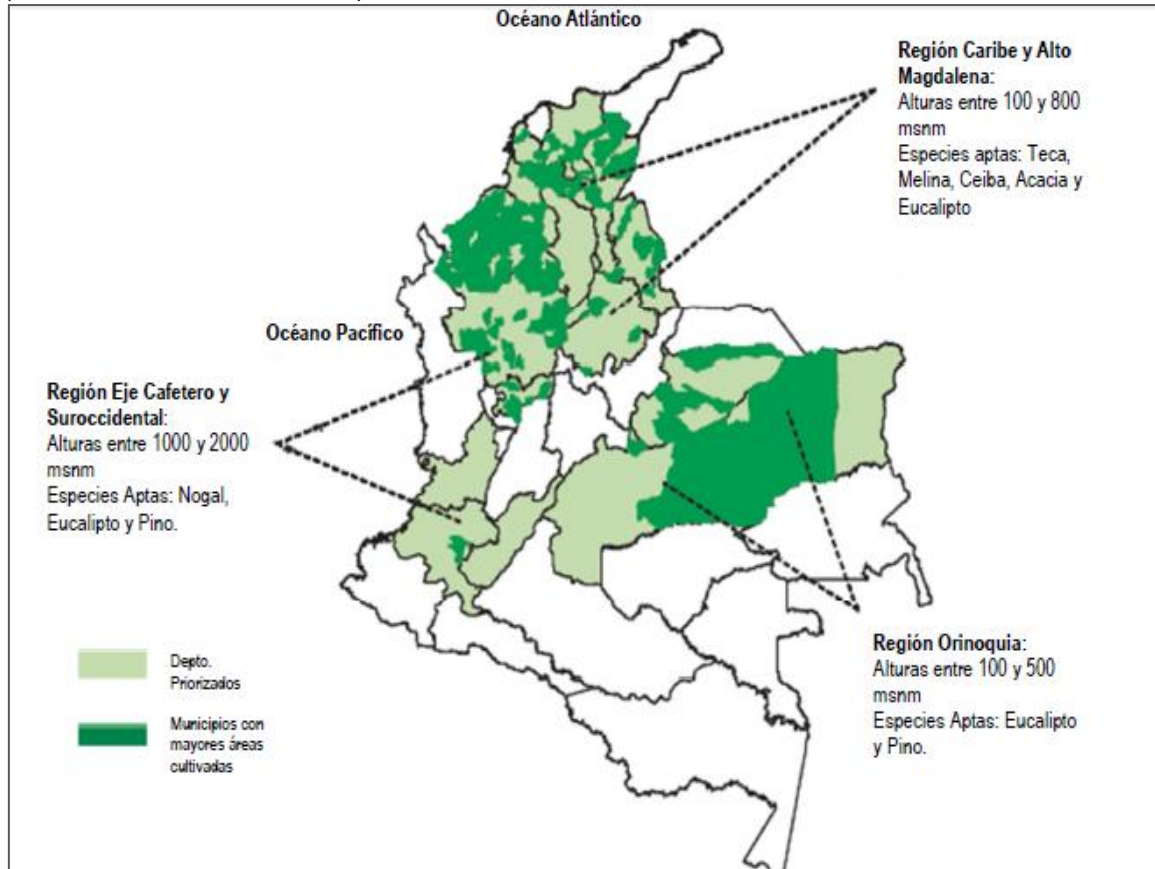
Luego, La Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), reporto estudio en el cual para el 2015 (ver figura 3) se identificó 24 millones de hectáreas aptas para desarrollar plantaciones forestales comerciales y que sólo a la fecha se cuenta con 450.000 hectáreas, además, que la meta es pasar de 450.000 a 1 millón de hectáreas establecidas en los próximos 10 años y aprovechar las tierras privilegiadas que tiene Colombia para convertirse en ejemplo de reforestación y la despensa que el mundo necesita.

Figura 3. Zonificación de áreas por aptitud forestal comercial en Colombia (2015), elaboró UPRA 2014.



En la actualidad Colombia posee plantaciones forestales de carácter comercial localizadas en todo su territorio, algunas con un adecuado manejo y otras con prácticas no acordes para alcanzar el objetivo esperado (CONIF, 2012), sin embargo, nuestro país viene incrementando las áreas plantadas, generalmente con las especies pino y eucalipto, que son las más establecidas con la figura del certificado de incentivo forestal CIF, del mismo modo, debido a la llegada de empresas reforestadoras extranjeras (MADR, 2011).

Figura 4: Zonas y especies Potenciales para el Desarrollo de la Actividad Forestal (Fuente: FAO, MADR 2012)

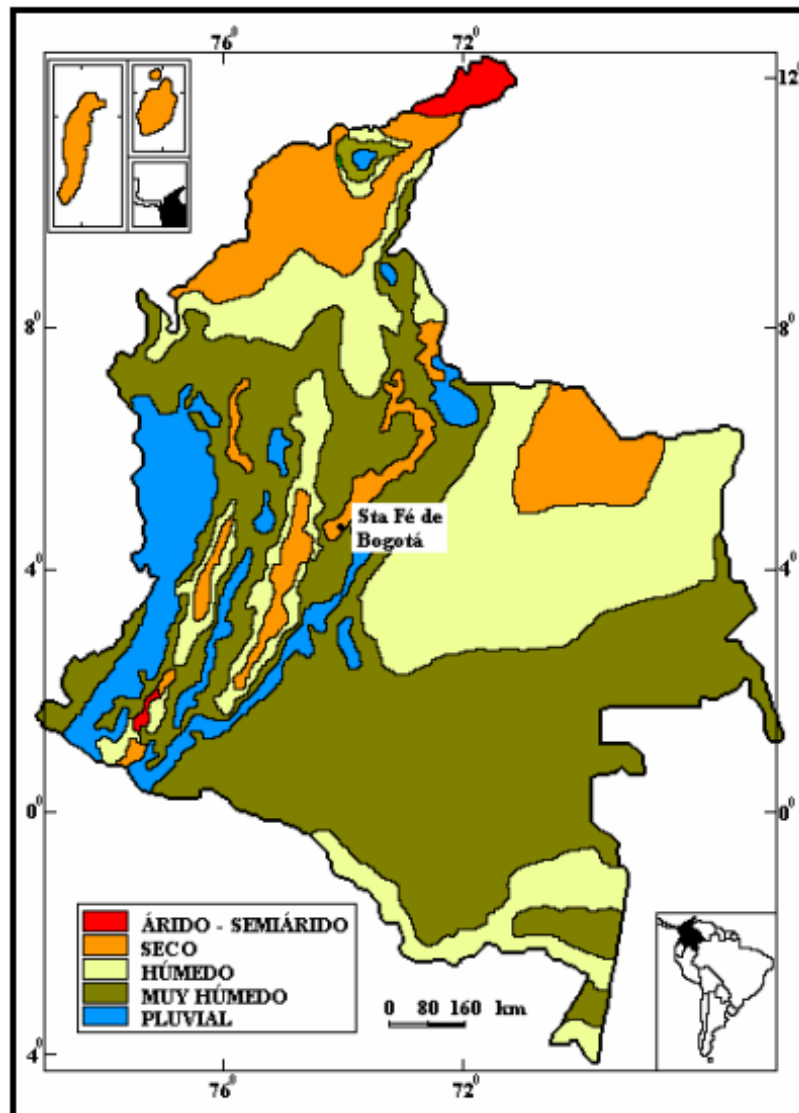


5.1 Los suelos en Colombia

Por su ubicación geográfica, Colombia posee un clima tropical con temperatura muy similar durante la mayor parte del año. Además, según reportes del IGAC (2003) y mencionado por Jaramillo (2004), el territorio colombiano presenta una condición climática húmeda, muy húmeda o pluvial.

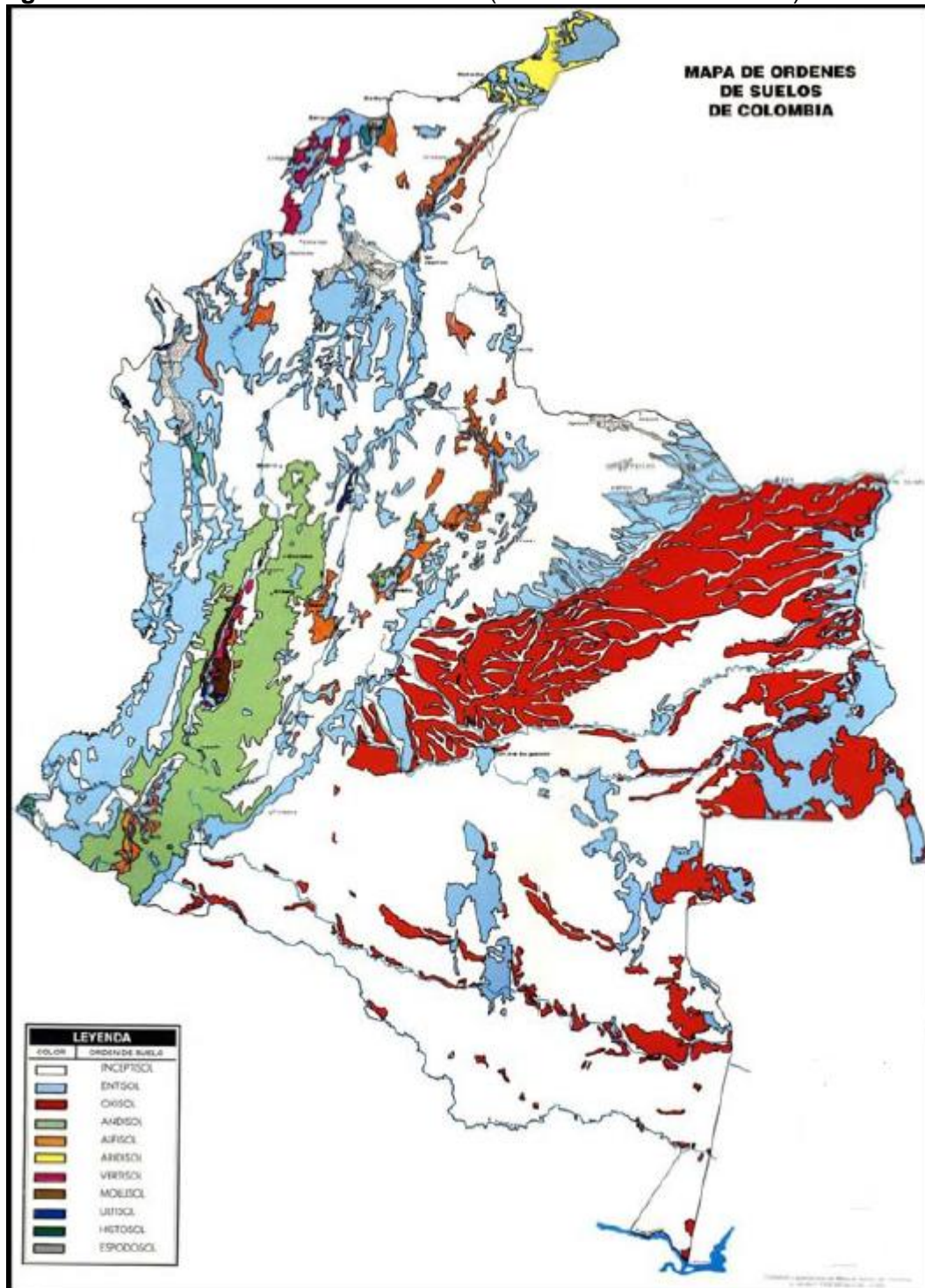
El IGAC (2003) que reporta que el 80% del territorio Colombiano presenta altas condiciones humedad, en tal sentido, es de esperarse que se tenga en gran parte de la nación, suelos ácidos originados por el exceso de precipitación que lava o lixivias las bases; por tanto, los órdenes de suelos más ampliamente reportados para el territorio nacional son el Inceptisol, Entisol, Oxisol, Ultisol y Andisol. Malagón (2003).

Figura 5: Condiciones de humedad en el territorio colombiano (Tomado de Jaramillo 2004)



Evidentemente la figura anterior muestra como la mayor extensión del territorio Colombiano es muy húmeda, por tanto, es muy probable en el momento de adelantar un proyecto forestal, se tenga limitantes en el suelo y por ende problemas de fertilidad.

Figura 6: Ordenes de suelos en Colombia (tomado de Jaramillo 2004)



Colombia tal y como lo evidencia el figura anterior, es claro lo reportado por Malagón (2003), en cuanto al predominio de los suelos correspondientes al orden Inceptisol. Los

demás órdenes son dominantes en áreas muy pequeñas, sin embargo, a continuación, se mostrara la distribución de los órdenes en las diferentes regiones naturales de Colombia. (Tabla 5).

Tabla 5: Distribución de los órdenes de suelos de Colombia por regiones naturales. Con base en información presentada por IGAC (2003).

Región Natural	Órdenes de suelos dominantes
Amazonia	Oxisol (36.9%), Inceptisol (20.8%), Ultisol (18.9%), Entisol (16.1%) Espodosol (2.9%)
Andina	Inceptisol (35%), Entisol (33%), Andisol (18%), Alfisol (3%), Ultisol (3%), Mollisol (2%)
Orinoquia	Oxisol (39%), Inceptisol (28%), Entisol (21%), Ultisol (6%)
Llanura Caribe*	Inceptisol (38%), Entisol (31%), Mollisol (6%), Vertisol (6%), Aridisol (5%), Alfisol (4%), Oxisol (1%)
Andén Pacífico	Inceptisol (50%), Entisol (26%), Oxisol (8%), Ultisol (8%), Histosol (4%)
Valles interandinos**	Inceptisol (44.4%), Entisol (40.1%), Alfisol (3.7%), Mollisol (3.7%), Vertisol (1.4%), Andisol (0.8%)
Islas del Caribe	Inceptisol (30%), Entisol (22%), Vertisol (15%), Histosol (13%), Mollisol (12%)

* Incluye la Guajira.

** Comprende el valle alto y medio del río Magdalena y el valle del río Cauca.

En conclusión, el IGAC (2003) expresa que los órdenes de suelos en Colombia están en las siguientes proporciones de distribución: Inceptisol (31.4%), Entisol (24.3%), Oxisol (20%), Ultisol (10.1%), Andisol (4.5%), Mollisol (1.2%), Espodosol (0.9%), Alfisol (0.8%), Vertisol (0.6%), Histosol (0.5%) y Aridisol (0.4%).

Entendido entonces, que el suelo dominante en el territorio nacional es el Inceptisol, el cual Jaramillo (2002 y 2004) lo describe como orden de suelo que presenta evidencias de evolución incipiente o débil desarrollo, que lo ha llevado a desarrollar varios horizontes con estructura de suelo, son de pH ácido, de mal drenaje, acumula arcillas amorfas, está ocupando las laderas más escarpadas desarrollándose en rocas recientemente expuestas, predomina en la cordillera de los Andes junto a los Entisoles y con los Ultisoles por las vegas de los ríos Caquetá, Guaviare, Putumayo, Amazonas y su nomenclatura termina en ETP.

5.2 Sector forestal en Antioquia

El departamento de Antioquia, con una extensión 63612 km² (IGAC, 2007) que corresponde a 6,361.200 millones de hectáreas, y según cifras de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Antioquia en el 2005, se calcula que en el departamento 3.08 millones (49 por ciento) tienen aptitud forestal, y entre estas, 294133 hectáreas son óptimas para plantaciones comerciales.

Tabla 6. Zonificación forestal por subregiones en Antioquia (2005)

Subregión	Aptas		Moderadamente aptas		Marginalmente aptas		Total Hectáreas
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%	
Valle de Aburrá	7.524	2.56	58.843	2.53	3.850	0.82	70.223
Oriente	41.115	13.98	280.747	12.07	51.451	10.95	373.340
Suroeste	18.320	6.23	150.856	6.49	49.196	10.47	218.385
Occidente	2.258	0.77	62.255	2.68	50.657	10.78	115.175
Norte	91.877	31.24	178.852	7.69	22.308	4.75	293.077
Nordeste	9.581	3.26	500.536	21.53	14.156	3.01	524.298
Magdalena Medio	1.783	0.61	282.475	12.15	25.889	5.51	310.160
Urabá	0	0	378.493	16.28	195.717	41.67	574.227
Bajo Cauca	121.671	41.37	432.232	18.59	56.479	12.02	610.443
Total	294.133	100	2.325.293	100	469.706	100	3.089.433

Fuente: Secretaria de Agricultura (2005). Incluyen ha para uso comercial y protección ambiental

Tabla 7: Plantaciones forestales comerciales en Antioquia 2003 – 2010 (cadena forestal de Antioquia 2011)

Subregión	Área de la Subregión (ha)	Hectáreas plantadas en miles de ha
Oriente	709.919	2.261
Suroeste	655.468	8.360
Occidente	737.827	1.480
Norte	728.610	17.411
Nordeste	841.514	8.864
Magdalena Medio	470.099	2.148
Urabá	1.156.370	14.504
Bajo Cauca	866.897	3.932
Total Departamento	6.279.614	58.960

Fuente: Cadena Forestal de Antioquia 2011.

En las subregiones de Antioquia para el año 2011, tal y como se muestra en la tabla 6, el MADR (2015) con datos recopilados por la revista especializada de la industria maderera en Colombia, (2014), se tiene que en el Oriente antioqueño, el municipio de El Retiro presenta la mayor área plantada para la subregión, actividad realizada con la especie *Pinus pátula*. En el Suroeste, municipios como Jericó y Caldas, se tiene plantaciones con las especies *Pinus maximoi* y *Ciprés*, que representan el 28 por ciento área establecida para esta subregión y el *Pinus pátula* ocupa el 22 por ciento de la superficie.

En el Occidente, en los municipio de Frontino y Cañasgordas, la especie más establecida es *Pinus oocarpa*. En el Norte, el municipio de Yarumal con 4050 hectáreas y Angostura con 3586 hectáreas, ocupan el 78 por ciento del área total con plantaciones forestales comerciales con las especies *Pinus patula* y *Eucaliptus sp.*

En el Nordeste, se registra 8864 hectáreas de las cuales las especie *Pinus oocarpa* y *Pinus tecunumanii* son las que concentran la mayor área establecida; el Magdalena Medio registra plantaciones forestales de 2148 hectáreas con una gran variedad de especies nativas e introducidas.

La región de Urabá es la que presenta una mayor extensión de área total entre las diferentes subregiones que conforman el territorio de Antioquia; allí se reportan 14504 ha de plantaciones forestales comerciales. La Teca (*Tectona grandis*) es la especie más establecida pues representa el 79 por ciento del área total para esta subregión.

En el Bajo Cauca la información registrada en la Cadena Forestal de Antioquia de plantaciones forestales comerciales es de 3932 hectáreas y la especie que registra los índices más altos de plantación es la Acacia (*Acacia mangium*) que concentra el 62 por ciento del área total establecida.

En la actualidad, en las diferentes subregiones de Antioquia al igual que en todo el país, se vienen incrementando las áreas plantadas, esto, con la ayuda tanto de los incentivos del Gobierno, como por la presencia de empresas reforestadoras nacionales y extranjeras, como es el caso de la Reforestadora Industrial de Antioquia – RIA, firma que a noviembre de 2011 tenía establecidas 11271 ha en diferentes subregiones del departamento, además, la Compañía Agrícola de la Sierra CAS, viene consolidando un importante núcleo forestal en el departamento, que según reportes de la revista-mm.com, en el Nordeste para el 2011, ya establecieron cerca de 7200 hectáreas principalmente con las especies *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus sp.*

Sin embargo, es importante que se continúe incentivando el sector forestal con fin comercial en nuestro país, para lo cual se requiere aunar esfuerzos desde los diferentes gremios, las colectividades y en general, para con ello poder aumentar las áreas plantadas y con un adecuado manejo, en tal sentido, es trascendental para el inversionista forestal, el conocer las pautas que se requieren para un adecuado desarrollo silvicultural, además, el reconocer de ante mano los tipos de suelos que posee nuestro territorio y los problemas en el manejo de la fertilidad, esto permitirá, tener una

visión más amplia tanto de los limitantes como de las potencialidades desde el punto de vista edáfico.

5.3 Especies forestales de interés comercial en Colombia

En Colombia se utiliza principalmente doce (12) especies con fin comercial, las cuales incluyen a la teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), acacia mangium (*Acacia mangium*), eucalipto rosado (*Eucalyptus grandis*), eucalipto (*Eucalyptus tereticornis*), ceiba (*Bombacopsis quinata*), roble (*Tabebuia rosea*), nogal cafetero (*Cordia alliodora*), ciprés (*Cupressus lusitánica*), pino caribe (*Pinus caribea*), pino pátula (*Pinus patula*), pino tecunumanii (*Pinus tecunumanii*) y pino oocarpa (*Pinus oocarpa*) (MADR, 2015).

Con el apoyo del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el sector privado y la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal en Colombia (CONIF), se ha venido documentando el comportamiento de las distintas especies más utilizadas en plantaciones comerciales, en lo concerniente al manejo que estas requieren para alcanzar el rendimiento esperado.

Además, el país cuenta con una base técnica sobre las especies más usadas en reforestación comercial, debido a que se tienen modelos de crecimientos y rendimientos con sus correspondientes ecuaciones (López *et al.*, 2011). Se pretende con estos modelos establecer con mayor certeza los volúmenes de madera a ser producidos y determinar el turno óptimo de cada especie. Además, esto permitirá ajustar los análisis financieros a fin de establecer con mayor precisión la cantidad de madera a producirse, así como el tiempo que demandará y la rentabilidad del cultivo.

López *et al.* (2011) argumenta que los rendimientos de las especies forestales comerciales cultivadas en Colombia, varían de acuerdo a la región, a las condiciones de suelo, la temperatura, la pendiente y según las prácticas silviculturales que se realicen.

Por tanto, se analizará a continuación, las coníferas de los géneros *Pinus*, que son las más utilizadas en reforestación comercial en Colombia. Alvarado (2007) argumenta que las coníferas son las especies de mayor importancia en sistemas de producción forestal comercial de madera para pulpa y aserrío, y que estas, requieren una cantidad de nutrientes menor a la que necesitan otras especies forestales tropicales de uso comercial.

Davey (1995) citado por Alvarado y Raigosa (2007), considera que en general, para el crecimiento satisfactorio de coníferas se necesita al menos una concentración mínima de nutrientes disponibles en el suelo. Por tanto, para el manejo de la fertilidad del suelo en plantaciones del trópico colombiano, se podría considerar de manera general, los rangos presentados por Osorio (2012), para la interpretación de los resultados de los análisis químicos del suelo, valores que servirían para las diferentes recomendaciones de productos nutricionales, dichos rangos se muestran en la tabla 8:

Tabla 8: Rangos para interpretar los resultados del análisis químico de suelos.

Parámetro	Unidad	Interpretación				
		Muy baja	Baja	Suficiente	Alta	Muy alta
P	mg kg ⁻¹	< 5	5-15	15-30	30-45	> 45
S	mg kg ⁻¹	< 3	3-6	6-12	12-15	> 15
Fe	mg kg ⁻¹	< 10	10-25	25-50	50-100	>100
Mn	mg kg ⁻¹	< 2.5	2.5-5	5-10	10-20	>20
Cu	mg kg ⁻¹	< 0.5	0.5-1	1-3	3-5	>5
Zn	mg kg ⁻¹	< 0.5	0.5-1.5	1.5-5	5-10	>10
B	mg kg ⁻¹	< 0.2	0.2-0.5	0.5-1	1-1.5	>1.5
Ca	cmol _c kg ⁻¹	<1	1-3	3-6	6-9	> 9
Mg	cmol _c kg ⁻¹	<0.5	0.5-1.5	1.5-2.5	2.5-3	>3
K	cmol _c kg ⁻¹	< 0.05	0.05-0.15	0.15-0.3	0.3-0.5	>0.5
Na	cmol _c kg ⁻¹	< 0.5	0.5-1			>1
Al	cmol _c kg ⁻¹	<0.5	0.5-2			>2

Tomado de N. W. Osorio. Boletín del Manejo Integral del Suelo y la Nutrición Vegetal, Vol. 1 No. 6

Los resultados de los análisis químicos comprueban en tal caso, la poca disponibilidad de nutrientes en los suelos en Colombia, en tal sentido, se recopiló algunos resultados de dichos análisis del laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, que se realizaron con el fin de establecer plantación forestal comercial en el departamento de Antioquia, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 9: Resultados de análisis químicos para proyectos forestales en Antioquia

Reporte	Departamento	Municipio	Especie a Establecer	Clase textural	pH	M.O	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
37959	Antioquia	Vegachi	<i>Pinus oocarpa</i>	ArA	4.9	2.7	1.2	0.59	0.13	0.05	0.03	2	1	4	126	1	1	0.5	0.12
33503	Antioquia	Envigado	<i>Pinus patula</i>	FA	4.7	21.7	3.1	0.08	0.10	0.14	0.04	3.5	2	13	112	2	2	3	0.14
26109	Antioquia	Amaga	<i>Eucalipto grandis</i>	FARa	6.1	5.5	-	12.7	7	0.48		20.2	12	4	108	14	3	3	ND
34617	Antioquia	Dabeiba	<i>Gmelina arborea</i>	FA	6.8	5.5	-	37.6	6.4	0.19	0.04	44.2	2	5	7	3	3	1	0.39
34618	Antioquia	Urrao	<i>Pinus patula</i>	FARa	5.1	12.9	3.8	0.12	0.20	0.20	0.02	4.3	1	1	333	2	2	2	0.30
37689	Antioquia	Abejorral	<i>Pinus patula</i>	FA	4.7	15.3	1.7	0.13	0.07	0.08	0.06	2	1	2	99	2	1	1	0.09
26698	Antioquia	Puerto Triunfo	<i>Eucalipto grandis</i>	FARa	5.5	0.63	-	2.9	4	0.16		7.1	1	3	38	5	0.4	1	ND
27955	Antioquia	Santa Barbara	<i>Balso</i>	FAR	6.0	3	-	14.8	8.1	0.1	0.3	23.3	6	4	23	4	1	4	0.3
24786	Antioquia	Gomez Plata	<i>Eucalipto grandis</i>	ArA	5.0	6.4	3.4	0.2	0.1	0.06		3.8	5	3	273	1	2	1	ND
23026	Antioquia	Uramita	<i>Gmelina arborea</i>	Ar	6.9	5.3	-	31.1	14.1	0.21		45.5	2						
27300	Antioquia	Alejandria	<i>Eucalipto grandis</i>	FARa	4.5	7.2	2.8	0.2	0.1	0.2	0.7	4	4	2	170	3	0.4	0.2	0.3
33220	Antioquia	El Retiro	<i>Pinus patula</i>	AF	5.1	22.5	0.5	0.06	0.05	0.05	0.01	0.7	1	3	114	1	0.5	1	0.26
33600	Antioquia	La Ceja	<i>Pinus patula</i>	A	5.7	11.2	-	0.14	0.10	0.12	0.06	0.4	2	24	84	1	1	1	0.13
24920	Antioquia	Amalfi	<i>Pinus oocarpa</i>	ArA	5.0	4.8	2.5	0.2	0.1	0.06		2.9	1		219	1	1	1	ND

Es indiscutible que las concentraciones existentes de nutrientes en los suelos de Colombia para el crecimiento normal de las plantaciones de coníferas, están en la categoría de interpretación muy baja, según el rango de Osorio (2012). Por lo anterior se debe

subsana estas deficiencias del suelo y poder nutrir satisfactoriamente los árboles. Se demanda entonces, realizar aplicaciones al suelo y contribuir con ello, a un mejor desarrollo forestal en el trópico colombiano.

Las diferentes regiones del territorio Antioqueño presentan condiciones de acidez, con poca disponibilidad de nutrientes. Donde los elementos Ca, Mg, K y P, están en niveles muy bajos para garantizar un adecuado crecimiento y desarrollo forestal. Además, el contenido de materia orgánica en estos suelos tal es muy bajo, esto tiene de igual forma repercusiones en la nutrición de los árboles, puesto que como lo expresa Jaramillo (2002), los principales procesos que se presentan con la materia orgánica en el suelo son la mineralización y la humificación, procesos que pueden incidir en cierta forma, en la no disponibilidad de algunos nutrientes para los árboles.

Por tanto, para la adecuada nutrición forestal, se deberá aplicar elementos nutricionales que estén en niveles bajos en el suelo y que puedan representar una deficiencia para los árboles, en este sentido es importante destacar que estudios sobre fertilización de coníferas en Andisoles de Colombia, Ladrach (1980), comprueban la alta respuesta que estas especies tienen a la aplicación de fósforo > boro > nitrógeno; elementos que permiten aumentar el crecimiento de los árboles y el volumen de madera producido, y debido a que los suelos del 98% del país presentan deficiencia de fósforo para las plantas (IGAC, 1988), se hace necesario entonces estas aplicaciones, y mucho más, si se tiene en cuenta que el 11.6% de los suelos de Colombia son Andisoles, es decir, suelos, con propiedades andicas, cuyas características distintivas son la presencia de un pH ácido y un alto contenido de alófanos, material amorfo que retiene el fósforo disponible y lo hace muy poco aprovechable para las plantas (Malagón *et al.*, 1991).

Osorio (1981), expresa que las deficiencias de N en bastante típica para las coníferas, comienza con una clorosis uniforme en toda la planta, acompañada de una detección del crecimiento, más tarde las agujas inferiores se tornan de color amarillo pálido, seguido de secamiento y caída posterior de las mismas. De igual forma, manifiesta que la deficiencia de K, se manifiesta por un secamiento de color rojo anaranjado en la punta de las agujas inferiores, que con el tiempo se presentan también en forma general y que la falta de P se manifiesta por detección del crecimiento quedando sobre todo los últimos entrenudos más cortos, y formando en la parte apical de la planta una especie de cabezuela

Waterloo (1994) argumenta que es de alta importancia en el manejo de la fertilidad en coníferas, tener presente que la biomasa foliar representa tan solo el 15% del total de la biomasa, sin embargo el fósforo representa el 48 % y el calcio el 59% de esta fracción. Luego en la madera cosechada se tiene el 70% de la biomasa total, que contiene 37% del fósforo y el 20% del calcio, lo cual muestra que con las podas gran parte del fósforo y calcio podría reintegrarse al sistema, puesto que con la extracción de la madera, se pierde los nutrientes de esta biomasa.

Autores como Van Goor (1963), y Bruning (1964), citados por Vásquez (2001) encontraron que las coníferas tienen marcados requerimientos por potasio y magnesio, aunque menores por nitrógeno y fósforo.

5.3.1 *Pinus caribaea*

Rojas (1990) manifiesta que el *Pinus caribaea* o pino caribe es un árbol que puede alcanzar hasta 45 m de altura y 100 cm de diámetro. Además, este es el pino de más amplia distribución geográfica en el trópico, y por sus características ha sido el más utilizado en el desarrollo de proyectos de producción forestal. Este pino, se utiliza en planes de reforestación debido a su plasticidad ecológica, su adaptabilidad a condiciones adversas, su fácil manejo y crecimiento rápido (Alvarado *et al.*, 2006). Aunque habita en suelos poco fértiles, las plantaciones establecidas en sitios muy degradados y marginales no presentan los rendimientos que corresponden a su potencial productivo.

En general, se considera que en el trópico la productividad del *Pinus caribaea* disminuye conforme aumenta la altura de la plantación sobre el nivel del mar (Vásquez y Ugalde, 1994). Además, algunas propiedades físicas del suelo tales como el mal drenaje, alto nivel freático, alta densidad aparente con poca profundidad efectiva (< 80 cm) pueden limitar su crecimiento.

Igualmente, aunque el *Pinus caribaea* es considerado como uno de los pinos tropicales menos exigentes en cuanto a nutrición se refiere, Torres y Franco (1994), en estudios realizados en las sabanas de los llanos Orientales Venezolanos, indicaron que la deficiencia de algunos nutrientes en el suelo, pueden limitar el crecimiento óptimo del pino.

En Colombia, el *Pinus caribaea* se viene utilizando desde hace más de 40 años y con el cual el sector forestal colombiano ha desarrollado proyectos exitosos en zonas con suelos pobres y ácidos. Aunque se adapta muy bien a una gran variedad de suelos, incluyendo los degradados, pobres y altamente lixiviados, esta especie prefiere suelos arenosos ácidos y en menor grado los arenos-arcillosos, de pH entre 6.5 hasta 4.3 de tipo oxisol (Trujillo, 2006).

Angarita (1981) confirmó la obligatoriedad de la simbiosis micorrizal para el normal desarrollo del *Pinus caribaea* en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. Este autor encontró que a pesar de ser la micorriza un factor importante en la movilización de fosfatos en estos suelos altamente deficientes, es necesario adicionar un mínimo de fósforo (P) al suelo, para que así se pueda desarrollar la micorriza y cumplir su función fisiológica en la nutrición de los árboles.

5.3.2 *Pinus oocarpa*

El *Pinus oocarpa* se extiende desde México hasta el noreste de Nicaragua, en Guatemala, Honduras, Nicaragua y El Salvador representa la especie dominante de los bosques de pino, se presenta en pequeña escala en Costa Rica y a nivel de ensayos en muchos otros países del trópico y subtropical (PyC Maderas, 2013).

Este pino es una especie propia para plantaciones puras de campo abierto, puede alcanzar hasta los 30 m de altura y 60 cm de diámetro. La especie prefiere suelos con buen drenaje, textura arenosa, franco-arenosa y arcillosa, se adapta bien a suelos erosionados con pH de 4.5 a 6.8 con alto contenido de cuarzo y derivados de materiales de origen volcánicos Trujillo (2009).

Aunque esta especie crece en medios poco fértiles, tiende a dominar en las formaciones bosque seco y húmedo del piso montano bajo, con precipitaciones entre 800-2000 mm, temperatura media anual entre 15 - 22°C y una altitud entre 500- 2000 m. Para lograr rendimientos adecuados, la especie requiere de suelos de más 100 cm de profundidad, con poca pedregosidad y además una fertilidad media a alta (Valdés *et al.*, 1994); citado por Alvarado y Raigosa (2007). El crecimiento de esta especie es mayor en condiciones de piedemonte donde hay mejor disponibilidad de agua y nutrientes que en las cimas y las laderas donde los suelos son menos profundos y donde el viento afecta negativamente el desarrollo de los árboles, además, Alvarado y Raigosa (2007), manifiestan que con una disponibilidad media a alta de fósforo (P), calcio (Ca) y potasio (K) se favorece el buen desarrollo de la especie.

Cannon (1983) señala, que la empresa Cartón de Colombia en el departamento del Cauca, encontró resultados favorables utilizando fertilización con calfos en dosis de 45 g/árbol, y aplicaciones de Borax para las especies *Pinus oocarpa* y *Cupressus lusitánica* al momento de la siembra.

En otro importante trabajo realizado en Colombia en 1985, con plantaciones de *Pinus oocarpa* en Yolombó Antioquia, se destacó la importancia de una dosis adecuada de fosforo de alta solubilidad en el desarrollo de la especie, puesto que al utilizar un testigo y dosis de 55 y 110 g /árbol del producto (13-26-6), se encontró que luego de los 24 meses con la dosis de 110 g/árbol, los árboles crecieron un 40% más que el testigo y con la dosis de 55 gr, se superó al testigo en tan solo 11% (Barrera, 2012).

5.3.3 *Pinus patula*

El *Pinus patula* es probablemente uno de los pinos tropicales de mayor tamaño y más rápido crecimiento, puede alcanzar hasta 40 m de altura y 1 m de diámetro. La especie se presenta de forma natural en los estados mejicanos de Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz, además, la especie prospera en una variedad de suelos, teniendo mejor éxito en suelos volcánicos jóvenes profundos y húmedos, con pH entre 4.5 y 5.5 (Gillespie, 2000).

Ramírez (1991) estudiando el crecimiento desarrollo del *Pinus patula*, encontró que la altura sobre el nivel del mar representa una gran influencia sobre el crecimiento del

patula, la altura ideal para la especie va de 2100 msnm a 2300 msnm, después de estos valores se comienza a presentar problemas en el desarrollo de la especie.

Trujillo (2009) expresa que la especie requiere de la presencia de hongos ectomicorrizales para un crecimiento adecuado y saludable, además, que las deficiencias de fósforo y boro en el suelo limitan el buen crecimiento. Del mismo modo, manifiesta que el clima es un factor determinante en su desarrollo, puesto que la especie es susceptible a fuertes vientos que pueden causarle daños mecánicos, e induce una excesiva transpiración a través de sus finas cutículas. Esto es de cuidado ya que la especie requiere una adecuada disponibilidad de agua durante todo el año para sus funciones vitales. Además, Llanos *et al.* (2014), evaluaron la efectividad de inóculos ectomicorrizales para promover el crecimiento y colonización de raíces en plántulas de *Pinus patula*, demostrando claramente los efectos significativos de dicha práctica en la especie.

Wormald (1975) manifiesta que el patula desarrolla una raíz pivotante con alta cantidad de raíces laterales bien distribuidas, con ello aumenta la facilidad de profundizar las raíces secundarias en busca de humedad y nutrientes cuando las condiciones del suelo lo permiten.

En Andisoles de Colombia, Ladrach (1980) y Cannon (1981) encontraron que para el *Pinus patula* con la adición de 2.5 g de bórax por árbol en combinación con 50 g de la fórmula 10-30-10 al momento del trasplante al campo, se evidenció que en un año, se presentó un aumento significativo del 20% en la altura de los árboles.

En estudios realizados en diferentes regiones del departamento de Antioquia para evaluar el crecimiento del *Pinus patula* en función de los nutrientes edáficos y foliares, Ramírez (1991) encontró que la poca disponibilidad de fósforo en el suelo representa una deficiencia para su crecimiento, además, que debido a la alta acidez de los suelos se presenta una baja disponibilidad de calcio que influye en el desarrollo del sistema radicular, de igual forma, argumenta que el 90% de las plantaciones con *Pinus patula* analizadas, se presentan deficiencias de nitrógeno y potasio.

5.3.4 *Pinus tecunumanii*

La distribución natural del *Pinus tecunumanii* es principalmente en las montañas centrales de Guatemala, aunque también se le encuentra naturalmente en los estados de Oaxaca y Chiapas, al sur de México, norte de El Salvador, Sudeste de Honduras y Noreste de Nicaragua (Llanos, 2006). El *Pinus tecunumanii* habita en una gran variedad de suelos, desde los rojos arcillosos hasta los suelos profundos de origen volcánico, con un pH de 4.5 a 5.5, sin embargo, crece en suelos arcillosos y pobres en materia orgánica (Dvorak *et al.*, 2000).

Según reporte de la FAO (2005) los países con mayores establecimientos de *Pinus tecunumanii* son Australia, Brasil, Colombia, Malawi, Swazilandia, Venezuela y Zimbabwe.

Sin embargo, Dvorak (2000) argumenta que el *Pinus tecunumanii* ha sido uno de los pinos tropicales más intensamente estudiados en las dos últimas décadas y que parece ser que es un descendiente genético próximo del *Pinus oocarpa*, basándose en los resultados filogenéticos a partir de estudios con marcadores moleculares RAPD.

El *Pinus tecunumanii* es una especie sobresaliente, con excelentes características fenotípicas y silviculturales, rápido crecimiento y probablemente posee la mejor forma de fuste de todos los pinos tropicales (Dorovak *et al.*, 2000), lo cual le confiere un gran potencial como especie para reforestación en regiones tropicales. Además, la especie tolera una gran gama de suelos, arcillo limosos a limo arenoso.

En Colombia, la especie es considerada importante y apta para reforestación comercial, debido a que se cuenta con el paquete tecnológico para desarrollar este cultivo, en la producción de pulpa, industrias de aserrío, construcción, carbón activado y tableros. Además, nuestro país por su localización en la zona tropical, la especie cuenta con una alta producción de biomasa, un rendimiento más alto con un ciclo biológico más cortos debido a la facilidad de hacer fotosíntesis todo el año (MADR, 2015).

5.3.5 *Eucalyptus grandis*

El *Eucalyptus grandis*, comúnmente conocido como eucalipto roso o rosado, habita naturalmente cerca de las costas y cordones montañosos subcosteros de Australia, entre el norte de Newcastle, en Nueva Gales del Sur, principalmente en terrenos planos y pendientes más bajas, donde es el árbol dominante de los bosques húmedos y las selvas tropicales con alturas que alcanzan los 50 metros.

La especie para su buen desarrollo, prefiere suelos profundos, bien drenados, de origen volcánico o aluvial y húmedo, se comporta bien en suelos con presencia de texturas arcilloso, franco arcilloso, no calcáreos, soporta suelos ligeramente ácidos con tendencia a la neutralidad y de baja fertilidad, tolera bajos contenidos de fosforo, es muy sensible a las deficiencias de boro con síntomas similares a los de marchites por sequía y al fuego, sin embargo, resiste periodos cortos de inundación (Trujillo, 2009). Por otro lado se adapta mal a suelos compactados, no se recomienda establecer plantaciones en sitios con menos de 50 cm de profundidad.

El eucalipto rosado es uno de las especies de mayor importancia comercial en las áreas tropicales y subtropicales de cuatro continentes. La especie crece en las tierras planas o en las pendientes inferiores de los valles fértiles y profundos, aunque, crece mejor en los suelos margosos, profundos, bien drenados y húmedos de origen aluvial o volcánico, sin embargo, los suelos arcillosos son aceptables si poseen un buen drenaje (Gutiérrez, 1976).

En Colombia esta especie de eucalipto se utiliza ampliamente en el Valle del Cauca, (principalmente en Andisoles) y su respuesta a la fertilización con NPK y B (Boro) está ampliamente documentada, en donde se recomienda aplicar entre 75 y 100 g/ árbol de la fórmula 10-30-10, más 20 gr bórax/ árbol (Cannon 1981), además también recomiendan el fosfato diamónico (DAP) ya que el K no es elemento crítico en este tipo de suelos (Ladrach 1986). Del mismo modo, en las sabanas brasileras y venezolanas (principalmente en Ultisoles y en Oxisoles), son las regiones donde se ha generado la mayor parte de la información disponible para América Latina.

Vélez (1981), citado por (Alvarado, 2007), expresa que en general, las variables físicas del suelo deben considerarse muy necesariamente al momento de escoger los sitios para sembrar el eucalipto, ya que estas pueden en algunos casos afectar negativamente el desarrollo radical de los árboles, más que las propiedades químicas del suelo. Por tanto, son estas variables como la textura, la estructura, la disponibilidad de agua y la profundidad efectiva, las que se deben conocer adecuadamente.

5.3.6 *Eucalyptus globulus*

El *Eucalyptus globulus* es una de las especies de eucalipto mejor conocidas a nivel mundial, originario de Australia, se ha convertido en una de las especies de eucalipto más extensamente plantada en el mundo principalmente en España en la costa Cantábrica (Valderrey,2007).

La especie para su buen desarrollo requiere suelos profundos, bien drenados, de textura preferiblemente areno-arcillosa o franca, con buena humedad y pH entre 5.0 y 7.0. Este es susceptible tanto a los fuertes vientos especialmente entre los 4 y 6 años como a las sequias prolongadas y al fuego (Trujillo, 2009).

El *Eucalyptus globulus* está constituido por una raíz pivotante, produce raíces a través de todo el perfil del suelo, arraigándose a una profundidad de varios centímetros si el suelo lo permite, por tanto puede ser volcado en sus primeras etapas de vida por el viento debido a que su sistema radicular se desarrolla con lentitud (García, 1989).

Se ha demostrado que el fósforo es el factor más determinante en el crecimiento del *Eucalyptus globulus*, en suelos franco arenosos de la provincia de La Coruña, España, puesto que según los ensayos de fertilización en el momento de la plantación, se produjo mejor crecimientos en altura a las edades de 1, 2 y 3 años (Basurco, 2000).

Judd *et al.*, (1996) encontraron respuestas significativas en crecimiento del *Eucalyptus globulus* a la adición de N y P, pero no de K en el sureste de Australia. Los autores recomiendan la adición fraccionada de hasta 100 kg ha⁻¹ de N y P antes de los 9 meses después del trasplante con un complemento de 50 kg ha⁻¹ de K.

6. Conclusiones y recomendaciones

La demanda de madera que actualmente exige la población mundial, obliga a tener plantaciones forestales de mejores rendimientos y menores turnos de aprovechamiento. Por tanto, se requiere que las plantaciones encargadas de proveer madera y disminuir la presión sobre los bosques nativos en el planeta, tengan un buen manejo en todas las etapas de desarrollo y crecimiento de los árboles, puesto que será la herramienta idónea para alcanzar el mayor potencial productivo de las plantaciones forestales.

Es indispensable el tener un conocimiento general y adecuado de los procesos que ocurren en el suelo para que ocurra la adecuada nutrición vegetal, lo anterior, determinará la eficiencia en el desarrollo forestal del trópico.

La nutrición forestal, obedece tanto a condiciones y/o situaciones edáficas como externas, por tanto, se obliga de manera concreta y determinante a un adecuado manejo de la fertilidad del suelo que permita el buen desarrollo de la plantación foresta comercial.

La fertilidad del suelo en plantaciones forestales del trópico, obedece al manejo de los nutrientes del suelo, y para tener un desarrollo forestal, es necesario hacer una apropiada caracterización del suelo, esto involucra al análisis químico que permita identificar las deficiencias, desbalances y posibles toxicidades que enfrentaran las especies a establecer.

Entre los aspectos más relevantes para hacer un adecuado manejo de la fertilidad del suelo están:

- Escoger apropiadamente el sitio y la especie a establecer.
- Uso de cales y fertilizantes en cantidades y proporciones adecuadas para corregir los problemas asociados a los suelos ácidos.
- Aplicar hongos formadores de micorrizas (endo –y/o ectomicorrizales) según la especie vegetal de interés. Esta práctica mejora la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes de baja movilidad en el suelo, particularmente fósforo.

En la escogencia del sitio para la plantación forestal, es importante tener presente la transpiración de la especie forestal, puesto que esta actividad incide en el movimiento de agua y minerales en toda la planta, afectando los mecanismos de nutrición como el flujo

masal, lo anterior, debido a que el viento hace una alta demanda evotranspirativa a la planta, que podría de igual forma contribuir a la disminución del rendimiento de la plantación forestal.

Se necesita maximizar el rendimiento de las plantaciones forestales, sea a través de especies adaptadas a condiciones específicas tales como suelos pobres, de alta acidez y pocos profundos entre otros aspectos. En tal sentido, se podría con certeza el incrementar las áreas plantadas con las coníferas que suelen presentar condiciones de adaptación a dichos ambientes.

La zonificación forestal más reciente para Colombia realizada por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), identificó 24 millones de hectáreas aptas para este fin, sin embargo solo a la fecha se cuenta con 450.000 ha. No obstante, con las ventajas de producción frente a otros países y aprovechando al máximo tanto las zonas adecuadas como el conocimiento adquiridos desde la academia, podrá ser Colombia un ejemplo de reforestación y despensa maderera del mundo.

En Colombia y específicamente en el departamento de Antioquia, se posee extensas zonas potenciales para el desarrollo de la actividad foresta comercial, pero como en el resto del territorio nacional, presenta grandes desafíos para adelantar los proyectos productivos, entre ellos, la falta de financiación, adecuación de vías, mano de obra especializada, titularización de tierras, seguridad entre otros aspectos.

Indispensable que la principal función de la plantación forestal comercial, sea la de producir más y mejor volúmenes de madera en menor turno o cosecha. Por tanto, es el manejo silvicultural y dentro de este, manejo de la fertilidad del suelo, el que se debe potencializar para hacer posible este cometido.

Existen en general diferentes ensayos sobre nutrición forestal con coníferas en diferentes lugares, en donde los autores han encontrado que las especies responden mejor a la mezcla de N-P-K- y B, dando mayor incremento volumétrico y una rentabilidad superior. No obstante, se deben tomar estos resultados como punto de partida, más que como receta general, puesto que la variabilidad espacial de los suelos implicaría no tener los resultados presentados por los autores.

Para del desarrollo forestal colombiano, es indiscutible que se tienen claramente determinadas las especies, los suelos y las acciones silviculturales que se deben adelantar para el obtener con éxito un proyecto forestal, además, se cuenta con excelentes profesionales e investigadores, que complementaran todo el proceso productivo, sin embargo, es necesario y de suma importancia, que se continúe fortaleciendo el sector por medio de incentivos, ampliando y mejorando los créditos para nuevos proyectos, que se cree sólidas y adecuadas instituciones que den confianza a los nuevos inversionistas forestales.

Bibliografía

AGRIOS, G. 1996. Fitopatología, 2da Ed. México, D.F. Grupo Noriega Editores. 838 p.

ALTIERI, M. 1997. Agroecología. Bases Científicas para una Agricultura Sustentable. Ed. CIED. Lima

ALVARADO A.; FALLA J. 2004. La saturación de la acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis L.f*) en suelos ácidos de Costa Rica. Agronomía Costarricense 28(1), pp. 81-87.

ALVARADO, A., RAIGOSA, J., OVIEDO, J., 2006 Nutrición y fertilización del pino caribeño Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica San José, Costa Rica Informaciones agronómicas N 62. pp 5

ALVARADO A., RAIGOSA, J. 2007 NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN FORESTAL EN REGIONES TROPICALES. Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica San José, Costa Rica pp 83.

ÁLVAREZ-SANCHEZ, M., ACOSTA, E., MALDONADO, R., RIVERA, M., 2013. Encalado y micorriza para corregir deficiencia de fósforo en un Andisol cultivado con *Pinus halepensis*. Artículo de Investigación, Madera y Bosques 7-16p

ANGARITA. J.E., 1981. Comportamiento del pino (*Pinus caribaea* Morelet var. hondurensis Ban et Goef) a la micorrización y fertilización fosfatada en un oxisol de los Llanos Orientales. Informe de progreso; Programa Nacional de Suelos. p. 24-26.

ARGUELLO, H. 1991. La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. Santa fe de Bogotá, Agronomía colombiana, volumen 8, Número 2: p 384 -388.

ARIAS, A., 2007, Suelos tropicales. Primera edición, EUNED, Capitulo 4. Propiedades del suelo. San José de Costa Rica, p 63.

ARISTIZABAL M, LOAIZA.; 2003 Fisiología vegetal en Colombia ed. Artes Gráficas Tizan ISBN: 9583354171 v. 1 p.306

BAATH, E., ANDERSON, T.H., 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. Soil Biology & Biochemistry 35,

955–963

BARBER, A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. 2nd Ed. Wiley, New York.

BARRERA, S., 2012. Fertilización en plantaciones forestales en el trópico, FEDEMADERAS Noticias. Documentación. 6p

BASURCO, M. 2000. Ensayos de fertilización localizada en masas clonales de *Eucalyptus globulus* en el momento de la plantación en la provincia de la CORUÑA. Centro de Investigación y Tecnología de ENCE. p5

BAGYARAJ, J., 2006. Hongos micorrizógenos, (HMA). Capítulo 7. Manual de biología de suelos tropicales. p218.

BAKER, J.L. Y LAFLEN, J.M. 1983. Water quality consequences of conservation tillage. Journal of Soil & Water Conservation, Ankeny, 38(3): 186-93.

BELLO, E., 2011. Importancia de la zonificación forestal en la toma de decisiones de inversión. Seminario internacional bosques Colombia. P39

BERNAL, L. 2009. Aislamiento de microorganismos solubilizadores de P (psm) de las raíces de vainilla *sp.* Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de microbióloga agrícola y veterinaria. p8.

BERNABELEN. 2008. Perdidas ecológicas tras los incendios. El hombre y la tierra, el medio ambiente a tu alcance. <https://bernabelen.wordpress.com/2008/11/02/>

BERNHARD-REVERSAT, F. Y LOUMETO, J.J. 2002. The litter system in African forest-tree plantations. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 2. Pp 11-39.

BERTONI, J. Y LOMBARDI, N, 1985. Conservación de suelos. Piracicaba, Livroceres, 392 p.

BERTSCH, F: ALVARADO, A: DURAN, N: GUTIÉRREZ, M: HERRERA, W: MOLINA, E. SANCHO, F: SOTO, G: FLORES, C: RODRÍGUEZ, J, 2001. Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de los cultivos en Costa Rica. Memoria. Editores Meléndez y Molina pp 5

BINKLEY, D. 1993. Nutrición forestal. Prácticas de manejo. México, MX, Editorial Limusa. 340 p.

BODI, M. 2007. Erosión hídrica de suelos afectados por incendios forestales. En: Mataix-Solera (Ed). Incendios forestales, suelos y erosión hídrica. Alcoi: CEMACAM, p256-263.

BURCH, H; WALDNER, P; FRITSCHI, B. 1996. Variation of pH concentration of nutrients and minerals during rain events. In Ecohydrological Processes in Small Basins. CONFERENCE OF THE EUROPEAN NETWORK OF EXPERIMENTAL AND REPRESENTATIVE BASINS (ERB). (6th, Strasbourg, FR). Eds. D. Viville; I. Littlewood. Paris, FR, UNESCO. Vol. 14. p. 59-64.

- BURLE, M.L., J. MIELNICZUK Y S. FOCCHI. 1997. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant and Soil* 190: 309-317.
- BLANCO, J. 2003. Manejo integral de suelos con énfasis en el cultivo del arroz. Profesional especializado ICA –Proyecto (PRONATTA) .Capacitación Tecnológica Integral dirigida a los pequeños productores y asistentes técnicos del sistema de producción arroz. Cúcuta Norte de Santander p26
- CAMARGO-RICALDE S.L. 2002. Dispersal, distribution and establishment of arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71: 33-44.
- CAMPO, J. 2003. Disponibilidad de nutrimentos en una toposecuencia con bosque tropical seco en México. *Agrociencia* 37:211-219.
- CANNON, P.G. 1981. Fertilización de plantaciones con NPK, calfos y bórax: resultados al final de cuatro años. Cartón de Colombia, S.A., Cali. 10 p. Informe de Investigación No. 68.
- CANNON, P. *et al.* 1983. Fertilización en el vivero. Fertilización forestal en el Valle y el Cauca. *Revista de Investigación Forestal de Cartón de Colombia*. p. 121-126.
- CASTRO, H. 1995. Producción sostenible de cultivos utilizando técnicas biológicas y conservacionistas: “Un modelo aplicable al trópico cálido colombiano”. *Suelos Ecuatoriales* 25: 94-100.
- CASTRO, H.; GÓMEZ, M. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. Ciencia del suelo, principios básicos*. pp. 77-137.
- CONTI, M. 2003. Propiedades físico químicas del suelo – colides del suelo, p162.
- COCHRAN, V. L.; S. D. SPARROW and E. B. SPARROW. 1994. Residue effects on soil micro and macroorganisms. In: *Managing Agricultural Residues*. Unger P. W. editor. Lewis Publishers. USA. pp: 163-184.
- CUESTA P., VILLANEDA E. 2010. El análisis de suelos: toma de muestras y recomendaciones de fertilización para la producción ganadera. Tomado del Manual Técnico “Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones Caribe y valles interandinos”. p 1 – 10
- DIEZ, C., 2006. Evaluación de la dependencia micorrizal del pino romerón (*nageia rospigliosii pilger*) bajo condiciones lumínicas contrastantes. Maestría Silvicultura y Manejo de Bosques. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, p12.
- DOMINGUEZ, M. 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes, *Revista Ecosistemas*, 8 (2): 20-31.
- DOROVAK, W.W.; HODGE, G. R; ROMERO. 2000. *Pinus tecunumanii* (en línea). In: *Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Species By the CAMCORE Cooperative*. Raleigh, NC. USA, College of Natural Resources, NCSU. p. 188 – 209. Disponible en : <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2316S/y2316s02.htm>.

- DVORAK WS, SHAW EA. 2000. Five year results for growth and stem form of *Pinus tecunumanii* in Brazil, Colombia and South Africa. CAMCORE, Bulletin on Tropical Forestry No. 10, 22p.
- Evans, J. 1992. Plantation forestry in the tropics. 2a ed. Oxford Science Publications. New York, USA. p403.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas. p234
- FASSBENDER H. 1986. Química de suelos. Con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica. Primera edición.
- FERNÁNDEZ, C., 2002. Introducción a la Edafología, Lección 5. Propiedades fisicoquímicas, Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España. www.edafologia.net/introeda/tema05/ccc.htm. p12
- FINLAY R.D. 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. Journal of Experimental Botany, 59:1115-1126
- FISHER, R.F. Y BINKLEY, D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3a. ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 489 p
- GLIESSMAN, S.R. 1997. Agroecology. Ecological processes in Sustainable agriculture. Ann Arbor Press. USA.
- GILLESPIE. A., 2000. Pino pátula, ocote. Bioecología de árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales. 404-405p
- GIL, J., ZAVALA, L., BELLENFANTE, N., JORDAN, A., 2010. Acidez y capacidad de intercambio catiónico en los suelos afectados por incendios. Métodos de determinación e interpretación de resultados. Actualización en métodos y técnicas de estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Valencia España. p 201-331.
- GOMES, M., VILLEGAS. J., SAENZ. C., LINDIG, R., 2013. Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrobus* en cárcavas. Madera y Bosques 19(3), 2013:51-63. Artículo de investigación. p 51-63
- GOMEZ, P., 2012. Comparación de fertilización exponencial y constante en plántulas de cinco especies forestales nativas de bosques andinos de Colombia. Tesis de maestría presentada para optar al título de Magister en Ciencias-Geomorfología y Suelos Universidad nacional de Colombia sede Medellín facultad de ciencias. p16.
- GUTIÉRREZ, L., 1976. Atlas del eucalipto, España: Ministerio de Agricultura. Vol. 1
- GRANGED, A., JORDAN, A., ZAVALA, L., MUÑOZ, M., 2011. Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus (SE Australia). Geoderma. p125-134.

GRUBB, P.J. 1995. Mineral nutrition and soil fertility in tropical rain forest. In: A.E. Lugo y C. Lowe (eds.) Tropical forest: management and ecology. Springer-Verlag, Ecological Studies v. 112. New York, USA. Pp. 308-330

HARRISON, L., 2001. Fertilidad de suelos – un artículo fundamental, permacultura, México.

HIGUERA, M., 2008. Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal. P 12.

HERNANDEZ, W., 2009. La inoculación con *Glomus fasciculatum* en el crecimiento de cuatro especies forestales en vivero y campo. Agronomía Costarricense. Escuela de Ciencias Agrarias (ECA), Universidad Nacional Heredia, Costa Rica. p14

HERRERO, J.A., RENDA, A., GONZÁLEZ, A., GRA, H., DE NACIMIENTO, J., GONZALES, A., PEÑA, A., CASTILLO, E., JIMÉNEZ, M., 1985. Manejo del *Pinus caribea* en las zonas de “Alturas de Pizarra”, provincia de Pinar de Rúa. Centro de Investigación Forestal, Ministerio de Agricultura. La Habana, Cuba, Boletín de Reseñas Forestales 3 60p.

HOYT, R. 2007. La importancia de los coloides del suelo para el desarrollo de las plantas, www.ehowenespanol.com

HUE, N. 2008. Development, Impacts and Management of Soil Acidity in Hawaii. Department of Tropical Plant and Soil Sciences, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, HI 96822, USA.

IBAÑEZ, J. 2007, Biodisponibilidad de los Nutrientes por las Plantas, pH del Suelo y el Complejo de Cambio o Absorbente. Los suelos y la vida, CSIC-Universidad de Valencia. España. p4.

IBAÑEZ, J. 2008, Fertilidad física, química y biológica, Biología y Ecología del Suelo. CSIC-Universidad de Valencia. España.

IGAC (INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI). 2003. Mapa suelos de Colombia. Escala 1:500 000. Memoria explicativa. [En CD-ROM]. IGAC. Bogotá.

IGAC (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI). 1988. Suelos y bosques de Colombia. IGAC. Bogotá. 135 p.

IGAC (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI). 1998. Colombia. Ministerio del Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección General de Ecosistemas. Plan estratégico para la restauración y el establecimiento de bosques en Colombia –Plan Verde– Bosques para la paz. 50 p.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007. boletín capítulo 1 Generalidades del departamento de Antioquia 9 p.

JARA, M., 2005. Micorrización de plantas de *Pinus radiata* producidas en distintos sustratos en vivero. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Base de Información Bibliográfica Agrícola Chilena. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. p39.

JARAMILLO, D. 2001. Evaluación del método WDTF para medir el grado de repelencia de agua en Andisoles del Oriente de Antioquia. Revista del ICNE, p 7-70.

JARAMILLO, D., 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia Medellín pp 331 – 334

JARAMILLO, D., 2004. El recurso suelo y la competitividad del sector agrario colombiano. Cátedra Pedro Nel Gómez. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín p26.

JARAMILLO, D., 2011. El suelo: origen, propiedades, espacialidad. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

JUDD, T.S., BENNETT, L.T., WESTON, CH.J., ATTIWILL, P.M. Y WHITEMAN, PH.H. 1996. The response of growth and foliar nutrients to fertilizers in young *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantations in Gippsland, southeastern Australia. Forest Ecology and Management 82: 87-101.

KEMMITT S, WRIGHTA D, GOULDINGB K, JONES D. 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. Soil Biology y Biochemistry 38 pp. 898–911.

KRISHNAPILLAY, B. 2000. Silvicultura y ordenación de plantaciones de Teca. En: Revista Unasyva, Vol. 51 No. 201. p12

KUMADA, K. 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Elsevier. Tokyo. 241 p.

LADRACH, W.E. 1980. Respuesta al crecimiento de algunos árboles con la aplicación de fósforo, nitrógeno y boro al momento de la plantación en el Cauca y en El Valle. Cartón de Colombia, S.A., Cali. 17 p. Informe de Investigación No. 59.

LADRACH, W.E. 1986. Fertilización de *Eucalyptus grandis* en la finca Suecia: resultados al final de tres años. Cartón de Colombia, S.A., Cali. 5 p. (Informe de Investigación No. 110).

LAL, R. 2001. Soil degradation by erosion. Land degradation and development 12:519–539 p.

LONDOÑO, A., MONTOYA, D., 2004. Circulación y pérdida de nutrientes edáficos en bosques montanos de Piedras Blancas Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales. p30.

LÓPEZ A., BARRIOS A., TRINCADO G., NIETO V. 2011. Monitoreo y modelamiento del crecimiento para el manejo de plantaciones forestales. CONIF – MADR. 21-22p

LOUMAN B. et al 2001. “Silvicultura de Bosques Latifoliados Húmedos con Énfasis en América Central”. COSTA RICA

LLANOS. U., 2006. Efecto de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos y enraizadores en el establecimiento de *Pinus tecunumanii* (Schw) en Oxapampa. Tesis para obtener el título de Ingeniero Forestal. Lima Perú. 18-95p.

MADR, 2011. Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural. Potencial de reforestación comercial en Colombia – Diagnostico. 21p.

MALAGÓN. D., 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos -Énfasis en génesis y aspectos ambientales- Rev. Academia. Colombiana de. Ciencias. 27(104): 319-341.

MALAGÓN, D.; C. PULIDO y R. LLINÁS. 1991. Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos. Investigaciones Vol. 3 N° 1. IGAC. Santafé de Bogotá. 118 p.

MARIN, A. 2013. Los dueños de los fertilizantes en Colombia. EL Espectador, Investigación 7 Sep. <http://www.elespectador.com/noticias/investigacion/los-duenos-de-los-fertilizantes-colombia-articulo-445007>)

MCDOWELL, W. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. Journal of Tropical Ecology 14:521-536

MESEN. F., 1995. Primer seminario nacional sobre mejoramiento genético y semillas forestales celebrado en Santo Domingo, República Dominicana. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, CATIE, Turrialba. Costa Rica 12p.

METTE, V. 2001. Diseño de políticas de ganadería sostenible de pastoreo en el Quindío, Colombia. Iniciativa para la ganadería medio ambiente y desarrollo LEAD (Livestock, Environment And Development). p. 44. (no. publ.)

MOLINA E. 1998. Encalado para corrección de la acidez del suelo. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. San José de Costa Rica. 45 p.

MONTAGNINI, F; KANNINEN, M; MONTERO; M; ALICE, F. 2004. Sostenibilidad de las plantaciones forestales: ciclaje de nutrientes y efectos de las especies sobre la fertilidad de los suelos (en línea). In Primer congreso sobre suelos forestales, (Heredia, CR). UNA-INISEFOR. 13 p. Disponible en www.una.ac.cr/inis/docs/suelos/Florencia.pdf.

MONTENEGRO, G. H. Y MALAGÓN, C. D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Subdirección Agrológica. Santafé de Bogotá, D.C. 812 p

MORALES, D. 2001. La fertilidad química del suelo y el «mal del ciprés» en Patagonia, Argentina. Ciencia del suelo vol.29 no.2 Ciudad Autónoma de Buenos Aire. Esquel, Chubut – Argentina, p21

MUSALMEN, M. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales: Universidad Autónoma de Chapingo, división de Ciencias Forestales, Departamento de Ecología y Silvicultura. México. p10.

MUNEVAR, F. 1991. Conceptos sobre la materia orgánica y el nitrógeno del suelo, relacionados con la interpretación de análisis químicos. En: Fundamentos para la

Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp. 227-244.

NORTON, D. L.; Ventura, E. y Dontsova. K. 2003. Soil degradation as result of water erosion. *Terra* 21:259–265

OLSSON P.A., THINGSTRUP I., JAKOBSEN I. Y BAATH E. 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31p.

ORSAG, V. 2010. El recurso suelo, principios para su manejo y conservación Primera edición, Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Agronomía, Bolivia, 9 p

OSORNO. H., 2012. Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia. Tesis M.Sc. universidad nacional de Colombia sede Medellín.

OSORIO, 2008. Ciclaje de nutrientes en rodales de distintas edades establecidas en el Caribe Seco Colombiano. Publicado por Nutrición Forestal

OSORIO. N., 2012. Como interpretar los resultados del análisis de fertilidad del suelo, Boletín del Manejo Integral del Suelo y la Nutrición Vegetal Volumen 1 No. 6 Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Laboratorio de Suelos Facultad de Ciencias. 2p

Osorio, N. W. 2014 Manejo de nutrientes del suelo del trópico, capítulo 2. p19-24

OSORIO, S., 1981. Síntomas de deficiencia nutricional de N,P,K en *Pinus ellioti*, Informe presentado para optar el título de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia 31p.

OSORIO. N. W. 2012, pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. Manejo integral del suelo y nutrición vegetal. Volumen 1. No. 4. 1-4 <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&scid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbm9ud29zb3Jpb3xneDo1YmQxZTc1MTU3MTg4OGI2>

OROZCO, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.

PALOMEQUE, E. 2009. Sistemas agroforestales, una alternativa del campo mexicano, Huehuetán, Chiapas, México p 29.

PIEDRAHITA, E., 2001. Reforestación en Colombia: Un Sector por Construir, <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0546-B4.HTM>

PORTA, C.J., LÓPEZ-ACEVEDO, R., ROQUERO, B. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Mundi-Prensa. Madrid, España. 849 pp.

PRITCHETT. W., 1991. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. México. 634 p.

P&C. Maderas 2013. Catalogo *pino oocarpa*. Tomado de www.pcmaderas.net 3p.

RAMIREZ, J., 1991. Crecimiento del *Pinus patula*, en función de los nutrientes edáficos y foliares, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. p 7-57.

RAMIREZ, J., ZAPATA, C., 2004 Producción de hojarasca en bosque de *Quercus humboldtii*, *pinus patula* y *Cupressus lusitánica* de la Cordillera Central, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. p4-37.

RAMIREZ, M., 2010. Inoculación de plántulas de pinos con diferentes hongos e identificación visual de la ectomicorriza. Revista Mexicana de ciencias Forestales. vol.1 no.2 México.

RAMNARINE, S. 2001. The effect of fires and erosion on height growth of teak in Trinidad. Working Paper.19 p.

READ. D.J 1991. Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 376-391 p

REIS, M.G.F. Y BARROS, N.F. 1990. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: Barros, N.F. y Novais, R.F. (eds.) *Relação solo-eucalipto*. Editora Folha de Viçosa. Viçosa, Brasil. Capítulo 7. Pp 265- 302.

RENDON, L. 2013. Clasificación de los organismos del suelo, Macro y Micro biología del suelo. mymbiologiadesuelos.blogspot.com

RESTREPO, M., OSORIO, W., LEON, D., 2014 Assessment of the Effectiveness of Ectomycorrhizal Inocula to Promote Growth and Root Ectomycorrhizal Colonization in *Pinus patula* Seedlings Using the Most Probable Number Technique. Research Article, Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science Volume 2014, Article ID 870616, p6.

REVISTA MM, 2011, Antioquia: Oportunidades y Desafíos de un Ideal Forestal tomado de <http://www.revista-mm.com/>

RICHARDSON A, HENDERSON P, JAMES G, SIMPSON G. 1988. Consequences of soil acidity and the effect of lime on the nodulation of *Trifolium subterraneum* L. Growing in an acid soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 20, Issue 4, Pages 439-445
Read D.J. 1991. Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 47:376-391.

RIVERA, P. H. Y GÓMEZ, A. 1991. Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana. *Caldas, Quindío y Risaralda. Cenicafé, Colombia*. 42(2):37-52.

RIVERA, P. H. y Gómez, A. 1991. Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana. *Caldas, Quindío y Risaralda. Cenicafé, Colombia*. 42(2):37-52.

RODRÍGUEZ *et al.*, 2009. Pérdidas de suelo y nutrientes bajo diferentes coberturas vegetales en la zona Andina de Colombia. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 1-11 p.

ROJAS. F., 1990. Pino Caribe, especie de árbol de uso múltiple en América Central, Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, CATIE, Turrialba. Costa Rica. 4p.

SANCHEZ, J. 2007. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de las plantas "Conceptos básicos" FERTITEC S.A. p19.

SARMIENTO, G. 1984. The ecology of neotropical savannas. Harvard University Press. USA. 241 p.

SALISBURY F.B., ROSS C.W. "Fisiología Vegetal". Grupo Editorial Iberoamericana S.A. México, 1994.

PROEXPORT COLOMBIA. 2010. SECTOR FORESTAL EN COLOMBIA, promoción de turismo, inversión y exportaciones, tomado de www.proexport.com.co / proexport@proexport.com.co.

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL DE ANTIOQUIA, 2005 "ANTIOQUIA NUEVA, un hogar para la vida". Plan estratégico de Antioquia. 10 p.

SIERRA. J., CASTRO. D., OSÓRIO. W., 2012. Dependencia micorrizal del Barcino: *Actual bio* 34 (97): 199-206: 200p.

SIERRA, C., ROJAS, C. 2001. La materia orgánica como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos. Chile. p9.

SIEVERDING, E., 1991. Vesicular-Arbuscular mycorrhiza management. Editorial GTZ, Eschbor, 57-72.

SIQUEIRA, J., O., SAGGIN. J. 2001. Dependency on arbuscular mycorrhizal fungi and responsiveness of some Brazilian native woody species. *Mycorrhiza* 11: 245-255.

STRASBURGER. J., 2004. Tratado de Botánica. 35a. ed. Ed. Omega

TIMMONS, D.R., BURWELL, R.E. y Holt, R.F. 1973. Nitrogen and phosphorus losses in surface runoff from agricultural land as influenced by placement of broadcast fertilizer. *Water Resources Res.* 9:658-67.

TORRES. A., FRANDO. W., 1994. EFECTO DE LA FERTILIZACION CON ROCA FOSFORICA Y BORAX EN EL CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DE *Pinus caribaea* var. *hondurensis* EN EL ORIENTE DE VENEZUELA. 4p

TRAPPE. J.M. 1994. What is a mycorrhiza? Proceedings of the fourth European Symposium on mycorrhizae. Granada, España. En: Johnson N.C., Graham J.H. y Smith F.A. 1997. Functioning of mycorrhizal association along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist*, 135: 575-585

TRUJILLO. E., 2006. Pino Caribe. El Multipropósito Fuerte de su Género. Tomado de www.revista-mm.com. 18p

TRUJILLO N, E. 2009. Guía de reforestación. 2da Edición, ilustrada, aumentada y actualizada, los arboles adaptación, características, producción y usos, Plantación y manejo silvicultural. 123 p.

UPRA. 2015. Unidad de Planificación de Tierras Rurales, Adecuación de Tierras y Usos agropecuarios, ZONIFICACIÓN PARA PLANTACIONES FORESTALES CON FINES COMERCIALES – COLOMBIA ESCALA 1:100.000. MEMORIA TÉCNICA Versión 2

VALDERRYY, J., 2007. *Eucaliptus glubulos*. Revista Astumatura.com en línea. ISSN. 1887-5068.

VÁSQUEZ, W. Y UGALDE, L.A. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinata* y *Pinus caribaea*, en Guanacaste, Costa Rica. CATIE/ IDA/ FAO/ HOLANDA. Proyecto Madelaña-3. Serie Técnica, Informe Técnico No 256. Turrialba, Costa Rica. 33 p.

VÁSQUEZ, A. 2001. Silvicultura de plantaciones forestales en Colombia, Ibagué- Tolima Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, p 4 -140

VILLARROEL, R. 2000. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias – Centro Regional de Investigación Remehue serie Actas N° 4 p71.

VEIGA, M. DA, WILDNER, L. DO P. Y BALDISSERA, I.T. 1992. Projeto "Efeito da erosao na Produtividade do Solo. " Santa Catarina, Brasil. 1992.

WATERLOO, M.J. 1994. Water and nutrient dynamics of *Pinus caribaea* plantation forests on former grassland soils in southwest Viti Lavu, Fiji. Tesis de Doctorado. Universidad Vrije de Amsterdam

WORMALD, T.J. 1975. *Pinus patula*. Tropical Forestry 7. Oxford, UK: Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute. 212 p.

XUEL D, HUANG X, YAO H, HUANG C. 2010. Effect of lime application on microbial community in acidic tea orchard soils in comparison with those in waste land and forest soils. Journal of Environmental Sciences, 22(8) 1253–1260.

XUE, L. 1996. Nutrient cycling in a chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand on a poor site in Yishan, Guangxi. Forest Ecology & Management 89:115-123

ZAPATA, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Corrección de la toxicidad por aluminio en el suelo. Primera Edición. pp. 125-175

ZAPATA, R. 2006. Química de los procesos pedogenéticos pp 31-40

ZAVALA CJF, GAVI RRH, ADAMS SHR, FERRERA-CERRATO DJ, PALMA-LÓPEZ DJ, VAQUERA HY, DOMÍNGUEZ EJM. 2005. Derrames de Petróleo en Suelos y Adaptación de Pastos Tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco. Terra 23: 293-302.