



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Indicadores de calidad del suelo en el Cultivo de la Teca (*Tectona grandis* Linn, F) en la región de San Onofre, Sucre

Néstor José Acevedo Araque

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Postgrado en Ciencias Agrarias
Medellín, Colombia
2015

Indicadores de calidad del suelo en el cultivo de la Teca (*Tectona grandis* Linn, F) en la región de San Onofre, Sucre

Néstor José Acevedo Araque

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo
Profesor Titular y Maestro Universitario

Línea de Investigación: Evaluación de la Calidad del Suelo

Grupo de Investigación:

Variabilidad Espacial de Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Medellín, Colombia
2015

Renovarse es una obligación continua, indagar un derecho fundamental, sin embargo asombrarse continuamente para poder hacerlo y vivir en tiempos de inmediatez y resultados, pareciera ser una utopía. A mi familia, quien me ha devuelto el asombro, me renueva y obliga a indagarme permanentemente.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento al personal operativo de la Reforestadora del Caribe S.A.S.

A la Ingeniera Agrónoma Sonia Marcela Benavidez y al Tecnólogo Forestal Jorge Mario Betancur por el apoyo especial durante el trabajo de campo.

A la empresa Argos S.A., por el apoyo y financiación para el desarrollo de esta investigación.

Al Profesor y Maestro Universitario Daniel Francisco Jaramillo J., por haber tomado el riesgo en esta empresa, por su disposición, enseñanzas e infinita paciencia, profundo agradecimiento.

Resumen

En una zona de lomerío de los Montes de María, en jurisdicción del municipio de San Onofre, departamento de Sucre, Colombia, se realizó un muestro sistemático de suelos y el registro de variables biométricas, con el objetivo de establecer Indicadores de Calidad del Suelo para el cultivo de Teca. En total se tomaron muestras de suelo en 60 puntos y se midieron la altura de las plantas y el DAP de los árboles presentes en cada sitio. En los suelos se determinaron la densidad aparente, el pH y los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica, calcio, magnesio, potasio, fósforo, azufre, hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, así como la producción de CO₂. Los suelos estudiados presentaron altos contenidos de Ca, Mg, Fe, Mn y Cu; medios de K y B y bajos de P, S, Zn y materia orgánica; no se presentó Al intercambiable y predominó la textura FAr. La mayoría de las propiedades (11 de 22) presentaron una distribución de probabilidad sesgada y sólo K, Zn, B y CO₂ tuvieron coeficiente de variación mayores a 40%.

Se determinaron cuatro índices de calidad del suelo (ICS) con base en 4 grupos de indicadores (GMD) seleccionados mediante análisis estadísticos multivariados que incluyeron regresiones lineales múltiples, análisis de componentes principales y análisis de factores. Un cuarto índice (ICS4) se calculó tomando todas las propiedades medidas como indicadores. Las variables de cada GMD fueron transformadas en calificaciones y con ellas se calcularon los Índices de Calidad de Suelos (ICS).

El índice de mayor valor se obtuvo cuando se incluyeron todas las variables (ICS4), seguido por el índice calculado con las variables definidas mediante análisis de regresión múltiple (ICS1). Ninguno de los índices calculados correlacionó significativamente con las variables biométricas, probablemente porque la calidad de los suelos fue buena para el desarrollo de la teca y/o porque la edad del cultivo no fue suficiente para que se detectara el efecto de los pocos cambios en el suelo sobre su desarrollo.

Mediante regresión lineal simple entre ICS4 e ICS1 se obtuvo un modelo con alto poder predictivo del ICS4 (R^2 mayor a 70 %) lo que hace que la evaluación de la calidad de estos suelos sea eficiente y económica pues el ICS1 se calcula con base en apenas 4 propiedades del suelo.

Palabras claves: Teca, Índices de Calidad del Suelo, San Onofre

Abstrac

In a hilly area of Montes de María (San Onofre municipality), Sucre State, a systematic soil sampling and recording of biometric variables was performed with the aim of establishing Soil Quality Indicators (SQI) for Teak cultivation. A total of 60 soil samples were taken. Plant height and diameter at breast height (DBH) of trees at each site were measured. Bulk density, pH and content of sand, silt, clay, organic matter, calcium, magnesium, potassium, phosphorus, sulfur, iron, manganese, copper, zinc, boron, and CO₂ production were determined in soil. The studied soils showed high levels of Ca, Mg, Fe, Mn and Cu; average levels of K and B and low levels of P, S, Zn and organic matter. Exchangeable Al was not present and the predominant texture was FA. Most properties (11 of 22) had a skewed probability distribution and only K, Zn, B and CO₂ showed coefficient variation higher than 40%.

Four soil quality indices (SQI) were determined based on four minimum data set (MDS) selected by multivariate statistical analysis that included multiple linear regression, principal component analysis and factor analysis. A fourth index (SQI4) was calculated taking all the properties measured as indicators. The variables of each MDS were transformed into grades and with them the Soil Quality Indices (SQI) were calculated

The higher index value was obtained when all variables were included (SQI4), followed by the calculated index variables defined by multiple regression analysis (SQI1). None of the indices calculated correlated significantly with biometric variables, probably because the soil quality was good for the development of teak and / or because the age of the crop was not sufficient to detect the effect of the few changes in soil development.

Using simple linear regression between SQI4 and SQI1 a model was obtained with high predictive power of SQI4 (R^2 greater than 70%) making the quality evaluation of these soils efficient and economical because the SQI1 is calculated based on only four soil properties.

Keywords: Teak, Soil Quality Indices, San Onofre

Contenido

	Pág.
Presentación	12
Capítulo 1. Descripción del área de estudio	13
Introducción	13
Resumen	14
1.1 Aspectos biofísicos generales de la zona	15
1.1.1 Localización	15
1.1.2 Geología	16
1.1.3 Geomorfología	17
1.1.4 Clima	18
1.1.5 Vegetación	19
1.1.6 Suelos	21
1.2 Descripción biofísica del sitio experimental	24
Bibliografía	28
Capítulo 2. El Cultivo de la Teca (<i>Tectona grandis</i> Linn, F)	30
Introducción	30
Resumen	32
2.1 Distribución de la Teca (<i>Tectona grandis</i> Linn, F)	33
2.2 Botánica	34
2.3 Características de la madera de Teca	37
2.4 Requerimientos ecológicos	40
2.5 Manejo de la plantación	43
2.6 Productividad de la Teca	46
Bibliografía	47
Capítulo 3. Caracterización edáfica del sitio experimental	53
Introducción	53
Resumen	55
3.1 Materiales y Métodos	56
3.1.1 Descripción y localización del área de estudio	56
3.1.2 Muestreo y registro de datos biométricos	56
3.1.3 Propiedades evaluadas en laboratorio	57
3.2 Análisis estadísticos	58
3.3 Resultados y discusión	58
3.3.1 Análisis descriptivos	58
3.3.2 Análisis de correlaciones	62
Conclusiones	66
Bibliografía	67
Capítulo 4. Indicadores de Calidad de Suelo	70
Introducción	70
Resumen	72
4.1 Indicadores de Calidad del Suelo	74

	Pág.
4.1.1 Indicadores Físicos	74
4.1.2 Indicadores Químicos	77
4.1.3 Indicadores Biológicos	78
4.1.4 Selección de indicadores de calidad de suelo	83
4.2 Metodología	82
4.3 Resultados	88
4.3.1 Conformación de los diferentes Grupo Mínimo de Datos (GMD)	88
4.3.2 Cálculo de los Índices de Calidad del Suelo (ICS)	93
4.3.3 Evaluación del Índice de Calidad de Suelo (ICS) a través de regresiones lineales simples entre ICS4 y demás índices	95
Conclusiones	97
Bibliografía	98

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1 Localización geográfica del sitio de trabajo	15
Figura 1.2 Localización de la Serranía de San Jacinto	16
Figura 1.3 Ubicación del sitio del experimental	24
Figura 1.4 Balance hídrico para la región donde se llevó a cabo el estudio	26
Figura 1.5 Lote de Teca donde se realizó el muestreo y detalle de una calicata de recolección de suelo	27
Figura 2.1 Distribución natural de Teca en el mundo	33
Figura 2.2 Distribución mundial de las áreas plantadas en Teca	34
Figura 2.3 Aspectos de una plantación de Teca en estado maduro y de su sistema radicular	35
Figura 2.4 Detalles de hojas, inflorescencia, flor y semilla de la Teca	36
Figura 2.5 Albura, duramen y corteza en una troza de madera de teca, donde también se pueden apreciar los anillos de crecimiento	37
Figura 2.6 Espacio en una plantación adaptado como patio de secado al aire	38
Figura 2.7 Color, grano y brillo de la madera de Teca de dos procedencias, Magdalena Medio y Puerto Libertador, respectivamente	40
Figura 2.8 Extracción de los principales nutrientes en teca	43
Figura 2.9 Alternativas para la obtención de material de propagación de Teca.	44
Figura 2.10 Siembra en eras de arena de semilla sin escarificar	45
Figura 2.11 Preparación de suelo y aspecto general de una plantación de Teca de 11 meses de edad	45
Figura 3.1 Localización de los sitios de muestreo en el lote experimental	56
Figura 3.2 Ilustración de la toma de sub-muestras de suelo alrededor de las plantas en cada sitio de muestreo.	57
Figura 3.3 Gráficas de caja y bigotes de las propiedades biométricas, físicas, químicas y microbiológicas evaluadas	60
Figura 4.1 Modelos de regresión entre ICS4 y los otros índices de calidad de suelo	94

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1 Precipitación promedia mensual en diferentes estaciones del departamento de Sucre	19
Tabla 2.1 Propiedades Físicas de la madera de Teca	38
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de la madera de Teca	39
Tabla 2.3 Condiciones climáticas en diferentes áreas con plantaciones de Teca.	41
Tabla 2.4 Algunas características de los suelos actualmente cultivados con Teca.	42
Tabla 2.5 Incremento Medio Anual (IMA) de varias propiedades bióticas de la Teca que miden su productividad en diferentes tipos de sitio por calidad, en Costa Rica.	46
Tabla 3.1 Estadísticos básicos de las propiedades edáficas y de los parámetros biométricos determinados en suelos de San Onofre, Sucre, en una plantación de teca	59
Tabla 3.2. Resultado de las correlaciones lineales (Pearson) entre las variables medidas en el área de estudio	63
Tabla 3.3 Resultado de las correlaciones no lineales (Spearman) entre las variables medidas en el área de estudio	64
Tabla 4.1 Propiedades físicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo.	75
Tabla 4.2 Propiedades químicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo	77
Tabla 4.3 Propiedades biológicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo.	78
Tabla 4.4 Indicadores de calidad del suelo utilizados en diferentes agro-ecosistemas.	79
Tabla 4.5 Resultados del análisis de regresión lineal múltiple entre la Altura de las plantas y 15 propiedades edáficas, y del análisis de varianza del modelo obtenido.	87

	Pág.
Tabla 4.6 Resultados del análisis de regresión lineal múltiple entre el DAP de las plantas y 15 propiedades edáficas, y del análisis de varianza del modelo obtenido	87
Tabla 4.7 Matriz de correlación entre las variables significativas en las regresiones de Altura y DAP de las plantas evaluadas en una plantación de teca de san Onofre, Sucre	88
Tabla 4.8 Resultados del Análisis de Componentes Principales (CP)	89
Tabla 4.9 Coeficientes de correlación lineal entre las propiedades edáficas y los primeros 4 componentes principales extraídos. En negrilla coeficientes de correlación estadísticamente significativos al 95 %.	90
Tabla 4.10 Resultado del Análisis de Factor	91
Tabla 4.11 Carga de los factores después de la rotación varimax	92
Tabla 4.12 Estadísticos básicos de los Índices de Calidad de Suelo (ICS) para el lote experimental de San Onofre, Sucre	93
Tabla 4.13 Resultado de las correlaciones lineales (Pearson) entre las variables productivas y los diferentes ICS	93
Tabla 4.14 Valor-P del Anova para las regresiones simples entre las variables biométricas y los ICS	93

Presentación

Las plantaciones de especies maderables han sido una alternativa económica importante en los países tropicales desde la época colonial, pero la productividad en múltiples puntos geográficos está generalmente por debajo de su potencial. Ahora bien, existen oportunidades para aumentar la producción de madera mediante la adopción de prácticas apropiadas de manejo del suelo (Mallapureddi, 2002).

Muchas de las especies de madera dura que se encuentran en plantaciones ubicadas en el trópico tienen una gran demanda. Con algunas excepciones notables, como especies de *Pinus* spp, *Eucaliptus* spp, y en menor proporción Teca (*Tectona grandis*), son difíciles de cultivar debido, en parte, a falta de motivación para su estudio a causa de los largos ciclos fenológicos que tienen: más de 25 años (Raymond, 1996).

Aunque las plantaciones de teca se iniciaron en la India a mediados del siglo XIX y se encuentran ampliamente distribuidas en el trópico, esta especie todavía está en las primeras fases de domesticación, dada su larga rotación y la rápida extinción de los recursos genéticos naturales (Varghese et al., 2007). Aun así, Evans y Turnbull (2004) señalan que a pesar de que la madera dura del trópico no es uniforme y es de difícil manejo, desde el punto de vista ecológico, los cultivadores de madera han llegado a preferir el uso de esta especie, catalogada como exótica en muchos países, por el conocimiento y aceptación de sus productos.

La forestación ha emergido como una estrategia para mitigar los costos ecológicos y económicos de la deforestación del pasado (Craven et al., 2007). La disminución de la selva tropical es uno de los problemas ambientales más sobresalientes de la actualidad, y la forestación puede minimizar algunos efectos de esta disminución, pero el éxito depende, en gran medida, de una evaluación y selección cuidadosa del sitio para hacerla. Cuando este criterio se descuida, el rendimiento disminuye y el deterioro del cultivo sobreviene, originado principalmente por deficiencias de nutrientes y de agua, especialmente durante los primeros años después de la siembra (Zech y Drechsel, 1991).

Con este trabajo se pretende identificar los principales indicadores de calidad del suelo para Teca (*Tectona grandis*) en un bosque seco tropical de la región caribe colombiana.

Capítulo 1. Descripción del Área de Estudio

Introducción

El sector forestal (plantaciones, bosques nativos) tiene buenas perspectivas de crecimiento jalonadas por la demanda creciente de sus productos por parte de las principales economías del mundo. Sin embargo, no ha sido posible aprovechar el potencial del sector debido al inadecuado manejo forestal, la adaptación lenta de nuevas tecnologías, el desconocimiento de la actividad, las limitaciones en infraestructura, entre otros (Cuero et al., 2007).

La producción actual de madera de Teca no supe la demanda mundial que se encuentra en constante aumento. La oferta actual está muy por debajo de la necesidad del mercado, en comparación con otras especies de maderas duras como Eucalipto y Acacia (Pérez y Kanninen, 2005). Entre los factores limitantes que pueden explicar la baja oferta en los países del trópico están: adaptabilidad a factores edáficos, disponibilidad de tierras aptas para las plantaciones y bajo conocimiento de las necesidades y dinámica nutricional del cultivo (Ombina, 2008).

En Colombia, las plantaciones de teca de mayor edad se encuentran en los departamentos de Córdoba y Tolima, cuyo material de siembra fue introducido de Trinidad y Tobago. Estas plantaciones se realizaron sin estudios previos de suelo, con desconocimiento de sus exigencias nutricionales. En los últimos diez años un nuevo auge por la especie ha motivado su siembra en zonas del magdalena medio, el Urabá antioqueño, el piedemonte llanero y algunos sectores de los departamentos de Sucre y Bolívar.

En este capítulo se pretende hacer una descripción biofísica de la zona norte del departamento de Sucre, sector donde se llevó a cabo la presente investigación.

Resumen

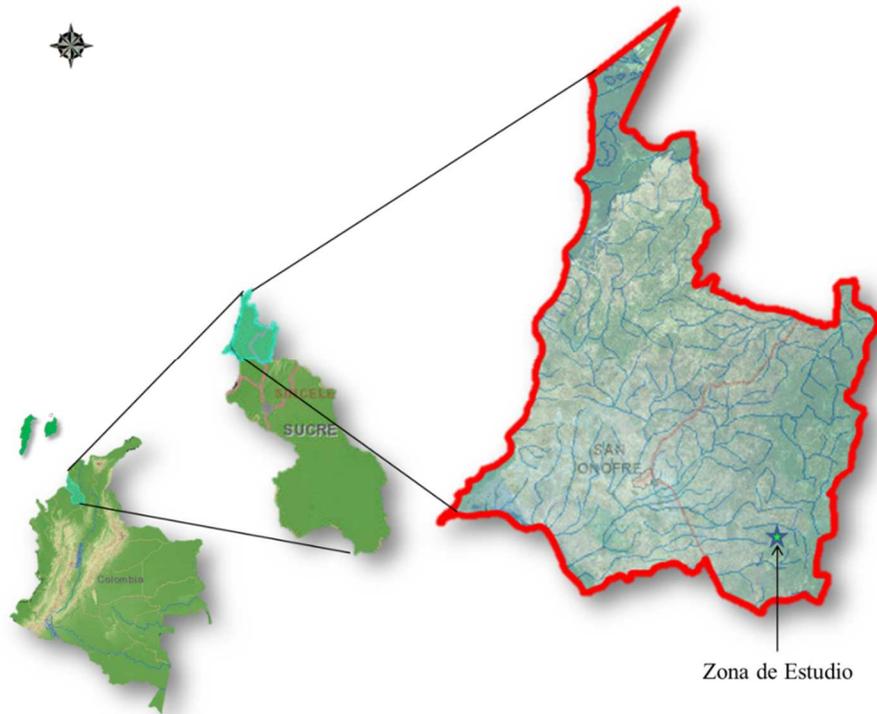
En el norte del departamento de Sucre se están reforestando importantes áreas con teca, situadas en sectores de lomerío de la Serranía de San Jacinto, dominadas por relieves colinados con pendientes de onduladas a escarpadas, desarrolladas en rocas sedimentarias terciarias, principalmente areniscas y arcillolitas. El clima es cálido seco y los suelos, aunque variables, dependiendo del material parental y del relieve, están dominados por suelos profundos, bien drenados, de reacción neutra, nivel de fertilidad medio a alto y frecuentemente con propiedades vérticas.

1.1 Aspectos biofísicos generales de la zona

1.1.1 Localización

Las actividades de campo desarrolladas en el marco del presente trabajo fueron adelantadas en el corregimiento de Palmira, jurisdicción del municipio de San Onofre, en el departamento de Sucre, región geográfica situada al noreste del país entre $8^{\circ} 16' 46''$ y $10^{\circ} 8' 3''$ de latitud norte, y entre $74^{\circ} 42' 25''$ y $75^{\circ} 42' 25''$ de longitud oeste (Figura 1.1). Con una extensión aproximada de 1'091.700 ha, el departamento de Sucre tiene 24 municipios, los cuales incluyen 234 corregimientos, numerosos caseríos y sitios poblados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

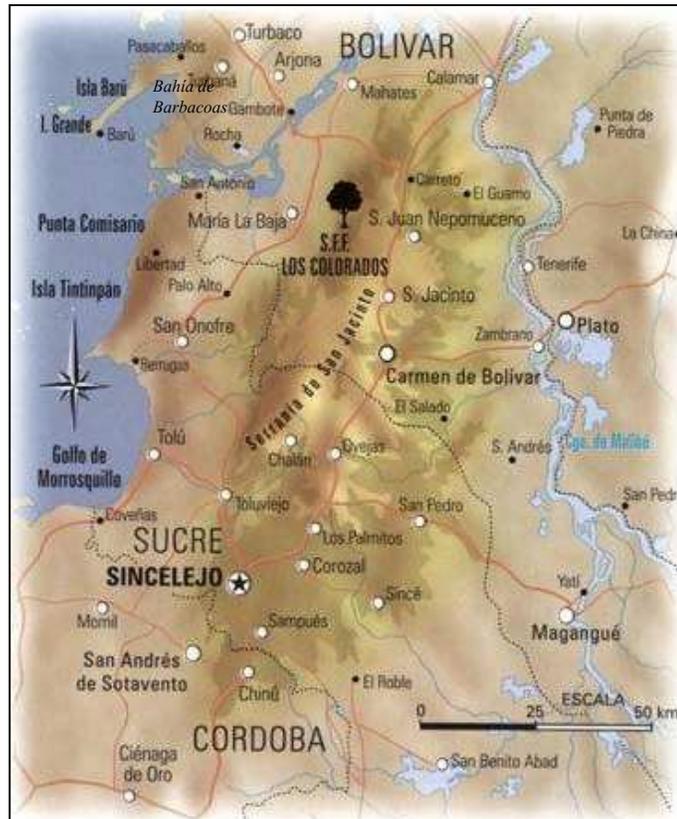
Figura 1.1. Localización geográfica del sitio de trabajo (Fuente: Ingeominas, 1999)



El área de estudio se encuentra en la serranía de San Jacinto, formación montañosa del Caribe colombiano compartida por los departamentos de Sucre y Bolívar cuyo eje, de longitud aproximada a 110 km, discurre en dirección sur-norte, a unos 25 km del litoral que está entre el Golfo de Morrosquillo y la Bahía de Barbacoas (Figura 1.2). Su altitud es inferior a los 1200 msnm y sobresalen los cerros de La Pita, La Cansona y Maco. Esta serranía, conocida también como los Montes de María, en conjunto con las serranías de San Jerónimo, Ayapel, Santa Bárbara, San Lucas, la parte sur de la serranía del Perijá y

la parte sur de la Sierra Nevada de Santa Marta, delimita el área cenagosa y lagunar más extensa y compleja de Colombia: La Depresión Momposina, cuyos cuerpos de agua se nutren de los numerosos ríos que nacen en las cabeceras de estas geformas, y particularmente de los dos ríos interandinos más importantes del país: el Cauca y el Magdalena (Banco de Occidente; 1999)

Figura 1.2. Localización de la Serranía de San Jacinto (Fuente: Banco de Occidente; 1999).



El relieve es moderadamente suave con colinas bajas. Algunos espejos de agua y cursos hídricos de vital importancia son: en el noroccidente el Canal del Dique y múltiples ciénagas como las de Monsú, María la Baja y Quintanilla; en el costado oriental, el curso del bajo Magdalena entre Calamar y Magangué, y en el sur, el complejo de ciénagas formadas por los ríos Cauca y Sinú (Universidad Nacional de Colombia, 2007).

1.1.2 Geología

Desde el eje formado por los municipios de Sincelejo-Ovejas hacia el norte, en la zona montañosa y colinada del departamento de Sucre, la litología corresponde a rocas sedimentarias del terciario y a depósitos no consolidados cuaternarios de diferente origen.

El Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear INGEOMINAS (1999) reconoce las siguientes Formaciones en el Paleógeno:

- San Cayetano, sucesión rítmica de areniscas de grano grueso a fino, con intercalaciones de limolitas y arcillolitas, y con presencia de calizas y conglomerados en la parte media superior.
- Maco, formada por capas gruesas de conglomerados y de areniscas arcósicas.
- Chenge, compuesta de lodolitas y arcosas calcáreas, margas y calizas algáceas.
- Tolú Viejo, de calizas algáceas, margas, areniscas glauconíticas y conglomeráticas.
- San Jacinto, areniscas de grano grueso, conglomerados polimícticos y lodolitas arenosas.
- Unidad areno lodosa de San Onofre, compuesta por areniscas de grano fino a medio con intercalaciones de lodolitas.
- El Carmen, arcillolitas grises, verde oliva y marrón con intercalaciones delgadas de limolitas y areniscas.

En el Neógeno, INGEOMINAS (1999) define las siguientes Formaciones:

- Rancho, con areniscas friables, lodolitas, limolitas y arcillolitas.
- El Cerrito, areniscas calcáreas amarillas, friables y fosilíferas, con limolitas y capas de calizas delgadas.
- Sincelejo, areniscas con lentes de conglomerados y arcilla verde oliva.

En el cuaternario, el INGEOMINAS (1999) reconoce:

- Depósitos coluvio-aluviales de arena, limo y arcilla, localmente con fragmentos de roca sedimentaria.
- Depósitos marino-aluviales de limos, arcillas y gravas en cauces y paleocauces.
- Depósitos de sustrato de manglar con arcilla y limo blandos y grises que localmente presentan conchas, y arenas arcillosas grises.
- Depósitos de playa compuestos por arena cuarzo-feldespática de grano fino a medio, con conchas y gravas localmente.

Cabe destacar que en la zona descrita anteriormente se presentan abundantes rasgos estructurales como sinclinales, anticlinales, lineamientos y fallas, con dirección dominante N 15 E, como se desprende del mapa de INGEOMINAS (1999).

1.1.3 Geomorfología

Siguiendo la jerarquización establecida por Zinck (1988), en la zona noroccidental del departamento de Sucre se identifican los paisajes de montaña, lomerío, piedemonte, planicie y valle.

Los tipos de relieve asociados con el paisaje de montaña son hogbacks (cuestas con buzamiento muy fuerte), barras y crestones. Son porciones de tierra elevada, escabrosa y profundamente disectada que tienen alturas importantes en relación con otros paisajes que la circundan. Presenta, además, disección interna que genera relieves de gran energía entre las áreas montañosas y los valles intercalados (IGAC, 1998).

El paisaje de lomerío, el más extenso en el departamento, se encuentra en las zonas nororiental, central y sur del mismo y corresponde a una repetición de lomas altas alargadas separadas por una red hidrográfica moderadamente densa, en un ambiente morfogenético erosional. Las zonas poco erosionadas comprenden relieves ligeramente ondulados sobre materiales arcillosos, y ocasionalmente en materiales con arena, cascajo y gravilla. En el lomerío derivado del cuaternario antiguo disectado el ambiente morfogenético es erosional, tanto difuso como concentrado, donde las lomas y colinas se encuentran constituidas por material precuaternario expuesto por la erosión de la cobertura aluvial original. En algunos sectores es mixto, es decir, erosional y depositacional. El relieve varía de plano hasta escarpado (IGAC, 1998).

El paisaje de piedemonte corresponde a superficies inclinadas situadas al pie de un paisaje más elevado como lo es la montaña. Se trata de un paisaje definido por su posición intermedia entre la montaña y la planicie. Este paisaje limita al occidente con la llanura fluvio marina del paisaje de planicie, sobre el eje Varsovia, Toluviejo y San Onofre. El ambiente morfogenético es depositacional; el relieve varía de plano a inclinado y el proceso principal es el escurrimiento difuso normal (IGAC, 1998).

El paisaje de planicie se caracteriza por su posición baja, relieve plano, extenso, no confinado, de pendientes suaves menores del 3%, de poca energía y de 1 a 10 m de diferencia de altitud. Varios ríos contribuyen a formar un sistema fluvial complejo y son frecuentes los arroyos difluentes que no están entallados profundamente. Dentro del paisaje de planicie están los tipos de relieve de llanura fluvio marina, terraza marina, llanura fluvio-deltaica y vallecitos (IGAC, 1998).

El ambiente morfogenético de los paisajes de valle es depositacional, es decir, los materiales son transportados y depositados por los ríos en forma lateral y longitudinal. Los tipos de relieve del valle son la vega y la terraza aluvial (IGAC, 1998).

1.1.4 Clima

La región presenta un clima cálido con temperatura media anual de 27 °C. Las lluvias en el departamento aumentan en forma gradual de norte a sur con promedios anuales de 500 a 3000 mm (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Precipitación promedio mensual en diferentes estaciones del departamento de Sucre (Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

ESTACION ¹	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1	39	6.4	23.5	15.6	128.8	177.9	152.3	193.2	191.2	153.6	137.1	51.2	1269.8
2	14.1	27.9	32.1	121.2	213.1	227.8	224.3	249.8	241.6	238.8	112.4	31.6	1734.7
3	16.7	25.6	40.4	91.4	132.2	131.7	132.6	147.2	142.1	117.2	89.2	39.3	1105.6
4	11.7	21	21.7	73.4	170.2	256.9	233.1	235.7	236.1	238.6	130.2	29.5	1658.1
5	12.8	16.4	30.5	112.8	316.2	235.3	277.8	317.8	272.2	414.5	280.9	81.1	2368.3
6	75.5	40.2	23.7	124.6	125.8	194.5	128.9	159.6	150.6	225	88.7	72.3	1409.4
7	2.5	6.5	10.8	54.2	162	249.5	129	107	209.5	139.5	82	77	1229.5

¹: 1 Estación Primates, Colosó; 9 años. 2 Estación aeropuerto La Florida, San Marcos; 15 años. 3 Estación aeropuerto Las Brujas, Corozal; 10 años. 4 Estación Municipio San Benito Abad; 12 años. 5 Estación Municipio Majagual; 11 años. 6 Estación Universidad de Sucre, Sampués; 2 años. 7 Estación Puerta Roja, Sincelejo; 3 años.

En los paisajes montañosos, de lomerío y de piedemonte se presentan climas cálidos de bosque seco tropical (bs-T) y bosque seco premontano (bs-PM). La condición de sequía característica de esta zona de vida se trasmite a los suelos originando condiciones rústicas. Las precipitaciones oscilan entre 1000 y 2000 mm anuales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En los valles aluviales, en las vegas y las terrazas, a pesar de que están influenciadas por el clima cálido seco, la presencia de niveles freáticos altos, inundaciones y encharcamientos en cercanía a cursos de agua o ciénagas, proporciona buena humedad a los suelos en épocas de baja precipitación, mejorando el régimen de humedad edáfico, confiriéndoles condiciones adecuadas para el desarrollo de actividades agrícolas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

La planicie posee un clima de bosque seco pre montano (bs-PM) y en la zona plana litoral aledaña a Tolú, de bosque muy seco tropical (bms-T), cuya sequedad es debida, principalmente, a los vientos alisios del noreste. En otra área de la planicie, localizada al suroriente del río San Jorge, donde las precipitaciones son altas, el clima es de bosque húmedo tropical (bh-T) con precipitaciones que oscilan entre 2000 a 3000 mm anuales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

1.1.5 Vegetación

Al norte del departamento, las condiciones del clima han promovido el desarrollo de vegetación xerófila; son comunes en esta zona especies como el cardón (*Lemnaireocereus griseus*), piñuela (*Bromelia* sp), aramo (*Acacia farnesiana*), trupillo (*Prosopis juliflora*) y guamacho (*Pereskia colombiana*). En la zona del litoral, donde los niveles freáticos son altos y se presenta intercambio de agua dulce y salina, se encuentran relictos de vegetación arbórea de manglar, destacándose el mangle blanco (*Leguncularia recemosa*) y el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), catalogadas en vía de extinción;

especies rastreras como el platanillo (*Batis marítima*) y verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum*) se encuentran bajo condiciones salinas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

Lejos del litoral, con menor influencia salina y mayor precipitación, se encuentran especies arbóreas como ceiba Tolú (*Bombacopsis quinta*), matarratón (*Gliricidia sepium*), cedro (*Cedrela odorata*), totumo (*Crescentia cujete*), caracolí (*Anacardium excelsum*), roble (*Tabebuia roseae*), cañafístula (*Cassia fistula*) y campano (*Samanea saman*), en su mayoría ubicados cerca de arroyos o caños donde los niveles freáticos son altos, y en zonas protegidas de los vientos alisios que soplan a finales y comienzos de año. Se encuentran, además, cultivos de frutales propios de éstas condiciones climáticas como mango (*Mangifera indica*), patilla (*Citrullus lanatus*), papaya (*Carica papaya*), melón (*Cucumis melo*), cítricos y tamarindo (*Tamarindus indica*) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En algunos municipios de la zona de montaña como San Pedro, San Juan de Betulia, Corozal y Galeras, el régimen de lluvias es superior y aparecen especies arbóreas de condiciones semi-húmedas como chaparro (*Curatella americana*), macondo (*Cavanallesi platanifolia*), caracolí (*Anardium excelsum*), campano (*Samanea saman*), guásimo (*Guasuma guasuma*), palma de corozo (*Elaeis melanococca*), paralejo (*Byrsonima crassifolia*), algarrobo (*Hymenaea courbaril*), balso (*Ochroma pyramidale*) y matarratón (*Gliricidia sepium*) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En la zona de colinas se conservan algunos rodales de bosque, pero en las áreas planas la vegetación arbórea ha sido eliminada en su mayoría para el establecimiento de pastos como angleton (*Dichanthium aristatum*), climacuna (*Dichanthium annulatum*) guinea (*Panicum maximum*) y Brachiarias. Se encuentran especies arbóreas como alcaparro (*Adiperatomentosa*), flor amarillo (*Tecoma stans*), olla de mono (*Lecythis minor*) garrapo o resino (*Bulnesia arborea*).

Al sur del departamento, donde son características condiciones de mayor humedad, entre los municipios de San Benito Abad, Caimito, San Marcos y Majagual, quedan algunos relictos de vegetación arbórea en zonas aledañas al río San Jorge, donde se encuentra algarrobo (*Hymenaea courbaril*), guamo (*Inga* sp), guácimo colorado (*Luechea seemanni*), *Miconia* sp., cordoncillo (*Piperanisatum*), carate (*Vismia* sp), balso blanco (*Heliocarpus americanus*) y palma lata (*Bactris minor*).

En las zonas cenagosas son comunes el lirio de pantano (*Eichornia* sp.), lechuga de agua (*Pistia* sp), coquito (*Cyperus rotundus*), junco (*Eleocharis interstincta*), sombrerito de agua (*Hydrocotyle umbrellata*), clavito de pantano (*Jussiea pilosa*), loto silvestre (*Nymphoides hubboldtianum*), barbasco (*Polygonum densiflorum*), platanillo (*Heliconia bihai*), junco (*Typha* sp), helecho de agua (*Salvinia* sp) y gramalote o canutillo (*Hymenachne amplexicaulis*).

Como resultado de la tala indiscriminada para el establecimiento de potreros y cultivos, sumada la agresividad del clima, la vegetación natural del área es escasa. Al norte del departamento, el bosque que se encuentra pertenece a la reserva forestal de Colosó. Al sur, donde las lluvias son más abundantes, hay presencia de rodales aislados y junto a los cursos de agua hay bosques de galería. Al inventariar la flora del departamento, sólo es posible relacionar algunas especies adaptadas a las condiciones de suelo, clima y litología, que al ser alterados por las actividades antrópicas tienden a desaparecer (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

1.1.6 Suelos

▪ Suelos de montaña

En este paisaje dominan los suelos Lithic Haplustolls (55%), los cuales se localizan en las laderas estructurales, en relieve muy quebrado y escarpado. Son suelos superficiales, limitados por roca. El perfil representativo presenta una secuencia de horizontes A – R. El horizonte A es de color pardo oscuro, con espesor entre 20 y 40 cm, franco, estructura en bloques subangulares, fina, moderadamente desarrollada; ligeramente pegajoso y plástico. Estos suelos son de reacción neutra, tienen alta saturación de bases, alta capacidad de intercambio catiónico, contenidos altos de potasio y carbono orgánico, muy bajo contenido de fósforo asimilable. Su fertilidad es moderada y presenta limitantes para uso agrícola y pecuario, por las fuertes pendientes, susceptibilidad a la erosión y poca profundidad efectiva (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En el 35% de la unidad se presentan suelos Typic Ustorthents que se localizan en las partes medias y bajas de las laderas. Son suelos profundos, limitados por roca en avanzado estado de descomposición; el perfil característico es de tipo A – C. El horizonte A tiene menos de 20 cm de espesor, es pardo amarillento oscuro, franco, con estructura en bloques subangulares medios, débiles; friable, ligeramente pegajoso y plástico. El horizonte C es franco a arenoso, con gravilla y sin estructura. Son suelos de reacción moderadamente ácida a moderadamente alcalina en profundidad, alta saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico, contenido medio de carbono, bajos en fósforo asimilable y fertilidad natural moderada. Los principales limitantes de uso de estos suelos son las fuertes pendientes y la erosión ligera a moderada. El 10% restante de la unidad está formado por afloramientos rocosos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

▪ Suelos de piedemonte

En el glacis de acumulación de este paisaje se destacan los suelos evolucionados provenientes de materiales parentales calcáreos, moderadamente profundos y bien drenados, arcilloso finos, con alta saturación de bases y alta capacidad de intercambio catiónico, contenido medio de materia orgánica, bajos en fósforo y reacción de fuerte a muy fuertemente ácida, que se clasifican como Vertic Haplustalfs, acompañados de otros

muy similares, de reacción neutra que se clasifican como Typic Haplustalfs (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En las áreas de contacto con la llanura fluvio marina, en la parte terminal del glacis se encuentran suelos pobremente drenados, superficiales, limitados por fluctuaciones del nivel freático, clasificados como Vertic Trophaepts y que presentan bajo contenido de materia orgánica, alta saturación de bases, alta capacidad de intercambio catiónico, contenido bajo de fósforo, reacción moderadamente ácida a ligeramente alcalina y fertilidad natural moderada (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998)

En la parte media del glacis se encuentran suelos bien drenados y profundos, con bajo contenido de materia orgánica, alta saturación de bases, alta capacidad de intercambio catiónico, bajo contenido de fósforo en los horizontes superficiales, y de medio a alto en los inferiores, reacción de ácida a neutra y fertilidad natural baja, los cuales se clasifican como Vertic Ustropepts (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

Las limitaciones para el uso de todos los suelos en esta unidad son la mala distribución de las lluvias en el año, el drenaje pobre y la poca profundidad efectiva de la mayoría de ellos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

▪ **Suelos de Valle**

Tienen relieve plano y sufren inundaciones. Los suelos se han derivado de aluviones, especialmente arcillas carbonatadas o básicas, y se caracterizan por ser superficiales a moderadamente profundos, limitados en la profundidad por arcillas compactadas y fluctuaciones del nivel freático. Los limitantes para el uso de los suelos en esta unidad son la mala distribución de las lluvias, poca profundidad efectiva, nivel freático alto e inundaciones en épocas de lluvias.

En las cubetas de las vegas los suelos son superficiales, limitados por nivel freático fluctuante, y pobremente drenados. Presentan alta saturación de bases y alta capacidad de intercambio catiónico, contenido bajo de fósforo, altos contenidos de materia orgánica en el primer horizonte, reacción ácida a neutra, fertilidad natural alta, y se clasifican como Vertic Trophaepts (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En las napas se encuentran Fluventic Ustropepts de profundidad moderada, limitados por fluctuaciones del nivel freático. Son bien drenados, presentan alta saturación de bases y alta capacidad de intercambio catiónico, bajo contenido de fósforo y de materia orgánica, reacción ácida y fertilidad natural moderada. En los rebordes de las cubetas hay suelos profundos, limitados por horizontes arcillosos compactos, y con drenaje natural imperfecto que se clasifican como Entic Haplusterts: Son suelos con alta saturación de bases y alta capacidad de intercambio catiónico, contenidos medios de materia orgánica y bajos de fósforo, reacción neutra a ligeramente alcalina y fertilidad natural moderada (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

En las terrazas se encuentran suelos derivados de aluviones antiguos que presentan buena profundidad efectiva y erosión hídrica laminar ligera a moderada. Unos suelos son profundos, limitados por arena, y bien drenados: Ustic Dystropepts; otros son superficiales, limitados por el nivel freático fluctuante, y pobremente drenados: Typic Trophaepts, y otros son superficiales, limitados por capas de arena, y excesivamente drenados, con alto contenido de cuarzo: Ustic Quartzsammments. Predominan los suelos con reacción ácida, baja a media saturación de bases y de intercambio catiónico, saturación con aluminio alta y fertilidad natural baja (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

▪ Suelos de Lomerío

En el lomerío el tipo de suelos que se desarrolla está fuertemente condicionado por el tipo de material parental y por el relieve. En el clima seco, los principales materiales parentales son las areniscas y las arcillolitas, y en el sector que presenta clima cálido húmedo, el material parental lo forman lutitas. Del estudio de suelos del departamento de Sucre, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1998) se extrae la información que se presenta en este aparte.

En el sector donde están las areniscas calcáreas se presenta un relieve ondulado a escarpado, lo que genera suelos superficiales que se clasificaron como Lithic Ustrothents y Typic Ustorhents. En otros sectores de areniscas no calcáreas, los suelos tienen un control importante del relieve en su desarrollo. En los relieves más fuertes (ondulado a quebrado) predominan los suelos Typic Ustropepts y Vertic Ustropepts; en relieves ondulados son dominantes los Typic Haplusterts y los Lithic Haplustolls y en los casi planos, los suelos son Typic Ustipsammments.

En las lomas de arcillolitas también hay control topográfico de los suelos, acompañado por un efecto de la composición de las rocas. Cuando el relieve está entre ondulado y quebrado y las arcillolitas son neutras, los suelos dominantes son Vertic Ustropepts, Entic Haplustolls, Vertic Trophaepts y Typic Ustropepts. Si el relieve es quebrado y la arcillolita es carbonatada, domina el suelo Chromic Haplustepts, pero si la arcillolita es ácida, los suelos dominantes son Typic Ustorhents y Ustoxic Dystropepts. En las lomas de lutitas en clima cálido húmedo los suelos son Oxic Dystropepts, y en los vallecitos aluviales y coluvio aluviales se presentan Typic Haplusterts y Vertic Trophaepts.

Los suelos derivados de las areniscas son moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, neutros a alcalinos, presentan erosión moderada a severa y fertilidad moderada a alta. Los de las arcillolitas son profundos, bien drenados, de reacción neutra y de fertilidad alta; presentan texturas pesadas y minerales de arcilla expansibles que pueden limitar su uso. Los suelos de lutitas y de arcillolitas ácidas son bien drenados, superficiales a moderadamente profundos, ácidos y de baja fertilidad. En los vallecitos se encuentran suelos bien a pobremente drenados, neutros, de fertilidad alta y con limitaciones por fluctuación del nivel freático. En términos generales, el principal limitante de uso de la tierra

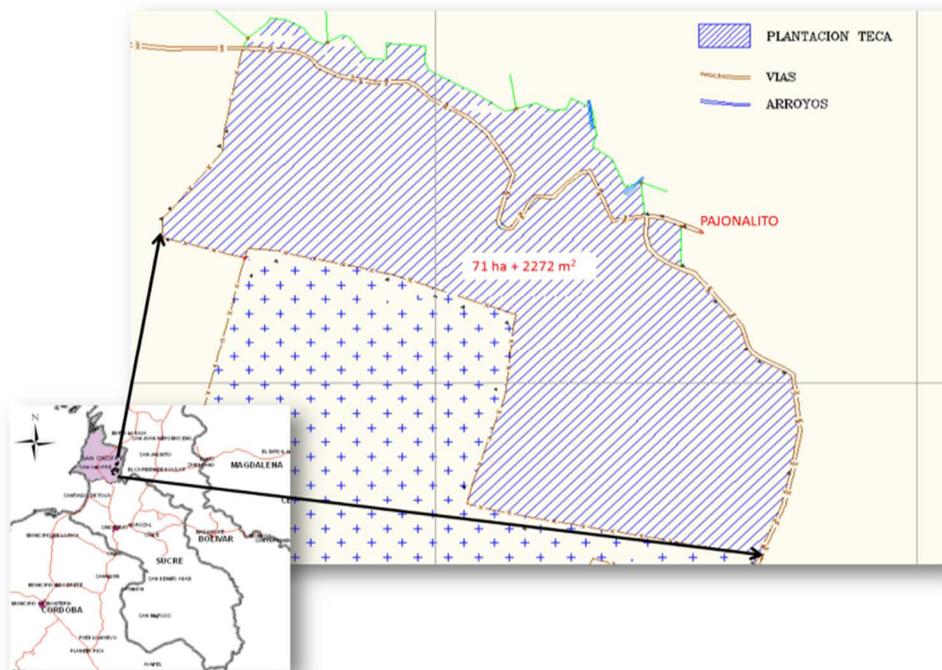
en esta región es el déficit hídrico que se presenta durante un periodo largo al año, así como la alta susceptibilidad a la erosión hídrica en todos los suelos.

1.2 Descripción biofísica del sitio experimental

Esta investigación se llevó a cabo en la plantación de teca del núcleo San Onofre, perteneciente a la Reforestadora del Caribe S.A.S., ubicada en el corregimiento de Palmira, municipio de San Onofre, al norte del departamento de Sucre y distante 23 km, aproximadamente, de la cabecera de este municipio.

A la plantación se accede por la carretera principal que conduce de San Onofre a Tolúviejo, de la cual se toma una vía secundaria en el punto conocido como Chicho, carretable que conduce al corregimiento de Palmira (Figura 1.3). El área donde se llevó a cabo el trabajo experimental se encuentra a una altura promedio de 77 msnm, en la zona de vida bosque seco tropical (bs-T).

Figura 1.3. Ubicación del sitio del experimental (Fuente: Reforestadora del Caribe S.A.S.)

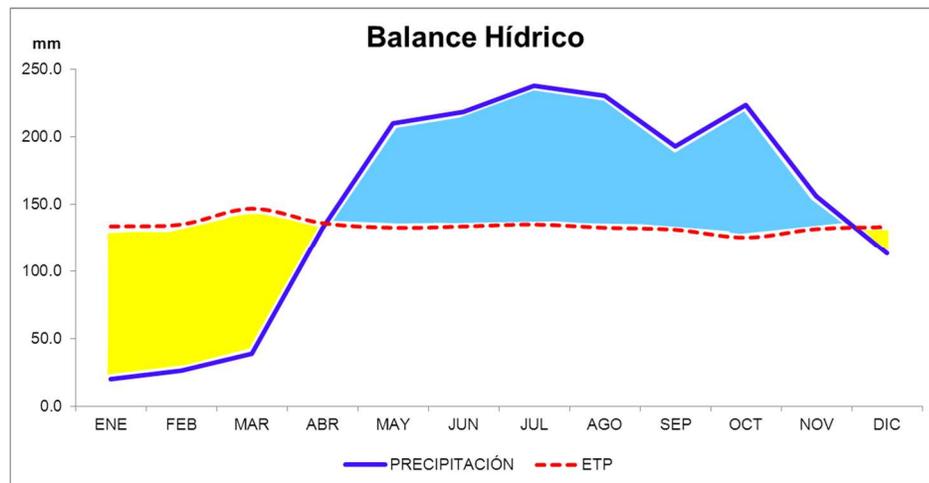


Al nororiente de San Onofre las lluvias son abundantes, confiriéndole a los suelos mejores condiciones de humedad. El promedio anual para esta región es de 1800 mm, según registros de 25 años de la estación Palo Alto, San Onofre, del IDEAM. El régimen de lluvias es unimodal, concentrándose la precipitación entre los meses de mayo y noviembre, con picos en julio y octubre. Un período seco muy intenso se presenta entre diciembre y abril;

en agosto hay un descenso de las lluvias hasta mediados de septiembre (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998; Banco de Occidente, 1999).

El balance hídrico de la zona (Figura 1.4) muestra una temporada de fuerte déficit hídrico que empieza en diciembre y va hasta abril (color amarillo); este comportamiento se revierte a finales del mes de abril con el inicio del ciclo de lluvias, permitiendo a los suelos tener un período de acumulación de agua entre los meses de mayo a noviembre (color azul). De acuerdo con Holdridge (1967), la región se caracteriza como bosque seco tropical (bs-T), y genera en los suelos regímenes de humedad y temperatura ústico isohipertérmico, respectivamente.

Figura 1.4. Balance hídrico para la región donde se llevó a cabo el estudio (Estación Palo Alto, IDEAM, registros entre 1978 y 2002).



En San Onofre la vegetación natural es escasa como resultado de la tala indiscriminada para el establecimiento de cultivos y potreros. El bosque natural que aún permanece presenta un carácter higrotropofítico, transición entre seco y húmedo, con árboles que alcanzan alturas entre 20 y 25 m, con algunos elementos emergentes que pueden llegar a los 35 m. Se destacan las especies indio en cuero (*Bursera simaruba*), árbol resinoso de corteza roja, lisa, exfoliable; tamarindo de mico (*Tamarindus indica*), de madera extremadamente dura y frutos comestibles; ceiba de leche (*Hura crepitans*), cuyo tronco está cubierto de agujones que presentan látex tóxico y cáustico; el jobo (*Spondias mombin*), de corteza gruesa, fisurada, frutos abundantes aromáticos y apetecidos por aves, ardillas y micos; el brasil (*Pithecellobium lanceolatum*), con un tronco retorcido, cuya corteza lisa se utiliza como colorante. Otras especies del bosque de la zona son el sangregao (*Croton lechleri*), guayacán (*Tabebuia rosae*), membrillo (*Gustavia* sp), camajon (*Sterculia apetala*), copeipalo (*Clusia rosea*), divi-divi (*Caesalpinia coriaria*), carreto (*Aspidosperma dugandii*), guácimo colorado (*Luehea seemanii*), majagua colorada (*Pseudobombax septenatum*) y la palma de vino (*Attalea butyracea*) (IGAC, INDERENA, CONIF; 1984; IGAC, 1989, 1998; Banco de Occidente, 1999).

Los suelos en el sitio experimental se han desarrollado a partir de rocas de la Formación Carmen y presentan erosión ligera a moderada. Son profundos y bien drenados. Químicamente estos suelos presentan reacción neutra a moderadamente ácida, alta saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico de media a alta, fósforo disponible y contenido de materia orgánica bajos y fertilidad natural moderada, por lo que se han clasificado como Typic Ustropepts. Cuando los suelos presentan minerales de arcilla expansibles se clasifican como Vertic Ustropepts. La alta susceptibilidad a la erosión, las pendientes fuertes y el clima seco constituyen los mayores limitantes para su uso y manejo (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1998).

Por un periodo superior a 20 años el sitio estuvo bajo explotación de ganadería extensiva y a partir del año 2007 se han estado sembrando cultivos de Teca con material vegetal proveniente de rodales ubicados en Puerto Libertador (Córdoba) y una densidad de siembra de 1333 plantas por hectárea (Figura 1.5).

Figura 1.5. Lote de Teca donde se realizó el muestreo y detalle de una calicata de recolección de suelo (Imágenes del Autor, 2011)



Para establecer las plantaciones se hizo un control de gramíneas y otras especies de hoja ancha con un herbicida no selectivo. Al momento de la siembra se adicionó al hoyo una mezcla física (15-30-15-20) de Urea, Roca fosfórica, cloruro de potasio y DAP a razón de 80 g por planta y se incorporaron al suelo 10 g de Boro por planta. Durante el primer y segundo año de siembra fueron realizados dos controles de arvenses y podas de formación.

Bibliografía

- Banco de Occidente. (1999). Sierra y Serranías de Colombia, Libros de la Colección Ecológica. Capítulo 8. Recuperado el 16 de mayo de 2011 desde internet: <http://www.imeditores.com/banocc/sierras/cap8.htm>
- Cuero, G., Uribe, E., Hoyos, X. & Arias, N. (2007). *Cadena forestal, madera y muebles* Departamento Nacional de Planeación. *Documento sectorial*. Bogotá D.C.
- Craven, D., Braden, D., Ashton, M., Berlyn, G., Wishnie, M. & Dent, D. (2007). Between and within-site comparisons of structural and physiological characteristics and foliar nutrient content of 14 tree species at a wet, fertile site and a dry, infertile site in *Forest Ecology and Management*, pp. 238, 335–346. Panama.
- Evans, J. & Turnbull, J. (2004). Plantation forestry in tropics: The Role, Silviculture, and use of planted forest for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes. *Oxford University Press*. p. 480. England.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology, Tropical Science Center*. San José, Costa Rica.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1968). *Estudio general de suelos y aptitud agropecuaria de los municipios de San Onofre, Tolú, Tolviejo y Sincelejo*. Departamento Agrológico. V 4. No. 10.
- IGAC, (1987). Mapa de Uso Actual de la Tierra en Colombia. Bogotá.
- _____, (1989). Mapa Suelos y Bosques de Colombia. Bogotá.
- _____, (1998). Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Sucre. Bogotá
- IGAC, INDERENA, CONIF. (1984). Bosques de Colombia. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1999). *Geología del departamento de Sucre. Mapa a escala 1:250000*. Revisado el 3 de Julio de 2012 desde internet:<http://www.ingeominas.gov.co>.
- Mallapureddi, V. R. (2002). *Management of tropical Plantation-Forest and their Soil-Litter System*. Science Publishers Inc.(p. 442) United States of America.

- Ombina, C. (2008). *Soil characterization for Teak (Tectona grandis) plantations in Nzara District of South Sudan*. Thesis Master of Forest Science. Stellenbosh Univerty. Department of Forestry, South Africa.
- Peréz, D. & Kanninen, M. (2005). Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 210, 425-441.
- Raymond, K. M. (1996). A Consortium Support Model for greatly increasing the contribution of quality tropical hardwood plantations to sustainable development. *The amazon Teak Foundation, Teak 2000*. IIED Forestry and land use Series N° 9 (pp. 2-5). Amsterdam, The Netherlands.
- Universidad Nacional de Colombia. (2007). Estudios e Investigación de las obras de restauración ambiental y de navegación del canal del Dique. Informe CM – CD – 5. Convenio Interadministrativo LEHUN CM-I 0037/2005. Facultad de Ingeniería, Bogotá. 96 p. Revisado el 11 de mayo de 2011 desde internet: http://www.bdigital.unal.edu.co/3489/1/Limnologia_.pdf
- Varghese, M., Kamalakannan, R., Nicodemus, A. & Lindgren, D. (2007). Fertility variation and its impact on seed crops in seed production areas and a natural stand of teak in southern India. *Euphytica*, 160, 131-141.
- Zech, W. & Drechsel, P. (1991). Relationships between growth, mineral nutrition and factors of teak (*Tectona grandis*) plantation in the rainforest zone of Liberia. *Ecology Management*, 41, 221-235.
- Zinck, J. (1988). Physiography and soils, Soil Survey Courses. *ITC. Enschede*, The Netherlands.

Capítulo 2. El Cultivo de la Teca (*Tectona grandis* Linn, F)

Introducción

La Teca es una de las principales especies maderables sembrada en el trópico y aunque como plantación comercial comenzó en el siglo XIX, en la India, todavía se encuentra en la fase preliminar de domesticación (Ladrach, 2009; Varghese et al., 2006). En los lugares de su distribución natural la teca puede crecer en rodales muy homogéneos. Su capacidad de adaptación, una de sus cualidades ecológicas más sobresaliente, ha permitido llegar a manejarla bajo un modelo de plantación, confiriéndole la habilidad de crecer en regiones de diversa altitud y régimen pluviométrico, reduciendo el ciclo final de corte, en plantaciones comerciales, de 80 a 100 años en la década de los sesenta, a 20 – 25 años en la actualidad.

La popularidad de que goza, se debe a las propiedades que combina: dureza, estabilidad, color atractivo, resistencia al deterioro y facilidad de trabajo. Se fabrican con madera de teca desde piezas de ebanistería hasta construcciones navales. La forma de su propagación va desde semilla hasta material obtenido por cultivo de tejidos, técnica que va precedida de programas de mejoramiento. En plantaciones de Centro América, la propagación por vía clonal, partiendo de árboles plus, es una alternativa que ha ganado preferencias entre productores de material vegetal, aunque la propagación por semilla sigue siendo la más utilizada.

La mayor tasa de crecimiento en las plantaciones de teca se presenta en los 2 primeros años, lográndose el mayor incremento medio anual (IMA) entre 7 y 12 años, dependiendo de la calidad del sitio (Ladrach, 2009).

En Colombia, la teca fue introducida en el siglo XX a partir de semilla proveniente de Trinidad. En la actualidad su cultivo se ha popularizado y es común encontrarla en todas las regiones naturales del país, que presentan las condiciones de clima y suelos favorables para su establecimiento. A pesar del interés que ha suscitado, la información que se encuentra sobre su manejo sugiere que aún se encuentra en construcción.

El objetivo de este capítulo es hacer una revisión acerca del origen, la distribución mundial de las plantaciones, aspectos botánicos, morfológicos y de calidad de la madera de Teca (*Tectona grandis*), precisando detalles relacionados con sus requerimientos edáficos y climáticos, así como presentar algunas consideraciones relacionadas con su manejo y productividad.

Resumen

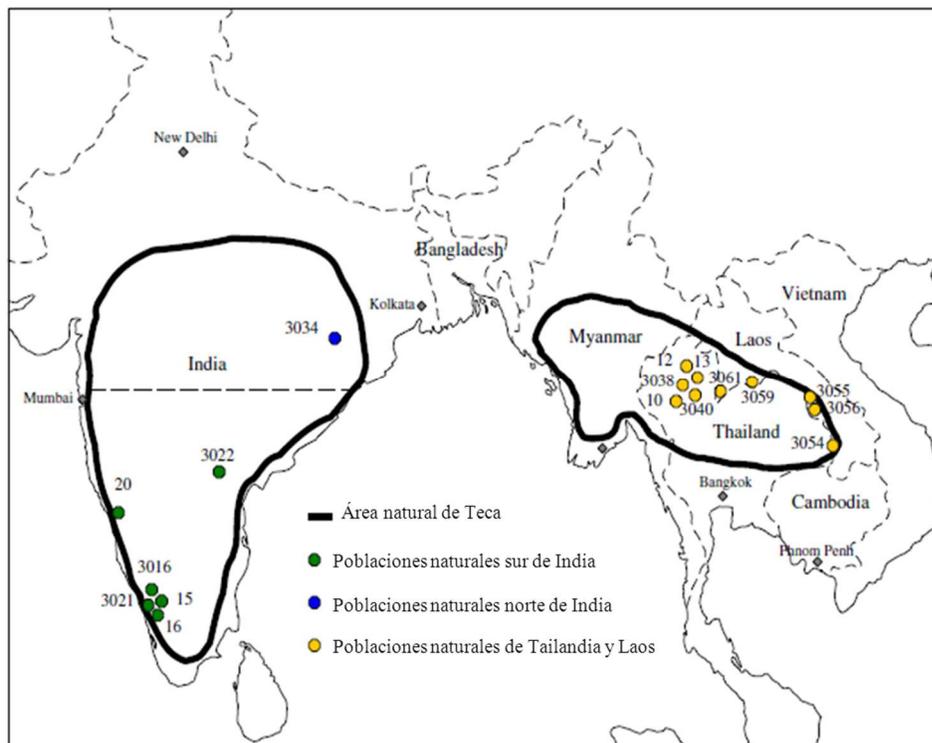
La Teca (*Tectona grandis*) es un árbol latifoliado tropical que puede alcanzar los 30 m de altura en plantaciones con turnos de 20 a 25 años. Su madera es muy apreciada por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas y, sobre todo, por la morfología de su veteado que da unos bellos acabados a los productos elaborados con ella.

Se cultiva en climas cálidos con suelos profundos, bien aireados, bien drenados, de reacción neutra a ligeramente ácida. No tolera inundaciones ni ambientes reductores. Es exigente en luz por lo que se deben controlar otras especies vegetales a su alrededor durante sus primeras etapas de crecimiento. Se siembra con densidades entre 1000 y 2000 árboles/ha y se le hacen de 2 a 3 aclareos durante su ciclo de producción.

2.1 Distribución de la Teca (*Tectona grandis* Linn, F)

Es una de las especies latifoliadas del bosque tropical, de madera dura, más conocida y valiosa en el mundo (Raymond, 1996; Hiratsuka, 2005; Alvarado, 2006; Cruz et al., 2008). Se presenta de manera natural en la India, Myanmar, parte del norte de Tailandia y Laos, entre 9° y 25° de latitud norte, 73° y 104° de longitud oeste (Figura 2.1). En Indonesia y la isla de Java la especie fue introducida desde la India entre los siglos XIV y XVI, al parecer por semilla proveniente del norte de la india y la región central de Laos (Tewari, 1999; Briscoe, 1995; Fofana, 2009; Verhaegen et al., 2010). Los primeros cultivos de teca comenzaron en la India en el año de 1840, alcanzando niveles significativos a partir de 1865. Fuera de Asia, el primer país donde se introdujo la teca fue Nigeria, en 1902. En América Tropical la primera plantación de teca se estableció en Trinidad y Tobago en 1913 con semillas procedentes de Tenasserin (Birmania), y de allí se extendió a Honduras, Panamá y Costa Rica entre los años 1926 y 1929. En la actualidad su cultivo se ha extendido a la mayoría de los países latinoamericanos: Colombia, Ecuador, Venezuela, Brasil y Guyana Francesa, así como a los de África tropical: Benin, Costa de Marfil, Ghana, Nigeria, Senegal, Sierra Leona, Sudán. Tanzania, Tojo, Camerún, Zaire y Zimbabwe (Nunufi y Murchison, 1998; Tahir, 2010; Tewari, 1999; Pandey y Brown, 2000; Bhat y Hwan, 2007; Ombina, 2008). En Colombia fue introducida a mediados del siglo XX (Buriticá y Salazar, 2007).

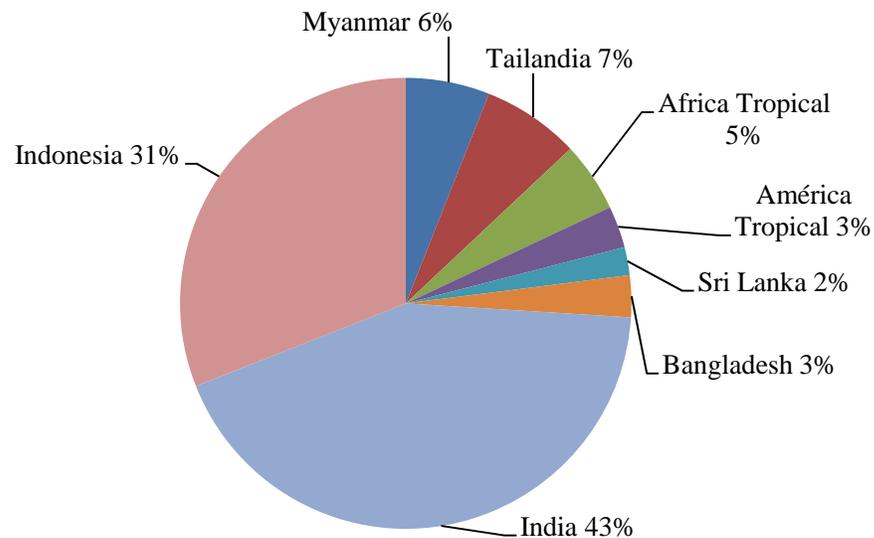
Figura 2.1. Distribución natural de Teca en el mundo (Fuente: Fofana et al., 2009)



Su distribución altitudinal varía entre regiones. En Java está de 0 a 700 msnm, en Myanmar llega a 1000 msnm y en la India a los 1300 msnm (Tahir, 2010). En Colombia se encuentran plantaciones de 0 a 1100 msnm, bajo diferentes tipos de suelos y condiciones de oferta ambiental.

Para el año 2000, el área mundial total de plantaciones alcanzó los 5.7 millones de hectáreas (FAO, 2001), convirtiéndola en una de las especies latifoliadas más sembradas en diferentes continentes. De esta área, India e Indonesia participan con un 74 % (Figura 2.2).

Figura 2.2. Distribución mundial de las áreas plantadas en Teca. Adaptado de Bhat y Hwan (2007).



2.2 Botánica

La Teca es una especie vegetal diploide ($2n = 36$) que pertenece al orden Lamiales, familia Verbenaceae, género *Tectona* del cual se reportan tres especies: *Tectona hamiltoniana* Wall, *Tectona philippinensis* Benth & Hook.f y *Tectona grandis* L.f., esta última la más conocida y utilizada. Es una planta de hojas grandes, anchas, caducas y de forma elíptica, de 11 a 85 cm de largo y 6 a 50 cm de ancho, con peciolo gruesos, limbo membranáceo o subcoriáceo y nervios prominentes, ásperas, simples, que crecen en dos verticilos; el haz de la hoja es como papel de lija, mientras que el envés es densamente pubescente (Warrier et al., 1996; Appanah y Weinland, 1993; Chaves y Fonseca, 1991; Verhaegen et al., 2010.)

De acuerdo con la procedencia se presentan diferencias con respecto a la forma y color de las hojas, color y estructura de la corteza, persistencia o dominancia del eje, ramificaciones, yemas, forma del tallo y contrafuertes del fuste. Por ejemplo, las procedencias del norte de Tailandia y Myanmar son conocidas por sus troncos largos y rectos, mientras que la teca procedente de India e Indonesia se caracteriza por troncos cortos y claros. En la India, mediciones de la hoja han permitido reconocer doce variaciones intraespecíficas (Bagchi, Sharma & Gupta, 1989; Bedell, 1989; Bagchi, 1995; Kaosa-ard, 1999; Kyaw, 2004; Bendale et al., 2005).

Generalmente el tronco es cilíndrico, aunque con frecuencia bifurcado. La corteza es suave, de hasta 15 mm de espesor, y por lo general presenta profundas grietas longitudinales, se desprende con relativa facilidad y presenta sabor amargo. El sistema radicular de la teca es, de preferencia, superficial: presenta de tres a seis raíces gruesas laterales (Figura 2.3), las cuales pueden alcanzar hasta 12 cm de diámetro, siendo susceptible a la falta de oxígeno (Saldarriaga, 1979; Appanah y Weinland, 1993; Warriar et al., 1996).

Figura 2.3. Aspectos de una plantación de Teca en estado maduro y de su sistema radicular. (Imágenes del autor).



En estado maduro (Figura 2.3), la Teca logra llegar a una altura promedio de 30 metros, con una circunferencia superior a un metro en los sitios buenos. En sitios pobres, alcanza una altura de 12 metros (Zanin, 2005).

La Teca, aunque monoica, es decir, con pistilos y anteras en la misma flor, es una especie de polinización cruzada. Sin embargo, en ocasiones la auto-polinización puede presentarse pero con unos niveles muy bajos de germinación (Raymond, 1996). En la medida en que la teca presenta preferencialmente polinización cruzada, la diversidad genética se considera un requisito previo, no sólo para un crecimiento vigoroso, sino también para un buen desarrollo de fruta y producción de semillas (Varghese et al., 2006).

Esta circunstancia ha motivado a varios cultivadores a abandonar los huertos semilleros, concepto que se consideraba útil treinta años atrás (Goh et al., 2003).

Sus Inflorescencias están dispuestas en panículas erectas terminales de 40 cm a 1 m de largo; pedicelos de 1 a 4 mm de largo; brácteas grandes foliáceas; bractéolas numerosas lineal – lanceoladas; flores pequeñas de cáliz campanulado amarillo verdoso; estilo blanco amarillento, pubescente; estigma blanco amarillento; ovario ovado cónico, densamente pubescente con cuatro celdas; muy visitadas por las abejas (Gupta y Pattanath, 1975; Kaosa-ard, 1986; Chaves y Fonseca, 1991; Appanah y Weinland, 1993)

Las flores tienen seis estambres unidos a la base de los pétalos y un pistilo con un estigma bifido. La mejor recepción del estigma al polen sucede, por lo general, alrededor de tres horas después de la antesis (Tangmitcharoen y Owens, 1997b), siendo más alta la receptividad cuando la antesis se presenta en horas cercanas al medio día. La viabilidad del polen puede permanecer hasta por dos días (Egenti, 1978).

El fruto es una drupa cuadrilobulada, subgloboso, de exocarpo delgado, algo carnoso cuando fresco y tomentoso; endocarpo grueso, óseo, corrugado, con cuatro celdas que contienen de 1 a 3 semillas de 5 mm de largo (Figura 2.4); el tamaño de la semilla, peso y viabilidad varían entre procedencias y su producción está influenciada por las condiciones ecológicas (Gupta y Pattanath, 1975; Kaosa-ard, 1986; Chaves y Fonseca, 1991; Appanah y Weinland, 1993; Warriar et al., 1996; Nagarajan et al., 1996; Tangmitcharoen y Owens; 1997a; Palupi and Owens 1998; Sivakumar et al. 2002; Indira, 2005; Mathew y Vasudeva, 2003; Fofana et al., 2009). En Colombia, de manera especial en la zona norte del país, la floración se presenta en los meses de junio a agosto y la producción de semillas entre noviembre y diciembre.

Figura 2.4. Detalles de hojas, inflorescencia, flor y semilla de la Teca (Imágenes del autor)



Recién cortado, el duramen de la madera es de color verde oliva, que cambia al secarse a un color marrón dorado, mostrando bandas de color oscuro que se desvanecen, eventualmente, con el tiempo. La albura puede presentarse de color amarillo a blanco, claramente distinguible del duramen. Presenta anillos de crecimiento anual, detectables en las superficies laterales como líneas de color marrón, estrechas, más oscuras que el resto del duramen, disposición que tienen los elementos axiales: vasos, traqueidas, fibras del parénquima, con respecto al eje del árbol o a la arista de la pieza aserrada (Figura 2.5). La madera presenta textura fina uniforme, brillo mediano y veteado acentuado originado por los anillos de crecimiento (Kukachka, 1970; Madera, 1989; Vásquez, 2005).

Figura 2.5. Albura, duramen y corteza en una troza de madera de teca, donde también se pueden apreciar los anillos de crecimiento (Imagen del autor)



2.3 Características de la madera de Teca

La madera de la Teca es fina y dura, contiene sílice, tiene una densidad de 0.61 a 0.69 g/cm³; es fácil de secar, preservar y trabajar; presenta buena durabilidad natural y estabilidad dimensional. Posee buen nivel de tolerancia a plagas, enfermedades y exposición a la intemperie. Es la madera tropical de mayor demanda, con al menos 25 tipos de uso que van desde la construcción completa de una casa o construcción naval, hasta postes y piezas de ebanistería. La calidad de la madera de teca fue reconocida hace siglos y esto se refleja en su nombre genérico *Tectona*, palabra de la raíz griega “tekton”, que significa carpintero: por mucho tiempo se ha calificado y considerado como el orgullo del carpintero (Chaves y Fonseca 1991; Drechsel y Zech, 1994; Pandey y Brown, 2000; Bhat y Hwan, 2007). En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan las propiedades físicas y mecánicas de la madera de este árbol, respectivamente. En estas tablas, la condición “Verde” se refiere a madera con más de 30 % de humedad y la “Seca al aire” a madera con 12 % de humedad.

Tabla 2.1. Propiedades Físicas de la madera de Teca (Ríos, 1982; Madera, 1989).

Densidad (g/cm ³)	Verde	Seca al aire	Anhidra ¹	Básica ²	
		0.8	0.61	0.57	0.53
Contracción (%)	Tangencial		Volumétrica	T/R ³	
	Normal	2.69	1.61	4.3	1.67
	Total	4.52	2.52	7.04	1.79

1: Relaciona la masa y el volumen de la madera completamente seca

2: Relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con humedad igual o superior al 30%.

3: T/R = Relación contracción tangencial/contracción radial.

La madera seca rápido, tanto al aire (Figura 2.6) como en estufa, y presenta pocas deformaciones. Además de su resistencia y peso más ligero, es admirada por su fibra recta y facilidad de uso, teniendo un alto valor estético en la elaboración de pisos, construcción de mobiliarios de interior y exterior, instrumentos musicales y contenedores para productos químicos corrosivos: no genera corrosión cuando está en contacto con el metal (Chaves y Fonseca, 1991; Cruz et al., 2008; Ombina, 2008).

Tal vez el aspecto más importante de la madera de teca es su durabilidad y su resistencia a plagas y enfermedades. La madera de teca contiene resinas aceitosas llamadas tectoquinonas (sesquiterpenos) que repelen naturalmente las termitas, además de facultarla contra la pudrición (Tiwari et al., 2002; Ladrach, 2009), no queriendo denotar con ello inmunidad total a las termitas. Según Zanin (2005), se ha sabido que la teca puede durar más de 700 años en clima seco y décadas en ambientes húmedos. No es reconocida como una buena fuente de energía, debido a que su quema genera humo en exceso.

Figura 2.6. Espacio en una plantación adaptado como patio de secado al aire (Imagen del autor)

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de la madera de Teca (Rios, 1982; Madera, 1989; Betancur; Herrera & Mejía, 2000).¹

Condición	Flexión estática ¹			Compresión ²				
				Paralela			Perpendicular	
	ELP ³	MOR	MOE×10 ³	ELP	MOR ³	MOE×10 ³	ELP	MOR
	(kg/cm ²)							
Verde (> 30%)	455	780	97.05	254	361	37.2	62	ND
Seco al aire (12%)	633	1005	108.17	336	458	ND	75	ND
Condición	Dureza ⁴			Cizalladura kg/cm ²	Tenacidad ⁵ kg/m	Extracción clavos kg		
	Extremos	Radial	Tangencial	Lateral	Radial	Radial Tangencial	Extremos	
Verde (> 30%)	447	487	476	103	6.1	115	86	
Seco al aire (12%)	481	489	494	111	3.8	93	83	

El estudio de la madera de diferentes procedencias (Myanmar, Rangoon, Siam y Java) ha permitido concluir que se presentan diferencias fisiológicas, en rendimiento, crecimiento y calidad por su origen (Siddiqui & Abod, 1998). En este sentido son notables las variaciones en el grano y el color de la madera (Figura 2.7), aspectos que son tenidos en cuenta en el mercado y que marcan las preferencias de uso. Las causas de la variación en el color y las características en el grano de la Teca, no están bien entendidas, ni bien documentadas (Ladrach, 2009). Otros estudios sugieren que el veteado está relacionado con el tipo de suelo, presentándose un alto porcentaje de éste en maderas provenientes de suelos de

¹Flexión estática: Ensayo que tiene como finalidad determinar la resistencia de la madera a la flexión estática mediante la aplicación de carga, a velocidad constante, hasta alcanzar la ruptura de la muestra y el módulo de elasticidad (MOE).

² Compresión: Resistencia de la madera a una carga la cual puede ser en dirección normal a las fibras, paralela a las fibras o perpendicular aplicada en una cara radial.

³ ELP (Esfuerzo en el límite proporcional): Es el valor hasta donde el esfuerzo y la deformación son proporcionales. MOR (Módulo de ruptura): Resistencia máxima en un ensayo de flexión o torsión, en un ensayo de flexión el MOR en la flexión es el esfuerzo máximo en la fibra cuando se produce el fallo; en un ensayo de torsión es el esfuerzo de Cizalladura (capacidad de la viga para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento de una parte de la pieza sobre otra). MOE (Módulo de elasticidad): medida de la tenacidad y rigidez del material del resorte, o su capacidad elástica. MOE (Módulo de elasticidad): parámetro que indica la capacidad de la madera a resistir deformaciones.

⁴ Dureza: Resistencia que presenta la madera a la penetración.

⁵ Tenacidad: Capacidad que tiene la madera de absorber energía al aplicar una carga que actúa en forma instantánea.

origen calcáreo, mientras que en suelos que contienen ceniza volcánica, ligeramente ácidos, el veteado disminuye en un 63% (Suhaendi, 1998).

Figura 2.7. Color, grano y brillo de la madera de Teca de dos procedencias, Magdalena Medio y Puerto Libertador, respectivamente (Imágenes del autor).



2.4 Requerimientos ecológicos

La teca presenta un amplio rango de adaptación a condiciones climáticas (Tabla 2.3). Algunas plantaciones se encuentran en regiones con un mínimo de lluvias de 235 mm anuales, como el sur de Chindwara, y otras donde las lluvias son superiores a 2500 mm anuales. Los mejores crecimientos se reportan con precipitación entre 1250 y 3750 mm al año, altitud no superior a 1000 msnm, temperatura mínima de 13 a 17°C y máxima 39 a 43°C, con un periodo de sequía de 5 a 6 meses, entendiendo que en este margen de tiempo las lluvias no superen los 50 mm, obligando a las plantas a perder sus hojas en favor del endurecimiento de los granos de la madera y, con ello, mejorando su calidad (Ombina, 2008).

Tabla 2.3. Condiciones climáticas en diferentes áreas con plantaciones de Teca. Adaptado de Ombina (2008) (N.D: No Determinado).

País y/o Región	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Altitud (m)
Hábitat natural	1250-3750	Min 13 - 17 Max 39 - 43	< 1000
Oriente de Java	1511 - 2108 7 meses húmedos 5 meses secos	30 - 32	100-1000
India	Central	1600-1800	25 - 36
	Sur de Nilambur	> 2500	Min 19 Max 35
	Sur de Chindwara	235 - 1247	Min 20 Max 29
Oriente de Panamá	2300	23-27	N.D.
Nororiente de Costa Rica	2900	26-27	90
Benin	1100-1150	25-29	40-80
Liberia	2223-3221	25-27	N.D.
Togo	1200-1500	N.D	N.D.
Suroriente de Costa de Marfil	1700-2100	N.D	110-200
Sur de Sudan	1350-1600	28-35	800-1000
Colombia ¹	Puerto Libertador	2469 - 3366	27-33
	San Onofre	1604-2254	28-35

¹ Registros de Reforestadora del Caribe S.A.S.

Algunos factores de calidad de los suelos donde se siembra teca se pueden observar en la Tabla 2.4. Esta planta crece mejor en suelos bien drenados, aireados, con alto contenido de oxígeno, franco arenosos y con profundidad mayor a 90 cm. Requiere un pH cercano a la neutralidad: entre 6.5 y 7.5. Los mejores sitios para su siembra se han observado en laderas con arena y arcilla no aluviales ya que la teca no tolera inundaciones ni ambientes pantanosos (Tahir, 2010; Zanin, 2005; Alvarado, 2006). En cuanto a la zona de vida, en Centro América se ha sembrado en bosque húmedo subtropical, bosque seco subtropical, bosque muy seco subtropical, bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical y bosque seco tropical, con comportamientos diferentes en las plantaciones y en la calidad de la madera (Catie, 1986). En Colombia se ha sembrado en zonas de bosque seco tropical, bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical.

Tabla 2.4. Algunas características de los suelos actualmente cultivados con Teca. (Adaptado de Ombina, 2008) (N.D: No Determinado).

País y/o Región		Clase Textural	Tipo de Suelos	Material parental	pH
Myanmar		Franco Arenoso	N.D.	N.D.	6.5 - 7.5
Indonesia	Oriente de Java	N.D.	Grumosol (Vertisol)	N.D.	N.D.
	Central	Arcilloso	Vertisol	Basalto Arenisca	N.D.
India	Nilambur	Franco Arenoso	N.D.	N.D.	N.D.
	Chindwara	Franco Arenoso	N.D.	Aluvi3n	7.9
Nororiente de Costa Rica		Franco Arcilloso	N.D.	N.D.	5.2
Benin		Arcilloso	Vertisol Eutr3co	Arcillas	5.0 - 5.8
Liberia		N.D.	Gleysoles Ferralsoles	Granito - Gneiss	3.8 - 5.2
Suroriente de Costa de Marfil		Franco Arcilloso	N.D.	Granito - Gneiss	N.D.
Colombia ¹	Puerto Libertador	Arcilloso	N.D.	N.D.	4.9 - 5.4
	San Onofre	Franco Arcilloso	Entisoles Inceptisoles	Chert Limonitas	5.7 - 6.1

¹ Datos de Reforestadora del Caribe S.A.S.

Alvarado (2006) considera que deben evitarse condiciones como:

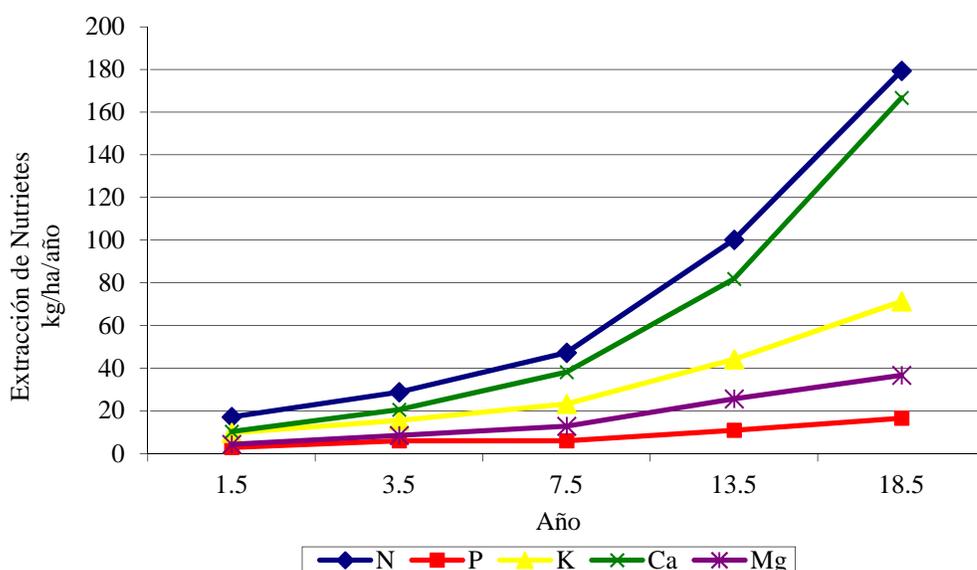
- Suelos mal drenados que presenten períodos prolongados de encharcamiento, en particular Vertisoles.
- Suelos poco profundos, como Entisoles con afloramiento rocoso o roca a poca profundidad.
- Cimas de pendientes muy secas o expuestas a vientos fuertes
- Regiones donde los niveles de acidez del suelo y del subsuelo sean muy elevados.
- Áreas donde la distribución de lluvias se concentra en períodos cortos o que presenten épocas secas prolongadas.

La teca puede remover apreciables cantidades de nutrientes. Sin embargo, llega a crecer en suelos de baja fertilidad natural, con buena estructura y drenaje, y con el empleo de enmiendas y fertilizantes (Alvarado, 2006). En Nigeria, Nwoboshi (1984) encontró que los requerimientos de nutrientes aumentan con la edad, presentando el siguiente orden: K>Ca>N>P>Mg; observó, además, que los mayores requerimientos de nutrientes se presentan en plantaciones superiores a 9 años. En plantaciones menores de cinco años

de Costa Rica, Alvarado y Fallas (2004) aplicaron fertilizantes compuestos N-P₂O₅-K₂O-Mg-S en proporción 14-22-15-4-5, respectivamente, mejorando el crecimiento de la altura de los árboles en un 216%.

El análisis conjugado de muestras de suelo y tejido foliar, asociadas a síntomas de deficiencia, han permitido establecer cómo la acidez del suelo y la disminución de los niveles de N y Ca en el tejido foliar, afectan el crecimiento de la teca (Zech y Drechsel, 1991). Al respecto, Pramod (2009) señala que la dinámica de los nutrientes es muy importante para comprender el funcionamiento de los ecosistemas y el estado ecológico en plantaciones de teca. La Figura 2.8 muestra la dinámica de nutrientes de la teca.

Figura 2.8. Extracción de los principales nutrientes en teca (Fuente: Pramod, 2009).



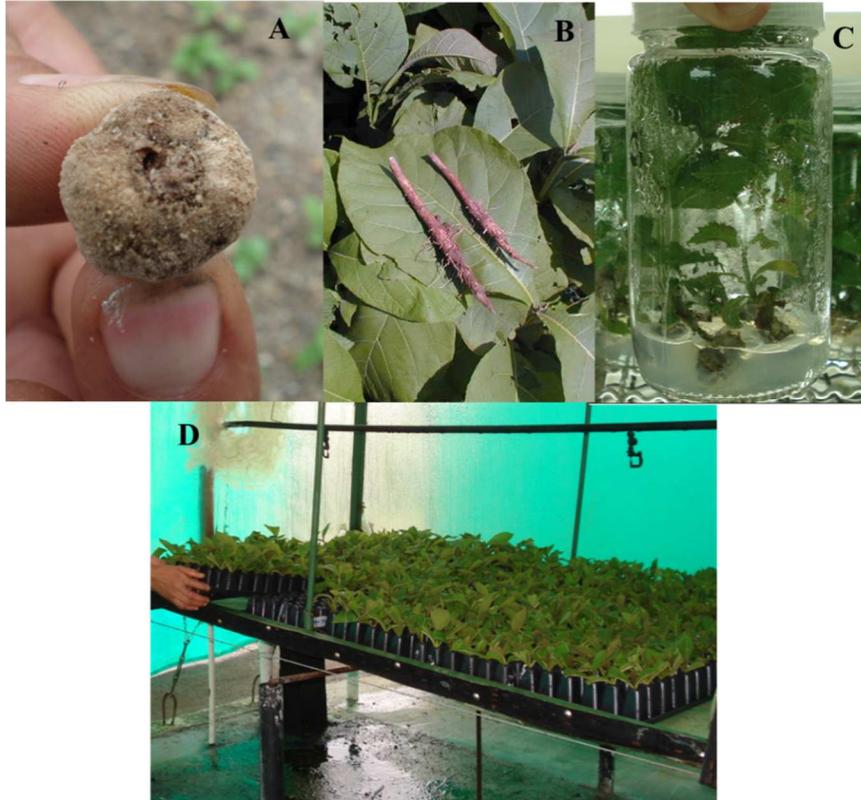
La figura anterior muestra que hay un incremento permanente en la extracción de los nutrientes con la edad, acentuándose la demanda a partir de los 7.5 años, tiempo a partir del cual se dan los mayores incrementos en volumen.

2.5 Manejo de la plantación

Las plantaciones de teca pueden desarrollarse a partir de material proveniente de semilla, a través de tocones o estacas, esquejes enraizados, injertos y cultivo de tejidos (Figura 2.9) (Contreras, 1996; Palanisamy y Subramanian, 2001; Tiwari et al., 2002; Abdelnour y Muñoz., 2005; Azamal y Mohinder, 2006; Sanjay et al., 2006; Callister y Collins, 2008; Husen, 2008; MADR et al., 2008). Por kilogramo, la teca puede tener entre 916 y 1502 semillas, dependiendo de su origen y si ha sido escarificada o no; consecuentemente, el

número de plantas por kilogramo de semilla puede estar entre 1100 y 1615, presentándose un descarte del 4 al 7%, posterior al trasplante, por calidad y mortalidad.

Figura 2.9. Alternativas para la obtención de material de propagación de Teca; A) Semilla no escarificada; B) Estacas; C) Cultivo de tejidos; D) Esquejes (Imágenes del autor).



La siembra de la semilla se puede realizar en eras con arena, previo tratamiento alterno de remojo (noche) y secado (día), hasta observar la dehiscencia de las primeras semillas (Figura 2.10), condición que puede tardar entre 6 y 15 días, si la semilla es de reciente recolección y ha tenido manejo apropiado, para el caso de semilla no escarificada. Con semilla escarificada, es suficiente sumergirla en agua por 24 horas. Una vez las semillas se han dispuesto en las eras con arena (Figura 2.10), la germinación inicia entre el día 10 y 15; la mayor germinación se puede presentar al día 20 – 22.

En plantación, la preparación del terreno y el control de la vegetación no deseada son importantes, ya que la especie es exigente en luz. Se recomiendan tres ciclos de control de arvenses el primer año, y dos el segundo año. Las densidades de siembra en las plantaciones de teca varían entre países cultivadores, y dentro de ellos, en función de la oferta ambiental y de los mercados existentes. En promedio, de acuerdo al conocimiento que pueda tenerse de la procedencia del material, se sugiere una densidad inicial de 1000 a 2000 árboles por hectárea (Figura 2.11), para compensar las tasas de mortalidad que se presentan al inicio de la plantación y tener la oportunidad de seleccionar los árboles de

mejor calidad durante las labores de aclareo o entresaca, las cuales se recomienda ejecutar, según sea la densidad inicial de siembra, cuando las ramas comienzan a entrar en contacto con las de los árboles circundantes, lo que puede ocurrir cuando la plantación tiene alrededor de cuatro años de edad (Nunifu et al., 1999; Enters, 2000; Krishnapillay, 2000; Pandey et al., 2000).

Figura 2.10. Siembra en eras de arena de semilla sin escarificar (A) y dehiscencia de la semilla (B) (Imágenes del autor).

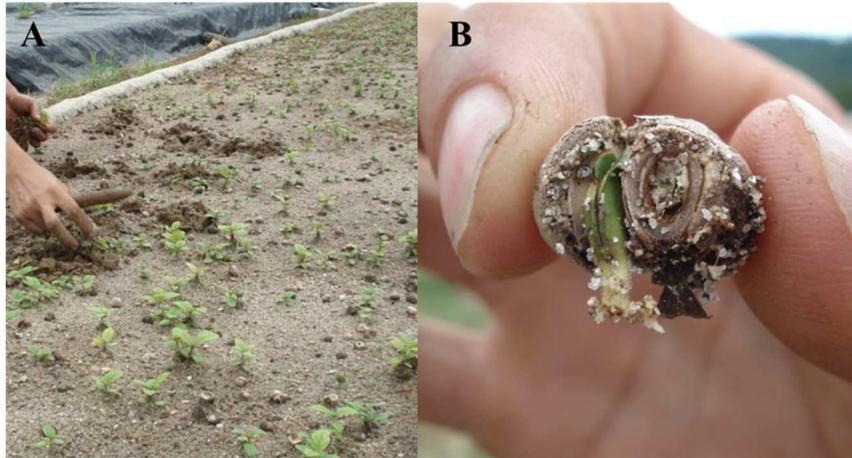


Figura 2.11. Preparación de suelo y aspecto general de una plantación de Teca de 11 meses de edad (Imágenes del autor).



La intensidad de la tala o primer aclareo, año 5 a 7, puede alcanzar el 50 por ciento de la biomasa inicial. A los 10 ó 15 años se puede realizar un segundo aclareo con fines de producción, y en torno a los 15-20 años un aclareo final con los mismos objetivos. El aclareo trae como consecuencia disminución en la competencia por luz en beneficio de la ganancia en volumen de los árboles que quedan en pie, pero el mayor ingreso de luz al interior del lote estimula el desarrollo de yemas adventicias y la formación de ramas epicórmicas en los troncos de los árboles removidos, haciéndose necesario su control.

Según las necesidades del mercado, y otros factores, es normal que al final del ciclo productivo se tengan entre 200 y 300 árboles por hectárea, equivalentes a aproximadamente 300 m³ de madera. De todas formas, las prácticas de manejo pueden variar notablemente, según se cultive la teca en rotaciones cortas o largas (Chávez y Fonseca, 1991; Nunufi et al., 1999; Enters, 2000; Krishnapillay, 2000; Pandey et al., 2000, Ladrach, 2009)

2.6 Productividad de la Teca

La teca tiene un crecimiento rápido en la etapa inicial, seguido por una etapa de crecimiento medio, a partir de la cual aquel tiende a disminuir (Chávez y Fonseca, 1991). Su productividad se mide por su crecimiento vertical (altura) y su ganancia en diámetro (Diámetro normal o la Altura de Pecho – DAP). Con ambas variables se establece un Incremento Medio Anual (IMA) a partir del cual se valoran los rendimientos y se proyectan las ganancias en volumen. En la Tabla 2.5 se presentan algunos rangos de crecimiento y productividad de la teca en Costa Rica.

Tabla 2.5. IMA¹ de varias propiedades bióticas de la Teca que miden su productividad en diferentes tipos de sitio por calidad en Costa Rica (Adaptado de Vaides, 2004).

Variable	Unidad	Calidad de Sitio			
		Baja	Media	Alta	Excelente
IMA del DAP	cm/año	<2.49	2.5 a 3.01	3.02 a 3.8	> 3.81
IMA de la altura	m/año	< 2.32	2.33 a 3.14	3.15 a 4.05	>4.06
IMA del área basal	m ² /ha/año	<2.04	2.05 a 2.77	2.78 a 3.73	>3.74
IMA del volumen	m ³ /ha/año	<11.83	11.84 a 18.00	18.01 a 26.57	>26.58

¹ IMA: Incremento Medio Anual

Bibliografía

- Abdelnour, A. & Muñoz, A. (2005). Micropropagación de teca (*Tectona grandis* L.f). KURÚ - *Revista Forestal*. Costa Rica. TEC. Revisado el 18 de septiembre de 2011 desde Internet.
http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores/anterior5/pdf/Articulo%201.pdf.
- Alvarado, A. (2006). Nutrición y fertilización de la Teca. *Informaciones agronómicas*.61, 1-8.
- _____ & Fallas, J. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la Teca (*Tectona grandis*) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 28(1), 81-87.
- Appanah, S. & Weiland, G. (1993). *Planting quality timber trees in Peninsular Malaysia: a review* (pp 97-99; 176-177). Ed. Forest Research Institute Malaysia
- Azamal, H. & Mohinder P. (2006). Variation in shoot anatomy and rooting behaviour of stem cuttings in relation to age of donor plants in teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *New Forests*, 31, 57-73.
- Bagchi, S. (1995). Selection differential and predicted genetic gain in *Tectona grandis*. *Indian Forest*, 121, 482-490.
- Bagchi, S., Sharma, V. & Gupta P. (1989). Developmental instability in leaves of *Tectona grandis*. *Silvae Genet*, 38, 1-6.
- Bedell, P. (1989). Preliminary observations on variability of teak in India. *Indian Forest*, 115, 72-81.
- Bendale, V., Naik, R. & Mehta J. (2005). Variability studies in teak. *Journal Ecobiol*, 17, 29-34.

- Betancur, C., Herrera, J. & Mejía, L. (2000). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad y secado de la teca (*Tectona grandis* L.f.) de Puerto Libertador (Córdoba). *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín*, 53 (1), 913–940.
- Bhat, K. & Hwan, O. (2007). Teak growers unite. *Wood Science Division Kerala Forest Research Institute and ITTO Tropical Forest Update*, 14 (1), 1–5.
- Briscoe, C. (1995). Silvicultura y manejo de teca, Melina y pochote. Turrialba, CR. Diseminación del cultivo de árboles de uso múltiple. MADELEÑA/USAID/CAP/RENARM y FINNIDA/PROCAFOR. Proyecto 1. *CATIE Serie Técnica, Informe Técnico*, 270, 44.
- Burítica, P. & Salazar, M. (2007). Nuevo registro de royas (Uredinales) potencialmente importantes en Colombia. *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín*, 60 (1), 3645–3655.
- Callister, A. & Collins, S. (2008). Genetic parameter estimates in a clonally replicated progeny test of teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *Tree Genetics & Genomes*, 4, 237–245.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (1986). Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central. *Serie Técnica. Informe técnico*, 86, 220.
- Chaves, E. & Fonseca, W. 1991. Teca (*Tectona grandis*), especie de árbol de uso múltiple en América Central. *Serie Técnica. CATIE, Informe técnico*, 79, 47.
- Contreras, R. (1996 Diciembre). Determinación del efecto de topófitis en el enraizamiento de estacas de teca: *Tectona grandis*. *Memorias IV Taller de investigación forestal y agroforestal*. Guácimo, Limón. Costa Rica, 35-37.
- Cruz, J. P., Leite, H. L., Soares, C. P., Campos, J. C., Smit, L. & Nogueira, G. S. (2008). Curvas de crescimento e de índice de local para povoamentos de *Tectona grandis* em tangará da serra, Mato Grosso. *R. Árvore*, 32 (4), 679-685.
- Drechsel, P. & Zech, W. (1994). DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on teak growth in West Africa. *Forest Ecology and Management*, 70, 121–133.
- Egenti, L. (1978). Pollen and stigma viability of teak (*Tectona grandis* L. f.). *Silvae Genet*, 27, 29–32.
- Enters, T. (2000). Terrenos, tecnología y productividad de las plantaciones de teca en Asia sudoriental. *Unasylva*. 51 (201), 55-61.
- FAO. (2001). Global Forest Resources Assessment 2000. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, Montes 140.

- Fofana, I.J., Ofori, D., Poitel, M. & Verhaegen, D. (2009). Diversity and genetic structure of teak (*Tectona grandis* L.f) in its natural range using DNA microsatellite markers. *New Forest*, 37, 175–195.
- Goh, D., Alloysius, D., Gidiman, J., Chan, H., Mallet, B. & Monteuis, O. (2003). *Selection and propagation of superior teak plant material for improved quality plantation establishment: The ICSB/Cirad-forests joint project as a case study*. International Conference on Quality Timber Products of Teak from Sustainable Forest Management, Peechi, India; Kerala Forest Research Institute, Peechi; ITTO, Japan; Ministry of Environment and Forests, New Delhi.
- Gupta, B. & Pattanath, P. (1975). Factors affecting germination behaviour of teak seeds of eighteen Indian origins. *Indian Forest*, 101, 584–588.
- Hiratsuka, M., Viriyabuncha, C., Peawsa-ad, K., Janmahasatien, S., Akinobu, S., Yusuke, N., Chika, M., Yasuo, O. & Yasushi, M. (2005). Tree biomass and soil carbon in 17- and 22-year-old stands of teak (*Tectona grandis* L.f.) in northern Thailand. *Tropics*. 14 (4).
- Husen, A. (2008). Stock-plant etiolation causes drifts in total soluble sugars and anthraquinones, and promotes adventitious root formation in teak (*Tectona grandis* L. f.) coppice shoots. *Plant Growth Regul.* 54, 13-21.
- Indira, E.P. (2005). *Why teak seed orchards are low productive?* In: K.M.Bhat et al. (Eds.) Proc. International Conference on Quality Timber Products of Teak from Sustainable Forest Management held at KFRI, Peechi, India, 347- 351.
- Kaosa-ard, A. (1986). Teak, *Tectona grandis*, Linn. f. nursery techniques with special reference to Thailand. *Centre DFS (ed) Seed Leaflet*, 4, 1–42.
- Kaosa-ard A. (1999, January). *Gains from provenance selection*. Proceedings of international seminar on site, technology and productivity of teak plantations, Chiang Mai, Thailand.
- Krishnapillay, B. (2000). Silvicultura y ordenación de plantaciones de teca. *Unasyva*. 51 (201), 14-21.
- Kukachka, B. (1970). Properties of imported Tropical Woods. *Forest Products Laboratory*, 1-67
- Kyaw N. 2004. The phenotypic characteristics of natural-grown teak in Myanmar. *Teaknet News*. 33: 3 – 5.
- Ladrach, W. (2009). Management of teak plantations for solid wood products. *International Society of Tropical Foresters*, 1-25
- Madera. (1989). Descripción de especies: Teca. Boletín Técnico Informativo sobre tecnologías de madera. *Laboratorio de productos forestales. Universidad Nacional de Colombia. Seccional Medellín*. 8 (1), 40-43.

- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural, Refocosta, & CONIF. (2008). *Propagación por semilla de la Teca (Tectona grandis L.f). (Proyecto Certica,346/06)*. Bogotá: Autores.
- Mathew, J. & Vasudeva, R. (2003). Clonal variation for seed germination in teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *Current Science*, 84, 1133–1136.
- Nagarajan, B., Varghese, M., Nicodemus, A. Sasidharan, K. R., Bennet, S. S. R. & Kannan, C. S. (1996). *Reproductive biology of teak and its implication in tree improvement*. In: Proceedings of the conference: tree improvement for sustainable tropical forestry, Caloundra, Queensland, Australia.
- Nunifu, T. & Murchison, H. (1999). Provisional yield models of Teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and Management*, 120, 171-178.
- Nwoboshi, L.C. (1984). Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. *Forest Scienc*, 30, 35-40.
- Ombina, C. (2008). *Soil characterization for Teak (Tectona grandis) plantations in Nzara District of South Sudan*. Thesis Master of Forest Science, Department of Forestry, Stellenbosh Univerty, South Africa.
- Palanisamy, K. & Subramanian, K. (2001). Vegetative Propagation of Mature Teak Trees (*Tectona grandis* L.). *Silvae Genetica*, 50, 5–6.
- Palupi, E. & Owens, J. (1998). Reproductive phenology and reproductive success of teak (*Tectona grandis* L. F.). *Journal Plant Science*, 159, 833–842.
- Pandey, D. & Brown, C. (2000). Teak: a global overview. *Unasy/va*, 51, 3-13.
- Pramod, K. S. (2009). *Nutrient dynamics of Teak plantations and their impact on soil productivity - A case study from India*. Ponencia presentada en el XIII World Forestry Congress, Buenos Aires, Argentina.
- Raymond. K. M. (1996). A Consortium Support Model for greatly increasing the contribution of quality tropical hardwood plantations to sustainable development. *The amazon Teak Foundation, Teak 2000*. IIED Forestry and land use Series N° 9 (pp. 2-5). Amsterdam, The Netherlands.
- Rios, C.A. (1982). *Propiedades físico mecánicas y anatómicas de la Teca (Tectona grandis L.F)*. Tesis de grado Ingeniera Forestal, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Saldarriaga, J. (1979). *Estudio del sistema radicular de cuatro especies plantadas de la selva decidua de banco de la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela*. Tesis de Maestría, Centro de Estudios de Forestales de Posgrado, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Sanjay, S., Bhandari, A. & Ansari, S. (2006). Stockplant management for optimized rhizogenesis in *Tectona grandis* stem cuttings. *New Forests*, 31, 91–96.
- Siddiqui, M & Abod, S. (1998). Teak – a potential quality timber for large scale planting in Malaysia. *Thai J*, 17, 81-86.
- Sivakumar, V., Parthiban, K. & Singh. B. (2002). Variability in drupe characters and their relationship on seed germination in teak (*Tectona grandis* L.f.). *Silvae Genet*, 51, 232–237.
- Suhaendi, H. (1998, mayo). *Teak improvement in Indonesia*. Proceedings of the Second Regional Seminar on Teak for the Future. Yangon, Myanmar. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok.
- Tahir, M. (2010). Fertilizer requirements and nutrient dynamics in teak plantation (*Tectona grandis*): Plantation in peninsular Malaysia. (pp 13-16). Germany, Publisher VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. Saarbrücken.
- Tangmitcharoen, S. & Owens, J. (1997a). Pollen viability and pollen-tube growth following controlled pollination and their relation to low fruit production in teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *Annals of Botany*, 80, 401–410.
- Tangmitcharoen, S. & Owens J. (1997b). Floral biology, pollination, pistil receptivity and pollen tube growth of teak (*Tectona grandis* Linn f.). *Annals of Botany*, 79, 227–241.
- Tewari, D. (1999). *A monograph on teak (Tectona grandis Linn. F.)*. Dehra Dun, India: International Book Distributors.
- Tiwari, S., Tiwari, K. & Siril, E. (2002). An improved micropropagation protocol for teak. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 71, 1–6.
- Vaides, E. (2004). *Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (Tectona grandis) en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala*. Tesis Magister, Science, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Varghese. M., Nicodemus, A., Nagarajan, B. & Lindgren, D. (2006). Impact of fertility variation on gene diversity and drift in two clonal seed orchards of teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *New Forest*, 31, 497–512.
- Verhaegen, D., Fofana, I., Logossa, Z. & Ofori, D. (2010). What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis* L) introduced in Africa and Indonesia?. *Tree Genetics and Genomes*. 6 (5), 717-733.

Warrier, P.K., Nambiar, C. & Ramankutty, C. (1996). *Indian Medicinal Plants: A compendium of 500 species*. Hyderabad, India: Orient Longman.

Zanin D (2005). *Feasibility of Teak Production for Smallholders in Eastern Panamá*. Tesis. Michigan Technological University. Houghton, MI, EEUU. 147 pp.

Zech, W. & Drechsel, P. (1991). Relationships between growth, mineral nutrition and site factors of teak (*Tectona grandis*) plantations in the rainforest zone of Liberia. *Forest Ecology Manage.* 41, 221-235.

Capítulo 3. Caracterización edáfica del sitio experimental

Introducción

El suelo es la base para el establecimiento de cualquier proyecto agrícola, pecuario o forestal. En la medida en que el suelo no es homogéneo y que lo caracterizan diferentes tipos de variaciones, antes de establecer cualquier uso en él es necesario conocer sus características, identificar los diferentes tipos de suelos presentes en el área de interés y los límites que ellos tienen dentro del paisaje, lo que se define con base en un muestreo (Roberts y Henry, 2000; Osorio y Ruíz; Sf).

De la forma como lo presenta Jaramillo (2014), caracterizar un suelo implica “describir y/o cuantificar sus características (rasgos que pueden medirse o estimarse) de modo que se puedan establecer sus propiedades (rasgos derivados de la interacción de las características) y deducir sus cualidades (comportamientos definidos por la interacción de características y propiedades)”.

La calidad de la caracterización depende de la calidad de la muestra que se tome para hacerla. La calidad se mide en términos de la exactitud de las determinaciones, es decir, de lo cerca que esté el valor medido del valor real que tiene la característica, y de la precisión, o sea, de la reproducibilidad de los resultados. Tanto la precisión como la exactitud están determinadas por el número de muestras. Los procedimientos que resultan en muestreos con altos niveles de precisión y exactitud, garantizan una muestra que representa el campo y que los resultados son reproducibles (Roberts y Henry, 2000; Osorio y Ruíz; Sf).

La delimitación del área de muestreo representa una parte crítica en la caracterización de los suelos, y depende de los diferentes rasgos que caracterizan el terreno. Generalmente, los límites del suelo coinciden con cambios en la pendiente del terreno, el material parental, la geomorfología, el uso y el manejo. Una vez definidas las unidades de muestreo se procede a tomar al azar un número adecuado de sub-muestras para cada unidad. La cantidad de ellas permitirá establecer la exactitud de las determinaciones que se hagan: a

mayor número de sub-muestras, mayor representatividad de las condiciones de la unidad de muestreo, elevando la exactitud de los análisis de suelo (Roberts y Henry, 2000; Petersen y Calvin, 1986; Osorio y Ruiz; Sf)

El objetivo de este capítulo es caracterizar las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos de un lote experimental en San Onofre, Departamento de Sucre, y correlacionarlas con propiedades biométricas indicadoras de la productividad de la teca.

Resumen

En diciembre de 2010 se seleccionó un lote de 104.7 ha en la plantación de Reforestadora del Caribe S.A.S., del municipio de San Onofre, Sucre, para estudiar la variabilidad de algunas propiedades de suelos dedicados al cultivo de Teca, sembrado con densidad de 1333 árboles ha⁻¹ a mediados del año 2007.

Se hizo un muestreo en red de 3x3 m siguiendo las distancias de siembra utilizadas para la plantación. Se determinaron el pH en agua 1:1, la textura, los contenidos de materia orgánica, bases intercambiables (Ca, Mg, K) P, S, Fe, Mn, Cu, Zn y B disponibles y Al intercambiable. Además, la densidad aparente y la actividad global de microorganismos por producción de CO₂, así como las variables biométricas altura total de la planta y diámetro a la altura del pecho (1.30 m sobre la superficie del terreno).

Los suelos estudiados presentaron condiciones apropiadas para el desarrollo de la Teca: presentaron contenidos promedios altos de Ca, Mg, Fe, Mn y Cu; medios de K y B y bajos de P, S, Zn y materia orgánica; no se presentó Al intercambiable y predominó la textura FAr. La mayoría de las propiedades (11 de 22) presentaron una distribución de probabilidad sesgada y sólo K, Zn, B y CO₂ tuvieron coeficiente de variación mayores a 40% (Tabla 3.1).

El análisis de correlación mostró coeficientes significativos estadísticamente al 95% entre la Altura de la planta con el pH, Ca y Fe, y entre el DAP con la MO, K, Fe, Cu y la relación (Ca+Mg)/K.

3.1 Materiales y Métodos

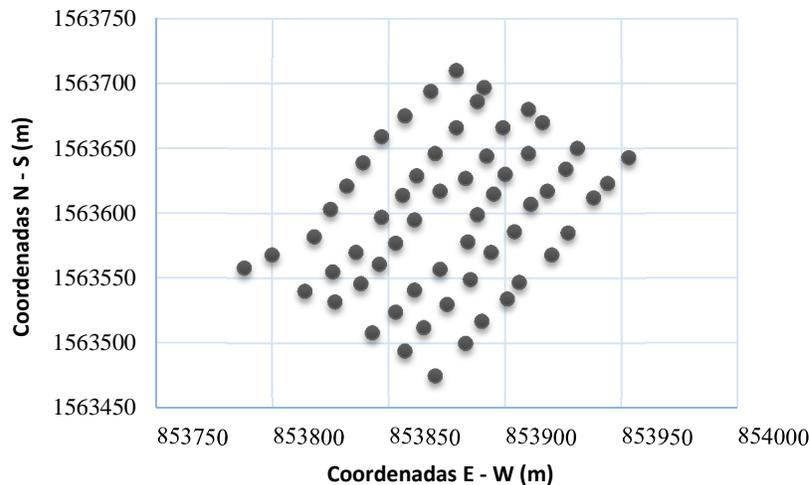
3.1.1 Descripción y localización del área de estudio

El estudio se realizó en el lote 07208301, de 107.4 ha, localizado en la vereda Pajonalito corregimiento de Palmira, jurisdicción del municipio San Onofre, departamento de Sucre, Colombia, cuyas principales características se presentaron en el Capítulo 2.

3.1.2 Muestreo y registro de datos biométricos

En diciembre de 2010 se realizó un muestreo sistemático casi en red regular en el que cada punto de la malla correspondió a una planta que fue georreferenciada con GPS (Figura 3.1). En cada uno de los puntos georreferenciados, 60 en total, a cada planta se le registró el valor del diámetro a la altura del pecho (DAP, a 1.30 m de altura sobre la superficie del terreno), con cinta métrica, y la altura total, con altímetro. Luego se tomó una muestra disturbada de aproximadamente 1.2 kg de los primeros 30 cm del suelo, con palín, compuesta de 4 submuestras distribuidas en cruz a 30 cm alrededor de la planta (Figura 3.2). Del total de la muestra de suelo recolectada por sitio, 200 g fueron empacados separadamente y dispuestos en bolsas herméticas al interior de cajas refrigeradas que posteriormente fueron llevadas al laboratorio GIEM de la Universidad de Antioquia para valorar su actividad biológica. El suelo restante se empacó de igual manera en bolsas herméticas y fue llevado al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para realizar los análisis químicos y físicos correspondientes.

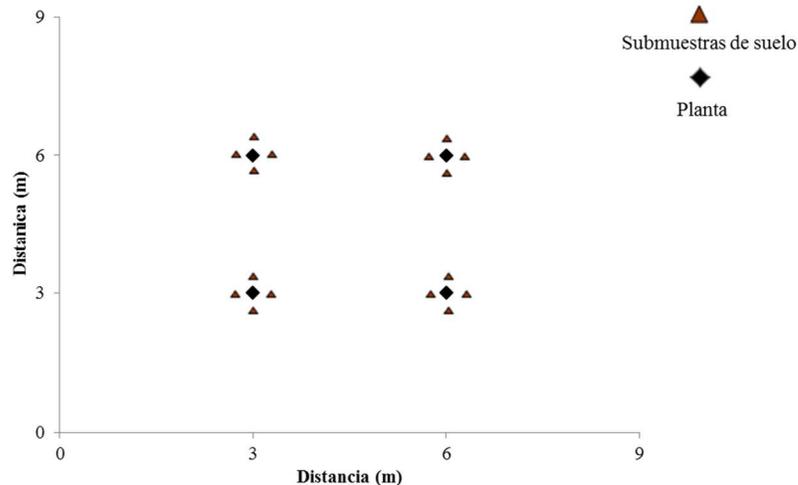
Figura 3.1. Localización de los sitios de muestreo en el lote experimental.



3.1.3 Propiedades evaluadas en laboratorio

Siguiendo los métodos descritos por Osorio (2003) se hicieron las siguientes determinaciones: pH en agua 1:1 v:v con el potenciómetro, el contenido de materia orgánica (MO, %) mediante oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio (método de Walkley – Black), los contenidos de bases intercambiables (Ca, Mg, K, cmol (+) kg⁻¹ de suelo) mediante extracción con acetato de amonio 1N y neutro, el contenido de fósforo disponible (P, mg kg⁻¹ de suelo) por el método de Bray II, azufre disponible (S, mg kg⁻¹ de suelo) por el método de fosfato monocálcico 0.008 M, el contenido de aluminio intercambiable (Al, cmol (+) kg⁻¹ de suelo) extraído con KCl 1N si el pH fue menor 5.5 (si el pH fue mayor o igual 5.5 no se determinó), los contenidos de Fe, Mn, Cu y Zn disponibles (mg kg⁻¹ de suelo) por el método de Olsen – EDTA, el contenido de B (mg kg⁻¹ de suelo) mediante extracción con agua caliente y la conductividad eléctrica (CE, dS m⁻¹) en el extracto de la pasta de saturación del suelo.

Figura 3.2. Ilustración de la toma de sub-muestras de suelo alrededor de las plantas en cada sitio de muestreo.



Las propiedades físicas analizadas fueron: Textura: contenidos de Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar), por el método de Bouyoucos, y la densidad aparente (D_a , Mg m⁻³) por el método del cilindro biselado (Jaramillo, 2014). Como propiedad biológica del suelo se determinó la actividad de microorganismos a partir de la producción de CO₂ (mg g⁻¹ de suelo) de acuerdo al método establecido en el laboratorio del grupo GIEM de la Universidad de Antioquia. Se calcularon las relaciones básicas Ca:Mg y (Ca+Mg)/K, a partir de los datos reportados en los análisis de suelos.

3.2 Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos con todas las variables, fueron sometidos a análisis descriptivos en los que se determinaron los estadísticos que las caracterizaron: mediana, media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximo y mínimo, cuartiles inferior y superior, asimetría y curtosis. Se realizaron correlaciones lineales (Pearson) y no lineales (Spearman) entre todas las variables para determinar el grado de asociación entre ellas.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Análisis descriptivos

En la Tabla 3.1 se presentan la estadística que caracterizaron las propiedades del suelo y las biométricas, medidas en el lote experimental. No se tuvo en cuenta la conductividad eléctrica ya que su valor fue de 0.1 dS m^{-1} en todas las muestras.

De acuerdo con los niveles críticos generales de fertilidad propuestos por ICA (1992), los suelos del área de estudio presentan condiciones óptimas para el desarrollo de actividades agropecuarias. Para Teca, y según los requerimientos señalados por diversos autores (Zech y Drechsel, 1991, 1992; Bebart, 1999; De Oliveira, 2003; Ombina, 2008), se destaca la ausencia de Aluminio (Al) y el nivel adecuado del pH, propiedades que afectan de manera directa su crecimiento. Los contenidos promedios de Ca, Mg, Fe, Mn y Cu son altos, los de K y B medios y los de P, S y Zn bajos; la materia orgánica es igualmente baja, situación de esperarse en las condiciones climáticas de la región (Jaramillo, 2014). De acuerdo con la distribución porcentual de los separados del suelo, su clase textural promedio es Franco Arcillosa (FAr), adecuada para el crecimiento y desarrollo de la teca (Lamprecht, 1990, citado por De Camino & Morales, 2013).

El pH y la Da presentaron la menor variabilidad en sus valores con coeficientes de variación de 4.66 % y 8.93 %, respectivamente. La actividad biológica en el suelo, establecida a partir de la producción de CO_2 , y el contenido de B fueron las propiedades que presentaron los mayores coeficientes de variación (62 % y 74.9 %, respectivamente). Las variables biométricas Altura y DAP presentaron una variabilidad media a baja. Nótese que el 75 % de las muestras, según el Q3, presentaron contenidos de Zn iguales a 1 (Figura 3.3), pudiéndose considerar como constante y, por lo tanto, no se tuvo en cuenta para análisis posteriores.

Tabla 3.1. Estadísticos básicos¹ de las propiedades² edáficas y de los parámetros biométricos³ determinados en suelos de San Onofre, Sucre, en una plantación de teca (*Tectona grandis*) (n=60).

	Media	Mediana	DE	CV (%)	Mín	Máx	Q1	Q3	Sesgo	Curtosis
Altura	8.87	9	1.54	17.3	6	12.6	7.6	10	0.02	-0.75
DAP	8.11	7.86	1.89	23.3	4.23	14	7.03	9	2.43	2.71
Da	1.28	1.275	0.11	8.93	1	1.5	1.21	1.35	-0.30	-0.65
Arena	40.13	40	10.81	26.9	22	68	32	47	0.96	-0.66
Limo	30.13	30	3.51	11.7	20	36	28	32	-2.24	1.03
Arcilla	29.73	30	8.41	28.3	12	44	23	36	-0.50	-1.27
pH	5.93	5.9	0.28	4.66	5.5	6.7	5.7	6.10	2.04	0.62
MO	2.02	2.15	0.71	35.1	0.41	3.4	1.55	2.50	-0.50	-0.52
Ca	16.47	16	2.73	16.6	12.5	25.7	14.75	17.60	3.80	2.60
Mg	8.10	7.75	2.29	28.3	5	15.2	6.3	9.75	2.22	0.29
K	0.24	0.2	0.11	48.5	0.1	0.58	0.15	0.29	3.65	1.29
CICE	24.80	23.7	4.07	16.4	17.7	36.7	22.55	27.10	2.90	1.82
P	2.55	2	0.67	26.5	2	5	2	3	3.74	2.63
S	3.98	4	1.31	32.8	2	7	3	5	1.59	-0.77
Fe	35.82	33.5	13.33	37.2	11	68	26.5	44	1.75	-0.12
Mn	18.22	17.5	5.20	28.6	9	31	14.5	20.50	1.94	0.28
Cu	4.62	5	1.39	30.1	1	8	4	5	-0.91	0.34
Zn	1.23	1	0.50	40.5	1	3	1	1	6.63	5.99
B	0.24	0.22	0.18	74.9	0	0.96	0.14	0.30	6.73	11.44
Ca:Mg	2.16	2.10	0.56	26.2	0.89	3.31	1.73	2.56	0.61	-0.8
(Ca+Mg)/K	123.4	119.8	47.1	38.2	38.1	246.4	89.8	154.9	1.09	-0.5
CO₂	0.15	0.132	0.09	62	0	0.4	0.09	0.21	2.65	0.84

¹: DE: Desviación Estándar, CV: Coeficiente de variación. Min: Valor mínimo. Máx: Valor máximo. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior

²: MO: Materia orgánica. CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva. Da: Densidad aparente.

³: Altura: Longitud vertical de la planta medida desde la superficie del suelo (m). DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm)

Las gráficas de la Figura 3.3 muestran el comportamiento asimétrico dominante en la distribución de los valores de las propiedades estudiadas, el cual estuvo influenciado por una mala práctica de fertilización adelantada en el lote de la investigación, pues fueron empleadas fuentes de P de lenta y alta solubilidad al momento de la siembra en el área de influencia donde fueron tomadas las muestras (Roca fosfórica, DAP, mayores detalles en el Capítulo 1).

Figura 3.3. Gráficas de caja y bigotes de las propiedades biométricas, físicas, químicas y microbiológicas evaluadas.

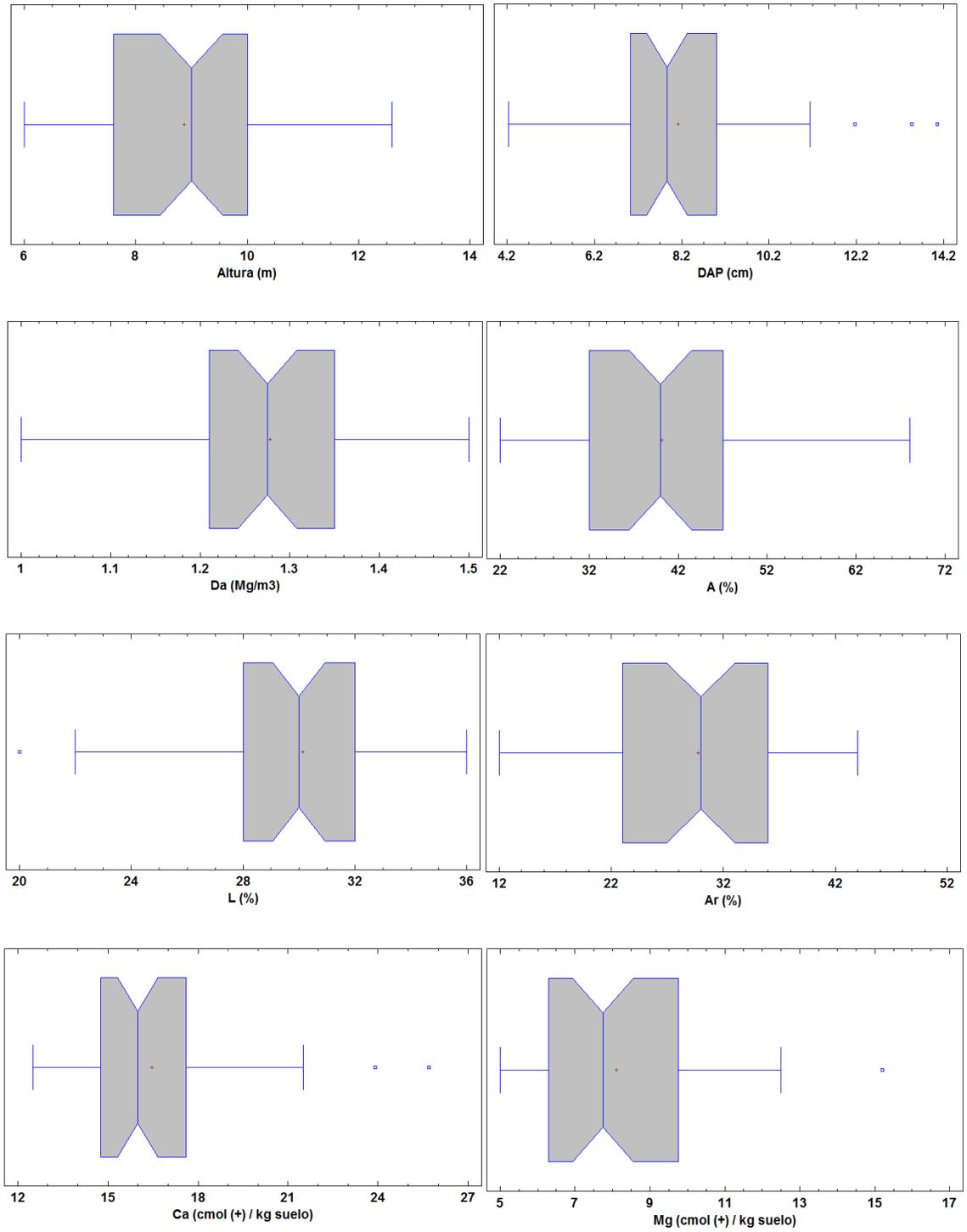


Figura 3.3. (Continuación)

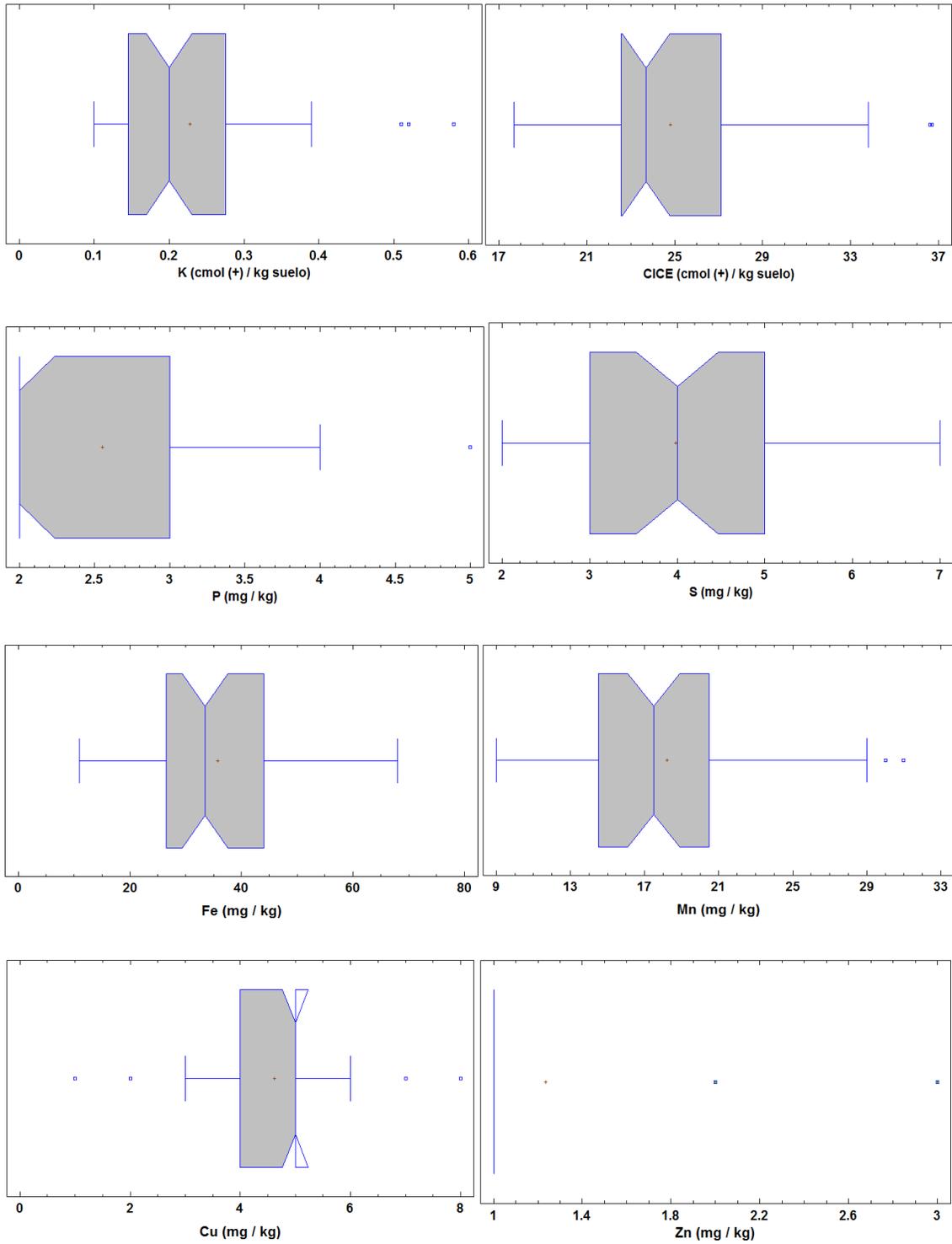
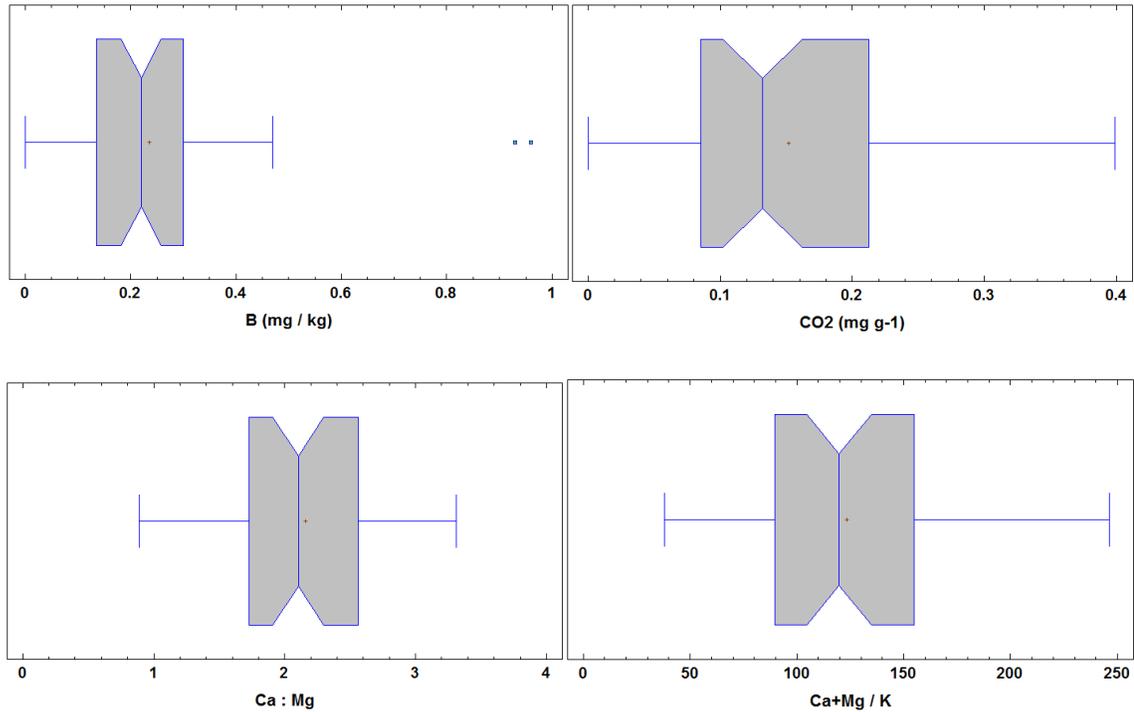


Figura 3.3. (Continuación).

Al analizar la distribución de los valores extremos en las diferentes variables no se encontró ninguna tendencia espacial en ella que sugiriera algún problema especial de suelos, o de otra índole, que estuviera controlando su ubicación: ellos estuvieron distribuidos aleatoriamente, razón por la cual no fueron eliminados para los análisis estadísticos básicos (Webster y Oliver, 2007).

3.3.2. Análisis de correlaciones

En las Tablas 3.2 y 3.3 se muestran los coeficientes de correlación lineales (correlaciones de Pearson) y no lineales (Spearman), respectivamente, obtenidos entre todas las variables evaluadas. Para hallar los coeficientes de correlación de Pearson no se consideraron valores extremos en variables que presentaron asimetría para eliminar ésta (Webster y Oliver, 2007). Para Spearman, menos sensible a valores extremos, se consideraron todos los datos (60) en todas las variables.

Tabla 3.2. Resultado de las correlaciones lineales (Pearson) entre las variables medidas en el área de estudio.

	Altura	DAP	Da (Mg m ⁻³)	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Ca:Mg	(Ca+Mg)/K	
DAP	0.51	1.00																				
Da (Mg m ⁻³)	0.10	0.13	1.00																			
A	-0.05	-0.12	0.45	1.00																		
L	0.07	0.16	-0.31	-0.77	1.00																	
Ar	0.04	0.09	-0.45	-0.96	0.57	1.00																
pH	-0.31	-0.15	0.29	0.50	-0.24	-0.54	1.00															
MO	0.11	0.34	-0.32	-0.74	0.61	0.70	-0.35	1.00														
Ca	-0.26	-0.17	-0.08	0.00	0.06	-0.02	0.39	-0.07	1.00													
Mg	-0.02	-0.07	-0.47	-0.43	0.31	0.42	-0.15	-0.01	0.29	1.00												
K	0.21	0.30	-0.35	-0.73	0.46	0.74	-0.42	0.51	0.04	0.50	1.00											
CICE	-0.18	-0.15	-0.33	-0.26	0.23	0.24	0.17	-0.03	0.83	0.77	0.34	1.00										
P	0.07	-0.07	0.32	0.49	-0.52	-0.42	0.14	-0.19	-0.06	-0.51	-0.39	-0.34	1.00									
S	-0.09	0.16	-0.31	-0.30	0.21	0.30	-0.09	0.36	0.04	0.15	0.36	0.12	-0.24	1.00								
Fe	0.28	0.41	-0.27	-0.64	0.42	0.64	-0.68	0.76	-0.39	-0.02	0.62	-0.25	-0.21	0.33	1.00							
Mn	-0.06	-0.08	-0.04	-0.28	0.16	0.29	-0.29	0.34	-0.33	-0.21	0.00	-0.34	0.07	0.02	0.35	1.00						
Cu	0.13	0.25	-0.36	-0.73	0.50	0.74	-0.45	0.73	-0.11	0.13	0.60	0.02	-0.40	0.42	0.69	0.37	1.00					
Zn	0.03	0.19	-0.22	-0.43	0.25	0.45	-0.31	0.52	0.03	0.09	0.59	0.09	0.02	0.24	0.55	0.12	0.33	1.00				
B	-0.20	-0.21	-0.02	-0.20	0.29	0.14	0.10	0.19	0.26	-0.01	-0.06	0.17	0.01	0.07	0.02	0.27	0.05	0.03	1.00			
Ca:Mg	-0.09	-0.06	0.47	0.48	-0.30	-0.49	0.34	-0.13	0.25	-0.82	-0.53	-0.31	0.50	-0.16	-0.28	0.00	-0.26	-0.09	0.11	1.00		
(Ca+Mg)/K	-0.20	-0.29	0.32	0.77	-0.54	-0.77	0.47	-0.64	0.24	-0.35	-0.86	-0.06	0.42	-0.32	-0.68	-0.20	-0.71	-0.48	0.04	0.52	1.00	
CO ₂	0.15	-0.04	0.05	-0.07	-0.01	0.09	-0.09	0.09	0.11	-0.03	0.01	0.05	0.24	-0.12	0.08	0.24	0.11	0.04	0.12	0.03	0.06	1.00

En negrilla correlaciones significativas estadísticamente

Tabla 3.3. Resultado de las correlaciones no lineales (Spearman) entre las variables medidas en el área de estudio.

	Altura	DAP	Da (Mg m ⁻³)	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Ca:Mg	(Ca+Mg)/K	
DAP	0.53	1.00																				
Da (Mg m ⁻³)	0.05	0.04	1.00																			
A	-0.04	-0.17	0.46	1.00																		
L	0.03	0.22	-0.34	-0.75	1.00																	
Ar	0.01	0.13	-0.44	-0.96	0.56	1.00																
pH	-0.32	-0.26	0.29	0.50	-0.25	-0.52	1.00															
MO	0.11	0.43	-0.29	-0.67	0.55	0.64	-0.34	1.00														
Ca	-0.28	-0.16	-0.09	0.04	-0.02	-0.05	0.40	-0.01	1.00													
Mg	-0.04	-0.04	-0.52	-0.50	0.34	0.46	-0.16	0.06	0.23	1.00												
K	0.13	0.30	-0.41	-0.79	0.55	0.77	-0.40	0.51	0.03	0.64	1.00											
CICE	-0.15	-0.13	-0.37	-0.27	0.24	0.23	0.13	-0.06	0.71	0.79	0.44	1.00										
P	0.04	-0.07	0.33	0.46	-0.53	-0.37	0.18	-0.13	0.00	-0.55	-0.45	-0.38	1.00									
S	-0.09	0.24	-0.28	-0.33	0.28	0.34	-0.18	0.41	0.02	0.20	0.38	0.12	-0.20	1.00								
Fe	0.27	0.48	-0.26	-0.58	0.36	0.60	-0.70	0.74	-0.38	0.00	0.49	-0.29	-0.17	0.35	1.00							
Mn	-0.03	-0.01	-0.06	-0.22	0.14	0.24	-0.26	0.37	-0.30	-0.23	0.03	-0.37	0.08	0.09	0.44	1.00						
Cu	0.14	0.38	-0.35	-0.68	0.45	0.69	-0.45	0.69	-0.10	0.18	0.62	0.00	-0.35	0.45	0.70	0.41	1.00					
Zn	0.01	0.25	-0.22	-0.50	0.28	0.53	-0.30	0.52	0.01	0.15	0.55	0.05	-0.03	0.28	0.49	0.11	0.35	1.00				
B	-0.21	-0.15	-0.03	-0.15	0.20	0.11	0.22	0.26	0.32	0.06	0.02	0.16	0.01	0.04	-0.01	0.25	-0.01	0.10	1.00			
Ca:Mg	-0.11	-0.04	0.48	0.53	-0.33	-0.52	0.40	-0.14	0.30	-0.84	-0.62	-0.37	0.55	-0.17	-0.28	0.02	-0.27	-0.19	0.07	1.00		
(Ca+Mg)/K	-0.18	-0.38	0.33	0.75	-0.49	-0.75	0.52	-0.56	0.23	-0.40	-0.93	-0.12	0.38	-0.38	-0.64	-0.20	-0.69	-0.57	0.07	0.54	1.00	
CO ₂	0.18	0.05	0.03	-0.09	0.01	0.11	-0.11	0.12	-0.02	-0.03	-0.05	-0.11	0.16	-0.09	0.17	0.26	0.13	-0.01	0.12	-0.01	0.05	

En negrilla correlaciones significativas estadísticamente

Las Tablas 3.2 y 3.3 muestran una cantidad alta de correlaciones significativas entre los componentes sólidos minerales del suelo y los contenidos de nutrientes del mismo, ratificando la importancia del material parental sobre las propiedades nutricionales del suelo. También es notable la correlación que hay entre el contenido de materia orgánica y los elementos menores en el suelo. Llama la atención la ausencia de correlaciones significativas entre la producción de CO₂ con todas las propiedades evaluadas, lo que puede estar indicando una baja actividad microbiológica en el suelo, asociada al bajo contenido de materia orgánica en el mismo (Jaramillo, 2014).

En general, la mayoría de relaciones entre parámetros biofísicos y propiedades edáficas son no lineales. Se presentó correlación inversa, lineal y no lineal, entre el pH y la altura de los árboles, y no lineal con el DAP, probablemente debido a que el incremento en el pH se relaciona positivamente con el contenido de Ca, pero inversamente con los de Mg y K (Tablas 3.2 y 3.3), desbalanceándose la relación que debe haber entre estas bases del suelo, afectando la nutrición de la teca. Este desbalance también explicaría la relación negativa que se presenta entre la altura y el DAP con el Ca y el Mg. Además, según Nwoboshi (1984) y Pramod (2009), los requerimientos de nutrientes aumentan con la edad de la planta, y el K es un elemento secundario de alta demanda en este cultivo, pero en este suelo disminuye al incrementarse el pH.

La relación positiva entre el DAP y la MO muestra la importancia que tiene este componente del suelo en la nutrición de la teca. En las Tablas 3.2 y 3.3 se observan correlaciones significativas y positivas entre la materia orgánica y el K, el S, y todos los elementos menores confirmándose, como ya se dijo, la importancia de la MO en la nutrición vegetal.

Es notable la ausencia de correlaciones significativas entre las variables biométricas y los contenidos de la mayoría de nutrientes en el suelo, probablemente debido a que en éste se presentan niveles apropiados para el desarrollo de la planta o que hay otros factores externos al suelo que tienen mayor control sobre el crecimiento de la misma (clima, genética, manejo anterior a la plantación, adecuación de la tierra para establecer la plantación etc.) que no fueron evaluados en este trabajo. Cabe resaltar la correlación significativa que se presentó entre altura y DAP con contenido de Fe, relación ya observada en otros trabajos (Mollinedo et al., 2005).

Aunque no se han establecido valores críticos para las relaciones Ca:Mg y (Ca+Mg)/K en Teca, los valores obtenidos para ellas en este trabajo son bastantes altos con respecto a los niveles generales que se manejan en fertilidad de suelos para ellas (ICA, 1992). Este comportamiento está mostrando un desbalance importante entre las bases del suelo que podría estar incidiendo en la falta de correlación de las propiedades biométricas con los contenidos de bases en el suelo.

Conclusiones

Los análisis realizados en este capítulo permiten concluir que:

- Se está trabajando con un suelo de fertilidad media adecuada a los requerimientos del cultivo de Teca, aunque hay un aparente desbalance entre las bases del mismo.
- La mayoría de propiedades evaluadas tiene un comportamiento estadístico asimétrico ocasionado, fundamentalmente, por la presencia de valores anómalos y extremos.
- Las variables biométricas no se correlacionan significativamente con los contenidos de nutrientes del suelo, probablemente por estar éstos en niveles adecuados a las demandas del cultivo.

Bibliografía

- Alvarado, A. (2006). Nutrición y fertilización de la Teca. *Informaciones agronómicas*. 61,
- Bebarta, K.C. (1999). *Teak, ecology, silviculture, management and profitability*. International Book Distributors. Dehra Dun, India. 380 p.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. (2002). *The nature and properties of soils*, 13th edition, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Camino, Ronnie de y Morales Jean Pierre (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y Realidades*.
- Duffy, B. (2007). Zinc and plant disease. In: *Mineral nutrition and plant disease*, L. E. Datnoff, W. H. Elmer, and D. M. Huber, Eds., 155–175. St. Paul, MN: The American Phytopathological Society.
- Espinosa, J. (2000, April). a. Manejo de nutrientes en Agricultura por sitio específico en cultivos tropicales. In *11th Fertilizer Latin America International Conference. Cancún, México. Memorias* (pp. 13-22).
- Epstein, E. and A. J. Bloom. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*, 2nd edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar, and C. A. Jones. (1997). *Growth and mineral nutrition of field crops*, 2nd edition. New York: Marcel Dekker.
- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. (2005). Nutrient availability. In: *Encyclopedia of soils in the environment*, D. Hillel, Ed., 63–71. San Diego, CA: Elsevier.
- Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press, Boca Ratón, FL.
- Fageria, N. K. and M. P. Barbosa Filho. (2006). *Identification and correction nutrient deficiencies in rice*. Embrapa Arroz e Feijão Circular number 75, 7p, Santo Antonio de Goias, Brazil

- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. (2005). Nutrient availability. In: *Encyclopedia of soils in the environment*, D. Hillel, Ed., 63–71. San Diego, California: Elsevier.
- Fageria, N. K. and L. F. Stone. (2006). Physical, chemical and biological changes in rhizosphere and nutrient availability. *Journal Plant Nutrition*, 29, 1327–1356.
- ICA. (1992). Fertilización en diferentes cultivos. Quinta aproximación. *Manual de asistencia técnica*, (25). 64 p.
- Jaramillo, D.F. (2014). *El Suelo: origen, propiedades, espacialidad*. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia (Ed.), Medellín. 555 p.
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd edition. New York: Academic Press.
- Martinez, L. (2003). Bases para evaluar la fertilidad del suelo en Agricultura de Precisión. En M. Triana, R. Silva, M. Gómez y G. Peñalosa (Eds), *Manejo integral de la fertilidad del suelo* (pp. 139-152). Bogotá, Sociedad colombiana de la ciencia del suelo – Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá.
- Mengel, K., E. A. Kirkby, H. Kosegarten, & T. Appel. (2001). *Principles of plant nutrition*, 5th edition. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Mollinedo M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J.M. y Rudy, L.C. (2005). Relación suelo – árbol y factores de sitio en plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *EN: Agronomía Costarricense*, 29 (1): 67-75.
- Nwoboshi, L.C. (1984). Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. *Forest Scienc*, 30, 35-40.
- Ombina, C. (2008). *Soil characterization for Teak (*Tectona grandis*) plantations in Nzara District of South Sudan*. Thesis Master of Forest Science. Stellenbosh Univerity. Department of Forestry, South Africa.
- De Oliveira, J.R. (2003). *Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem e adubação de povoamentos de teca-Nutriteca* (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Viçosa).
- Osorio, N.W., Ruiz, O. (s.f). Guía para el muestreo. Laboratorio de Suelos, Universidad Nacional de Colombia. Revisado el 20 de septiembre de 2011 desde Internet. <http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/laboratorio/guia%20para%20el%20muestreo.pdf>.

- Osorio, N.W. (2003). *Diagnóstico Químico de la Fertilidad del Suelo*. EN: Curso teórico práctico sobre interpretación de análisis de suelos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. P 51-67.
- Petersen, R.G., Calvin, L.D. (1986). *Sampling; Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. EN: Agronomy N° 9. Madison. WI. P 33 – 52.
- Pramod, K. S. (2009). *Nutrient dynamics of Teak plantations and their impact on soil productivity - A case study from India*. Ponencia presentada en el XIII World Forestry Congress, Buenos Aires, Argentina.
- Roberts, T.L., Henry, J.L. (2000). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agronómicas*, 42, 4-7. 1-8 tropicales. *Informaciones agronómicas*, 39, 9-13
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. Guía Práctica. *Cenicafe Boletín Técnico*, N° 32.
- Webster, R. and Oliver, M. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Second Ed. John Wiley and Sons, Ltd. England. 315 p
- Zech, W., Drechsel, P. (1991). Relationships between growth, mineral nutrition and factors of teak (*Tectona grandis*) plantation in the rainforest zone of Liberia. *Ecology Management*, 41, 221-235.
- Zech, W., Drechsel, P. (1992). Multiple mineral deficiencies in forest plantations in Liberia. *Forest ecology and management*, 48(1), 121-143.

Capítulo 4. Indicadores de Calidad de Suelo

Introducción

El significado esencial de la calidad del suelo está referido a la capacidad que tiene este para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas naturales o intervenidos. Sin embargo, la calidad del suelo es un concepto funcional complejo que está lejos de ser una medida objetiva. Su evaluación es un reto porque no hay normas establecidas, las percepciones de lo que constituye un buen suelo varían y dependen de las prioridades individuales con respecto a la función del suelo, uso previsto, interés de los observadores y porque, además, los suelos varían espacial y temporalmente y son fácilmente afectados por la gestión de la que han sido objeto (Doran & Parkin, 1994; Karlen et al., 1994; Karlen et al., 1997; Karlen et al., 2008; Arshad & Martin, 2002; Stocking, 2003; Bastida et al., 2008).

Aunque la calidad del suelo no se puede medir directamente, sí puede ser evaluada mediante la observación de los cambios inducidos en los atributos del suelo que se desean estudiar (Karlen et al., 1994; Carter, 2002; Sánchez, et al., 2002; Stocking, 2003; Dexter, 2004). Diversos estudios han analizado la calidad del suelo utilizando múltiples indicadores, pero sólo unos pocos han utilizado los resultados obtenidos para establecer un índice de calidad del suelo (Ochoa et al., 2007; Bastida et al., 2008). Tradicionalmente los trabajos realizados en calidad de los suelos se han focalizado en sus características físicas y químicas aunque recientemente las características biológicas también han sido reconocidas como indicadores de calidad y salud de los suelos (Doran & Parkin, 1994; Ruzek et al., 2004; Gil et al., 2005; Bhardwaj et al., 2011; Rongjiang et al., 2013).

El interés creciente en evaluar la calidad del recurso suelo, obedece al reconocimiento de que el suelo es un componente fundamental de la biosfera que cumple funciones en la producción de alimentos, fibras y energía, así como también en el mantenimiento de la calidad ambiental (Glanz, 1995; Abellan & García, 2006; Ferreras et al., 2010). De la diversidad de parámetros edáficos de índole química, física y biológica propuestos para ser considerados como indicadores de calidad, se destacan: la estabilidad de agregados, pH, conductividad eléctrica, parámetros nutricionales, carbono de biomasa microbiana, respiración microbiana y actividad enzimática como los más utilizados (Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1994; Doran & Parkin, 1996; Karlen et al., 2001; Astier et al., 2002;

Moffat, 2003; Vergara, 2003; Marinari et al., 2006; Ochoa et al., 2007; Ramos & Zúñiga, 2008; Ferreras et al., 2009).

Para evaluar la calidad del suelo se han planteado dos enfoques: la evaluación comparativa y la evaluación dinámica en las propiedades de los suelos; estos estudios se llevan a cabo a partir de diferentes tipos de muestreo en campo. En una evaluación comparativa, como la que se plantea en el presente estudio, los análisis estadísticos multivariados han sido empleados con éxito en la identificación y selección de indicadores de calidad del suelo con los que se llega a un Conjunto Mínimo de Datos (CMD) para su evaluación (Shukla et al., 2006; Chen et al., 2013; Rongjiang et al., 2013). En esta investigación se emplearon análisis de regresión lineal, de componentes principales y de factor, para definir el CMD.

En Teca, como en otros sistemas productivos forestales, el concepto de calidad empleado para definir el potencial productivo de un determinado lugar, ha estado vinculado directamente con los parámetros de crecimiento de la plantación, a los que se les asocian consideraciones sobre factores edáficos, fisiográficos y climáticos. Con la información obtenida de las mediciones se desarrollan modelos de Índices de Sitio y productividad que establecen la calidad del sitio forestal y que definen, de manera indirecta, como es la capacidad productiva de los suelos (Vásquez & Ugalde, 1994; Vallejos, 1996; Scolforo, 1997).

Este capítulo tiene como objetivos proporcionar una visión general acerca de los indicadores de suelos empleados para evaluar su calidad, salud y expectativas productivas y determinar las variables edáficas relacionadas con la productividad en Teca que se puedan considerar como indicadores de calidad del suelo para esta planta en la zona donde se adelantó la investigación.

Resumen

Para evaluar las posibilidades que tiene el suelo de desempeñarse en sus funciones, incluyendo la de la producción vegetal, se ha propuesto el uso de índices de calidad que se calculan con base en indicadores seleccionados de amplios grupos de propiedades edafológicas medidas. Un aspecto crítico de esta evaluación consiste en seleccionar un grupo mínimo de indicadores adecuados para calcular los índices que sea capaz de reflejar las posibilidades del suelo para cumplir la función asignada.

Los indicadores de calidad del suelo son propiedades de tipo físico, químico y biológico, que pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso del suelo, así como del cultivo objeto de producción. En los sistemas forestales, las características del sitio no son las únicas que definen la productividad de una plantación forestal, influyen en ella otros factores que van desde la procedencia de la semilla hasta labores culturales ejecutadas a tiempo.

En este trabajo se trató de establecer índices de calidad del suelo para la producción vegetal en un sector de San Onofre, departamento de Sucre, con base en tres diferentes grupos mínimos de datos (GMD) seleccionados con ayuda de métodos estadísticos multivariados: correlación lineal múltiple, análisis de componentes principales (ACP) y análisis factorial (AF).

El procedimiento general utilizado para establecer los índices se basó en una metodología propuesta por Andrews et al. (2002) que consiste en seleccionar los GMD con los análisis estadísticos mencionados. A las propiedades seleccionadas en cada análisis se les hace un análisis de redundancia, con base en correlaciones lineales entre ellas, dejando como indicadores en el GMD aquellas variables que no fueron redundantes y, de entre las redundantes, se selecciona aquella que tenga mayor coeficiente de correlación acumulado para representarlas a todas. Una vez seleccionadas las variables del GMD se procede a calificar los indicadores para eliminar unidades y poderlos combinar en las relaciones aditivas que serán los índices de calidad del suelo (ICS).

El mayor índice (ICS4) en este trabajo se obtuvo cuando se tomaron como indicadores todas las propiedades del suelo que fueron evaluadas (16 en total). No se encontraron correlaciones significativas entre los índices y las variables biométricas respuesta de

producción de teca Altura de la planta y DAP. Mediante análisis de regresión simple se encontraron modelos significativos entre todos los índices con el ICS4, siendo el mejor el ICS1 con un R^2 mayor a 70 %, con la ventaja de que este índice se calculó con un GMD de apenas 4 indicadores obtenidos mediante análisis de regresión múltiple, haciendo el proceso muy eficiente y de bajo costo.

4.1 Indicadores de Calidad del Suelo

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible, y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información de interés (Cantu et al., 2007). La evaluación de la calidad del suelo mediante el empleo de indicadores permite entender cómo evolucionan sus capacidades y propiedades, bajo determinados sistemas de manejo, particularmente para una agricultura sustentable (Astier et al., 2002). Para evaluar el estado del suelo es necesario conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan, entre otras, su productividad (Hünнемeyer et al., 1997; Dalurzo et al., 2002; Zúñiga et al., 2006).

El conocimiento de las propiedades permite desarrollar mejor actividades agrícolas como el laboreo, la fertilización, el drenaje, la irrigación, la conservación de suelo y del agua, así como el manejo de residuos y de cosechas (Sampat, 1991). Los criterios para seleccionar los indicadores de calidad serán diferentes para los diversos usos del suelo y son dinámicos en el tiempo (Warkentin, 1995; Noble et al., 2000; Astier, C.M., 2002), de allí que resulte necesario identificar y cuantificar las variables particulares de cada ambiente, a fin de documentar los cambios que suceden en el corto y largo plazo, como consecuencia de las prácticas de manejo que se aplican (Gregorich et al., 1997). Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas sean consideradas indicadores de calidad deben cumplir las siguientes condiciones (Doran & Parkin, 1994; Astier et al., 2002; Hünнемeyer et al., 1997):

- Describir los procesos del ecosistema.
- Reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir.
- Ser sensibles a variaciones de clima y manejo.
- Ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo.
- Ser reproducibles.
- Ser fáciles de entender.
- Cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente.

No existe un único parámetro que pueda cuantificar la calidad del suelo, pero existen determinadas propiedades que se consideran buenos indicadores (Diack & Scott, 2001).

4.1.1 Indicadores Físicos

Los indicadores físicos (Tabla 4.1) que se han empleado en las evaluaciones de la calidad del suelo, están relacionados, por un lado, con propiedades que reflejen cómo el suelo acepta, retiene y proporciona agua a las plantas y, por otro lado, a las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración, el movimiento del agua dentro del perfil y el intercambio óptimo de gases (Acevedo & Martínez, 2003; Bautista et al., 2004; Etchevers et al., 2009).

La calidad física de los suelos se refiere, fundamentalmente, a propiedades como la resistencia mecánica, la transmisión y el almacenaje de fluidos en la zona de exploración de las raíces (Topp et al., 1997). Esta calidad no se puede medir directamente, pero se infiere con indicadores de calidad del suelo estáticos o dinámicos, a través de la medición de atributos de los mismos que se influyen por el uso y por las prácticas de manejo (Carter, 2002; Sánchez et al., 2002; Dexter, 2004).

Tabla 4.1. Propiedades físicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (Adaptado de Alonso et al., 2004).

Indicador Físico	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Textura	Se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas en la tierra fina de un suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla (Müller & Hoper, 2004; Sampat, 1991).
Estructura	La estructura del suelo es el arreglo y organización de las partículas en el suelo. Está fuertemente afectada por cambios en el clima, la actividad biológica y las prácticas de manejo. La estructura afecta la retención y transmisión de agua y aire en el suelo, así como las propiedades mecánicas del mismo (Saña et al., 1996; USDA, 1999).
Densidad aparente	La densidad aparente es definida como la relación entre la masa del suelo secado en horno y el volumen de las partículas y del espacio poroso entre ellas. Es dependiente de las densidades de las partículas del suelo (arena, limo, arcilla y materia orgánica) y de su tipo de empaquetamiento. La densidad aparente es una propiedad dinámica que varía con la condición estructural del suelo. Esta condición puede ser alterada por cultivos, pisoteo de animales, maquinaria agrícola y clima (Arshad et al., 1996).
Porosidad	Representa el porcentaje total de espacios que hay entre el material sólido de un suelo. Es un parámetro importante porque de él depende el comportamiento del suelo frente a las fases líquida y gaseosa, y por tanto vital para la actividad biológica que pueda soportar (Edafología, 2006).
Infiltración	Infiltración es el proceso de penetración del agua en el suelo. La velocidad a la cual el agua entra en el suelo es la velocidad de infiltración, la que depende del tipo de suelo, de la estructura o grado de agregación, y del contenido de agua en el suelo (Lewery et al., 1996).
Capacidad de retención de agua	Cantidad máxima de agua que el suelo puede retener. Representa el almacenaje de agua del suelo. Se produce después de las precipitaciones atmosféricas cuando el agua gravitacional abandona el suelo; no obstante, durante ese período se producen pérdidas por evaporación, absorción de las plantas, etc. Según el tamaño y la forma de los poros, el suelo tendrá mayor o menor capacidad de retención de agua (Cortés, 2007).

Tabla 4.1. (Continuación).

Indicador físico	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Humedad	Es una forma de indicar la cantidad de agua presente en el perfil del suelo a una determinada profundidad, estrato u horizonte y en un momento determinado (Torrán, 2007).
Temperatura del suelo	La temperatura tiene un efecto directo sobre el crecimiento de las plantas, así como en procesos bióticos y químicos. (Henríquez & Cabalceta 1999; Porta et al. 2003). La temperatura varía de acuerdo con la profundidad del suelo, siendo mayor su variación en los primeros 15 cm y disminuyendo conforme aumenta la profundidad.
Profundidad efectiva del suelo	Es la profundidad hasta la cual pueden penetrar las raíces sin encontrar impedimentos. De ella depende el volumen del suelo que la planta puede explorar para su nutrición, abastecimiento de agua y de oxígeno, y para desarrollar su sistema radicular.
Pendiente	La pendiente o gradiente, es la inclinación que presenta la superficie del terreno con respecto a un plano imaginario horizontal. Generalmente se expresa en porcentaje (Jaramillo, 2014).

4.1.2 Indicadores Químicos

Los indicadores químicos propuestos en la Tabla 4.2 se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo - planta, calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y los micro-organismos (SQI, 1996; Bautista et al., 2004; Astier et al., 2002; Hünneimyer et al., 1997). Alonso et al., (2004) propusieron como indicadores, el contenido de materia orgánica (MO), el pH, la conductividad eléctrica (CE), el carbono orgánico total y los contenidos disponibles de N, P y K. Los indicadores que reflejan estándares de fertilidad son factores importantes en términos de producción de cultivos.

Tabla 4.2. Propiedades químicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (Datos adaptados de Alonso et al., 2004).

Indicador Químico	Relación con las funciones y condiciones del suelo
pH	El pH del suelo es una medida de su acidez o alcalinidad y afecta la disponibilidad de los nutrientes y la actividad de micro-organismos (FAO, 2000). Los factores importantes que afectan el pH edáfico son la temperatura y precipitación, que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo (USDA, 1999).
Conductividad eléctrica (CE)	La CE indica la cantidad de sales presentes en el suelo (NOM-021-RECNAT, 2000). Todos los suelos contienen algo de sales, las cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas. Cuanto mayor es la cantidad de sales tanto mayor es la lectura de la conductividad eléctrica. Los iones generalmente asociados con salinidad son Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , H^+ (cationes) y NO_3^- , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , OH^- (aniones) (USDA, 1999).
Carbono orgánico total	La reserva de C de un suelo es el resultado del balance entre las entradas y las pérdidas de materia orgánica en él y depende, sobre todo, de dos grupos de factores: las condiciones climáticas y las propiedades del suelo (Romanyà et al., 2003).
Materia Orgánica	En general está constituida por residuos en descomposición y sus subproductos, micro-organismos y material húmico resistente del suelo. La materia orgánica contribuye a la capacidad de intercambio de cationes y aniones del suelo, así como a la retención, la liberación y la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, mejora la infiltración de agua y su retención. Además, absorbe la radiación solar, la cual influye en la temperatura del suelo (Álvarez & Biancucci, 2006).
N, P y K disponibles	El Nitrógeno (N), el Fósforo (P) y el Potasio (K) son nutrientes que las plantas absorben en cantidades importantes desde el suelo. Estos tres elementos necesitan ser adicionados o devueltos al suelo para mantener una fertilidad eficiente (Manahan, 2006; Moody & Bolland, 1999; Gourley et al., 1999).

4.1.3 Indicadores Biológicos

Los indicadores biológicos (Tabla 4.3) integran los diferentes factores que afectan la calidad del suelo. Generalmente se refieren a la abundancia y subproductos de los organismos, incluidas bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos (Bautista et al., 2004). También se considera como indicador biológico el rendimiento de los cultivos (Chen, 2000).

Tabla 4.3. Propiedades biológicas que se han utilizado como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo (Datos tomados y adaptados de Alonso et al., 2004).

Indicador biológico	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Población de lombrices	Las poblaciones de lombrices pueden variar con las características del sitio (disponibilidad de nutrientes y condiciones del suelo), con la estación y con las especies involucradas. Sin embargo no todas las áreas o suelos mantienen o poseen lombrices, ya sea porque no fueron introducidas o porque las condiciones ambientales no son favorables. Las lombrices por lo general aumentan la actividad microbiana y la fertilidad química del suelo, y mejoran características físicas del suelo como agregación y porosidad (USDA, 1999).
Carbono de la biomasa microbiana	El Carbono de la Biomasa Microbiana refleja el tamaño de la población microbiana total del suelo. Este índice ha sido frecuentemente estudiado porque responde de forma muy rápida y sensible a los cambios que se producen en el suelo. Está influenciado por diversos factores como humedad, temperatura, luz, contenido en materia orgánica y tratamiento agrícola (Chocano, 2008).
Respiración del suelo	La respiración es la producción de dióxido de carbono (CO ₂) como resultado de la actividad biológica en el suelo, realizada por microorganismos, raíces vivas y macro-organismos como lombrices, nematodos o insectos (Parkin, T.B., Doran, J.W., & Franco, E., 1996).
Actividades enzimáticas, ATP	Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos. Actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos (Ceron & Melgarejo, 2005). La actividad de las enzimas del tipo oxidoreductasas, como la deshidrogenasa y la catalasa, están consideradas como una medida generalizada de los procesos microbianos del suelo. El ATP (adenosin trifosfato) está presente en todas las células vivas, degradándose inmediatamente si éstas mueren; este hecho justifica su empleo como estimador de la biomasa microbiana (García & Hernández, 2003).

Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso del suelo (Arshad & Coen, 1992). La Tabla 4.4 muestra indicadores de calidad de suelos que se han establecido para algunos cultivos en diferentes tipos de suelos.

Tabla 4.4. Indicadores de calidad del suelo que se han utilizado en diferentes agroecosistemas.

Cultivo	Suelo	País	Autor	Indicadores de calidad del suelo
Arroz y trigo	Vertisol	India	Mohanty et al., (2007)	Densidad aparente, estabilidad de agregados, resistencia a la penetración, contenido de materia orgánica
Banano	-----	Costa Rica	Delgado et al., (2010)	pH, población total de bacterias, retención de fósforo
Banano	-----	República Dominicana	Delgado et al., (2010)	Respiración microbiana total
Banano	-----	Venezuela	Delgado et al., (2010)	Contenido de Cu disponible
Banano orgánico	-----	República Dominicana	Delgado et al., (2010)	Contenido de Ca intercambiable, contenido de arena
Café	-----	Costa Rica	Altieri & Nicholls, (2002)	Estructura, textura, compactación, infiltración, profundidad del suelo, cantidad de materia orgánica, retención de humedad, desarrollo de raíces, cobertura del suelo, actividad biológica
Caña de azúcar	Vertisol	México	Armida et al., (2005)	C-biomasa microbiana, contenido de carbono orgánico soluble, contenido de materia orgánica
<i>Centrosema brasilianum</i> , <i>C. macrocarpum</i> , <i>C. molle</i> , <i>C. pascuorum</i> , <i>C. rotundifolium</i>	Typic Haplustox	Venezuela	Navas et al., (2011)	Nitrógeno total, pH, contenido de calcio intercambiable, respiración del suelo y arilsulfatasa, actividad de β -glucosidasa
<i>Cordia alliodora</i> Ruiz & Pavon	-----	Colombia	Giraldo et al., (1980)	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y pH

Tabla 4.4. (Continuación).

Cultivo	Suelo	País	Autor	Indicadores de calidad del suelo
<i>Eucalyptus deglupta</i> y <i>E. grandis</i>	-----	Costa Rica	Sánchez, (1994)	Contenido de magnesio y de calcio intercambiables, y de P disponible
<i>Cupressus chengiana</i>	Orthic Acrisols	China	Pang et al., (2006)	Densidad aparente, capacidad de retención de agua, porosidad, contenido de materia orgánica, contenido de N total, contenido de P y K disponibles, contenido de álcali hidrolizable, conductividad eléctrica
Maíz	Typic Hapludalfs limoso fino, mixto, méxico	EE UU	Karlen et al., (1994)	Estabilidad de agregados, porosidad, macrofauna, biomasa microbiana, respiración, ergosterol, C total, N total, densidad aparente, agua disponible, pH, conductividad eléctrica
Maíz y Arroz	Typic Ustochrept	India	Kang et al., (2005)	Contenido de C orgánico, contenido de N total, contenido de potasio intercambiable, contenido de nitratos y amonio, biomasa microbiana, contenido de N mineralizable, carga bacteriana, porcentaje de infección micorrizal, actividad deshidrogenasa
Manzana	Cambisol háplico	EE UU	Glover et al., (2000)	Estabilidad de agregados, porosidad, gusanos, contenido de C orgánico, biomasa microbiana, capacidad de intercambio catiónico, pH, contenido de N total

Tabla 4.4 (Continuación).

Cultivo	Suelo	País	Autor	Indicadores de calidad del suelo
Mijo perla (<i>Pennisetum glaucum</i>), Trigo (<i>Triticum aestivum</i>), Frijol (<i>Vigna unguiculata</i>)	Inceptisol	Nueva Delhi	Masto et al., (2007)	La densidad aparente, retención de agua, pH, conductividad eléctrica, nutrientes disponibles, contenido de materia orgánica, biomasa microbiana.
Mora, pasto y aguacate	Andisol	Colombia	Rendón, et al., (2011)	Macro-invertebrados (lombrices, termitas y hormigas)
Papa	Typic Melanudands	Colombia	Muñoz et al., (2006)	pH, bases intercambiables, saturación de aluminio
<i>Pinus radiata</i>	Ustorthent, Ustochrept y Dystrochrept	España	Afif et al., (2007)	Contenido de Potasio intercambiable
<i>Pinus radiata</i>	-----	España	Sánchez, F et al., (2002)	pH, profundidad efectiva del suelo
Tabaco	-----	Argentina	González et al., (2002)	Densidad aparente, resistencia a la penetración, micro-porosidad, disminución de estabilidad de agregados, porosidad total, macro-porosidad, humedad equivalente, infiltración
Tomate y algodón	-----	EE UU	Andrews et al., (2002)	Contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, pH, estabilidad de agregados, densidad real, contenido de Zn disponible.
Yerba mate	-----	Argentina	Dalurzo, (2002)	Macro-porosidad, infiltración básica, resistencia a la penetración, estabilidad de agregados.
<i>Pinus taeda</i>	-----	EE UU	Burguer & Kelting, (1999)	Densidad aparente, profundidad del nivel freático, mineralización de N, porosidad, profundidad efectiva, actividad biológica
Remolacha azucarera	-----	Polonia	Koper & Piotrowska, (2003)	Contenido de C orgánico, contenido de N total, actividad de la deshidrogenasa, la fosfatasa, la proteasa y la amilasa.

En los sistemas forestales, las características del sitio no son las únicas que definen la productividad de una plantación forestal, también influyen otros factores como la procedencia de la semilla, preparación del suelo antes del establecimiento de la plantación, labores culturales de control de competencia de la plantación, aplicación de fertilizantes, labores silviculturales ejecutadas en el momento oportuno, entre otros (Vaides, 2004).

Debido al gran interés que ha despertado el cultivo de la Teca se hace indispensable disponer de un conjunto de indicadores fiables y relevantes que permitan evaluar la calidad y salud del suelo, de forma tal que puedan ser considerados antes y durante el desarrollo de la plantación (Garbisu et al., 2007).

El éxito de la producción sostenible de madera radica, principalmente, en un eficiente reciclado de nutrientes, lo que viene determinado, en buena parte, por las características de la materia orgánica y su dinámica de mineralización, el pH, la textura y la profundidad efectiva del suelo (González et al., 1996; Morris et al., 1997; Sánchez et al., 1998).

Chávez y Fonseca (1991), citando a otros autores, reportan como factores limitantes para el crecimiento de la Teca los suelos poco profundos, el mal drenaje, la compactación, la textura arcillosa y los sitios bajos con alta precipitación o sin un período seco marcado de tres a cinco meses. En cuanto a las condiciones químicas del suelo señalan que el bajo contenido de calcio y magnesio limitan el buen desarrollo de la especie. Los indicadores relacionados con la acidez son el pH menor a 5.5, la acidez intercambiable mayor de 0.5 cmol_c/kg, la suma de bases menor de 5 cmol_c/kg y la saturación de acidez intercambiable mayor de 10% (Bertsh, 1995).

4.1.4 Selección de los indicadores de calidad del suelo

La evaluación de la calidad de los suelos es complicada debido a la cantidad de factores físicos, químicos y biológicos que controlan procesos biogeoquímicos que varían en tiempo, espacio e intensidad. Sin embargo establecer la calidad de los suelos a partir de indicadores se hace necesario para identificar problemas de producción y monitorear cambios en la sostenibilidad y calidad ambiental. De allí que indicadores cuantitativos sean utilizados para evaluar el estado de la productividad del suelo (Doran & Parkin, 1994; Yemefack et al., 2006).

De entre todas las propiedades del suelo hay que seleccionar un grupo que represente adecuadamente las posibilidades productivas que tenga ese suelo; este conjunto de propiedades se ha llamado Grupo Mínimo de Datos (GMD) y allí están los indicadores que se utilizarán para definir el Índice de Calidad del Suelo (ICS).

Para seleccionar estos indicadores se han utilizado desde entrevistas con expertos hasta métodos estadísticos multivariados (Andrews et al., 2002). Los métodos estadísticos más utilizados para definir el GMD son el Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis

de Factor (AF), Regresión Múltiple (RM), Análisis de Correlación (AC) (Andrews et al., 2002; Karlen et al., 2003; Rezaei, et al., 2004; Govaerts et al., 2006; Rezaei, et al., 2005; Yemefack et al., 2006; Yanbing et al., 2009; Rongjiang et al., 2013; Chen et al., 2013).

4.2 Metodología

A partir de un muestreo sistemático se georreferenciaron en campo 60 plantas a las cuales se les tomaron muestras compuestas de suelos para posteriores análisis físicos, químicos y biológicos; al momento de tomar la muestra de suelo fue registrado el valor de la Altura y el DAP por planta. Los métodos para el registro de los datos biométricos, la toma de muestras de suelos, las variables medidas en las muestras como los métodos empleados para su determinación están detallados en el Capítulo 3 del presente trabajo.

4.2.1 Selección de Indicadores

▪ Selección del Grupo Mínimo de Datos (GMD)

Los indicadores de calidad del suelo se definieron como aquellas propiedades edáficas que se relacionaron con las variables biológicas evaluadas en plantas de teca, o que explicaron de una manera importante la variabilidad de los suelos. Como se mencionó en el aparte anterior, de entre todos los indicadores medidos se debe seleccionar un grupo de ellos lo bastante pequeño para que facilite, abarate y haga eficiente los análisis, recogiendo, al mismo tiempo, la variabilidad encerrada en los suelos que se trabajan. La selección de dicho grupo de indicadores GMD se llevó a cabo empleando tres técnicas estadísticas multivariadas de reducción de datos que se han utilizado ampliamente en otras situaciones (Andrews et al., 2002; Yemefack et al., 2006; Yanbing et al., 2009; Rongjiang et al., 2013; Chen et al., 2013): Análisis de Regresión Lineal Múltiple, Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Factor (AF). Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa Statgraphics Centurion XVI.

▪ Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Para este análisis se tuvieron en cuenta todos los indicadores medidos, a excepción de las variables A, CE, CICE, Zn, y las relaciones Ca:Mg y Ca+Mg/K, debido a su comportamiento estadístico o a que son combinaciones lineales de otras variables. Se llevaron a cabo dos regresiones lineales múltiples hacia atrás (Backward) en las que se tuvieron como variables dependientes la altura de las plantas, en una, y el DAP en la otra, y como variables independientes todas las variables medidas. Una vez obtenidas las regresiones se confirmaron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk), independencia e igualdad de varianza (Levene's) en sus residuales.

Las variables que fueron significativas en los modelos de regresión se sometieron a un análisis de redundancia estableciendo los coeficientes de correlación entre ellas: si se presentó un coeficiente de correlación > 0.6 entre dos variables, se consideró que eran redundantes y se eliminó una del grupo de indicadores (Yemefack et al., 2006). Para definir cuál variable de las redundantes se seleccionaba se construyó una matriz con los coeficientes de correlación entre las variables y para cada variable se hizo la sumatoria de todos los coeficientes que tenía; aquella que presentó la mayor sumatoria fue la seleccionada (Rezaei et al, 2004). Todas las variables que presentaron coeficientes de correlación menores a 0.6 se consideraron no redundantes y, por tanto, se incluyeron como indicadores en el grupo. Finalmente, las variables seleccionadas en este punto conformaron el primer grupo de indicadores (GMD1).

- **Análisis de Componentes Principales (ACP)**

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de información (variables) o reducción de la dimensión de un fenómeno perdiendo la menor cantidad de información posible, dando origen a varios conjuntos de nuevas variables que reciben el nombre de componentes principales (CP). Los CP son una combinación lineal de las variables originales, independientes entre sí y no correlacionados (Hair, J., Black, C., Babin, B., Anderson, R., & Tatham, R., 2006; Andrews, S., Karlen, D., Mitchell, J., 2002).

Para el ACP se incluyeron las variables: Da, A, L, Ar, pH, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu y B. En el ACP se conservaron aquellos componentes principales que tuvieron valores propios mayores a 1. Una vez determinados los componentes a trabajar se hizo un análisis de correlación entre todas las variables edáficas utilizadas y todos los componentes principales retenidos, y se seleccionaron aquellas variables que correlacionaron significativamente con cada componente. Para seleccionar el grupo de indicadores con base en el ACP (GMD2) se llevó a cabo un análisis de redundancia como se indicó en el numeral anterior.

- **Análisis de Factor (AF)**

De igual forma que el ACP, el Análisis de Factor es una técnica estadística multivariada de reducción de datos. Su objetivo fundamental consiste en buscar el número mínimo de variables capaces de explicar el máximo de información contenida en los datos. A diferencia del ACP, el AF distingue entre varianza común y varianza única. La varianza común es la parte de la variación de la variable que es compartida con las otras variables. La varianza única es la parte de la variación de la variable que es propia de esa variable. El ACP no hace esa distinción entre los dos tipos de varianza: se centra en la varianza total. Así, el ACP trata de hallar componentes que sucesivamente expliquen la mayor parte de la varianza total, mientras que el AF busca factores que expliquen la mayor parte de la varianza común.

Para el AF se incluyeron las variables: Da, A, L, Ar, pH, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu y B. Para este AF los factores fueron extraídos con componentes principales y rotación varimax, reteniéndose los factores que presentaron valor propio mayor a 1. En los factores retenidos se seleccionaron aquellas variables que tuvieron una carga en el factor mayor a 0.7, siguiendo la instrucción de Hair, J., Black, C., Babin, B., Anderson, R., & Tatham, R (2006) para el tamaño de muestra que se tuvo en este experimento.

A las variables seleccionadas en cada factor se les hizo un análisis de redundancia de la misma forma en que se describió para las regresiones múltiples y aquellos indicadores que finalmente fueron escogidos conformaron el tercer grupo de indicadores (GMD3).

4.2.2 Cálculo de los Índices de Calidad del Suelo (ICS)

Una vez seleccionados los indicadores en cada grupo se procedió a calificarlos para, posteriormente, combinarlos en un índice aditivo como el que propusieron Andrews et al. (2002).

- **Calificación de los indicadores**

Siguiendo pautas de Andrews y otros investigadores se procedió a calificar todas las propiedades edáficas evaluadas con el fin de llevarlas a una base común de valores comprendidos entre 0 y 1, adimensionales, para poderlos combinar sin tener problemas de escala.

El procedimiento de clasificación se basó en los criterios de “más es mejor” para aquellas propiedades en las que tener cantidades crecientes del recurso que representan es lo deseable. En este grupo se encuentran los contenidos de nutrientes, de materia orgánica, de CO₂ y de arcilla (Pramod, 2009; Ombina, 2008; Mollinedo et al., 2005; Nwoboshi, 1984).

Con el criterio de “menos es mejor” se calificó la Da del suelo, y los contenidos de A y L, y con el pH, del cual se ha establecido un valor crítico para el desarrollo de la Teca, se siguió el procedimiento de Qi et al. (2009) y Chen et al. (2013) que utilizan un sistema compuesto de calificación en el cual, con valores por debajo del nivel crítico se califica con el criterio de “más es mejor”, en el nivel crítico la calificación es igual a 1, y con valores por encima del nivel crítico, la calificación se da con el criterio de “menos es mejor”.

Para calificar con el criterio de “más es mejor”, el valor de la propiedad en cada sitio se divide por el mayor valor obtenido en toda la muestra, con lo que se tiene una calificación de 1 para el máximo valor de la variable, y en todos los otros casos la calificación es menor a 1. Con el concepto de “menos es mejor”, el mínimo valor de la propiedad obtenido en la muestra se divide por cada uno de los valores obtenidos en cada sitio, con lo que, en el sitio de mínimo valor se tiene una calificación de 1, y en los demás una calificación menor que 1 (Andrews et al., 2002).

- **Cálculo del Índice de Calidad del Suelo (ICS)**

Las calificaciones establecidas para todos los indicadores de cada grupo se combinaron en un índice aditivo para cada sitio de muestreo. Luego, se sumaron los índices parciales obtenidos por sitio para establecer el índice de calidad de suelo correspondiente a todo el lote experimental.

De acuerdo con los grupos mínimos de datos definidos se establecieron, entonces, tres (3) Índices de Calidad del Suelo: uno con los indicadores definidos por regresión (ICS1), otro con los que se definieron con el ACP (ICS2), y otro con los definidos por AF (ICS3). Se estableció un índice general utilizando todas las propiedades evaluadas como indicadores (ICS4) (Qi et al., 2009; Chen et al., 2013) para tenerlo como el índice más completo de evaluación de la calidad del suelo.

4.2.3 Evaluación de los Índices de Calidad del Suelo (ICS)

Con los índices calculados se hicieron algunas pruebas estadísticas para definir el que mejor representara la calidad productiva de suelo. Se hicieron análisis de correlación lineal entre los cuatro (4) índices y las variables biométricas. También se hicieron pruebas de comparación de medias entre índices para detectar diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Se llevaron a cabo regresiones lineales simples tomando como variables dependientes la Altura de la planta y el DAP, y como independientes los índices de calidad del suelo. Además, se hicieron regresiones lineales simples entre el ICS4 y los demás índices para establecer cual GMD se acercaba más al índice general completo de evaluación de la calidad del suelo.

4.3 Resultados

4.3.1 Conformación de los diferentes GMD

De acuerdo con la metodología descrita, a continuación se presentan los tres (3) GMD obtenidos con los procedimientos estadísticos empleados.

▪ Selección del GMD1 a través de Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Para este análisis se tuvieron en cuenta, como variables independientes Da, L, Ar, pH, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu, B y CO₂, mientras que la Altura y el DAP de las plantas fueron las variables dependientes. Tanto con la Altura como con el DAP se obtuvieron modelos de regresión lineal estadísticamente significativos al 95 % (Tablas 4.5 y 4.6, respectivamente). Los modelos obtenidos para ambas regresiones fueron:

$$\text{Altura} = 23.383 - 0.0855374 \cdot \text{Ar} - 2.22512 \cdot \text{pH} + 5.23748 \cdot \text{K}$$

$$\text{DAP} = 7.6596 - 0.149762 \cdot \text{Ar} + 1.42545 \cdot \text{MO} + 8.56707 \cdot \text{K}$$

Tabla 4.5. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple entre la Altura de las plantas y 15 propiedades edáficas, y del análisis de varianza del modelo obtenido.

Análisis de regresión lineal					
Parámetro	Coefficiente	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
Constante	23.383	5.15683	4.53437	0.0000	
Ar	-0.0855374	0.0353609	-2.41898	0.0188	
pH	-2.22512	0.791973	-2.80959	0.0068	
K	5.23748	2.41305	2.17048	0.0342	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	26.4067	3	8.80222	4.37	0.0078
Residuo	112.711	56	2.01269		
Total	139.117	59			

Tabla 4.6. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple entre el DAP de las plantas y 15 propiedades edáficas, y del análisis de varianza del modelo obtenido.

Análisis de regresión lineal					
Parámetro	Coefficiente	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
Constante	7.6596	0.818992	9.35248	0.0000	
Ar	-0.149762	0.0458467	-3.26659	0.0019	
MO	1.42545	0.423263	3.36777	0.0014	
K	8.56707	2.81138	3.04728	0.0035	

Tabla 4.6. (Continuación).

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	57.6085	3	19.2028	7.02	0.0004
Residuo	153.145	56	2.73473		
Total	210.753	59			

A pesar de encontrarse modelos significativos, los coeficientes de determinación R^2 en ambos son relativamente bajos. Las variables que se relacionaron significativamente con la Altura y el DAP fueron Ar, pH, MO y K. Los supuestos de normalidad e igualdad de varianza se cumplieron para los residuales de la regresión de la Altura sin ningún contratiempo, pero para que se cumplieran en la regresión del DAP fue necesario eliminar dos valores extremos.

En la Tabla 4.7 se presenta la matriz de correlación entre las variables que fueron significativas en las regresiones, así como la sumatoria de los coeficientes de correlación de cada una, información que sirvió de soporte para seleccionar los indicadores definitivos con este primer procedimiento, como lo propusieron Rezaei et al. (2004).

Tabla 4.7. Matriz de correlación entre las variables significativas en las regresiones de Altura y DAP de las plantas evaluadas en una plantación de teca de san Onofre, Sucre.

	MO	pH	Ar	K
MO	1	-0.3542	0.6979	0.5132
pH	-0.3542	1	-0.5369	-0.4177
Ar	0.6979	-0.5369	1	0.743
K	0.5132	-0.4177	0.743	1
Sumatoria	1.8569	-0.3088	1.904	1.8385

En la Tabla 4.7 se observan coeficientes de correlación mayores a 0.6 entre las propiedades MO – Ar, y entre Ar – K, indicando que estas variables están fuertemente correlacionadas y, por tanto, son redundantes (Rezaei et al., 2004). Si se observa la sumatoria de los coeficientes de las variables redundantes puede verse que la sumatoria de los coeficientes de Ar es la más alta, por lo que esta propiedad recoge el efecto de las otras dos y se considera como el primer indicador del GMD1 (Rezaei et al., 2004). El pH no fue redundante con ninguna de las propiedades significativas en los modelos de regresión, por lo cual también se conservó como otro indicador de calidad del suelo dentro de GMD1.

En resumen, los indicadores que conformaron el GMD1 fueron el contenido de arcilla del suelo y su pH, reafirmando la importancia que tienen estas dos propiedades en el crecimiento de la teca, como lo han observado diferentes investigadores, quienes afirman que la teca puede adaptarse a diferentes tipos de suelo, presentando los mejores

crecimientos en aquellos que muestran pH entre 6.5 y 7.5 (Krishnapillay, 2000; Mollinedo et al., 2005; Alvarado, 2004; Thiele, 2008; Ladrach, 2009), de preferencia con textura Franco Arcillosa (FAR) donde la proporción de Ar es adecuada para esta especie (Zech & Drechsel, 1991; Thiele, 2008; Ladrach, 2009), condición que al parecer se presenta en el área de estudio.

▪ Selección del GMD2 a través de Análisis de Componentes Principales (ACP)

Para este análisis se tuvieron en cuenta las variables Da, A, L, Ar, pH, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu, B y CO₂, y en la Tabla 4.8 se presentan los resultados obtenidos en él. De los 16 componentes establecidos sólo cuatro (4) presentaron valor propio mayor a 1, explicando el 69.855% de la variabilidad de los datos. Con estos cuatro (4) componentes y todas las variables edáficas evaluadas se realizó un análisis de correlación lineal con el fin de seleccionar las propiedades significativas en cada componente (Tabla 4.9).

Tabla 4.8. Resultados del Análisis de Componentes Principales (CP).

Componente Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	6.21041	38.815	38.815
2	2.25351	14.084	52.900
3	1.58128	9.883	62.783
4	1.13157	7.072	69.855
5	0.975	6.093	75.948
6	0.820	5.126	81.074
7	0.638	3.992	85.066
8	0.568	3.549	88.615
9	0.478	2.988	91.603
10	0.385	2.406	94.009
11	0.298	1.863	95.872
12	0.247	1.548	97.420
13	0.182	1.137	98.557
14	0.170	1.064	99.621
15	0.061	0.379	100.000
16	0.0	0.000	100.000

Tabla 4.9. Coeficientes de correlación lineal entre las propiedades edáficas y los primeros cuatro (4) componentes principales extraídos. En negrilla coeficientes de correlación estadísticamente significativos al 95%.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
Da	0,5314	-0,3209	-0,0963	-0,1123
A	0,9449	-0,082	0,1211	-0,0617
L	-0,7158	0,1817	-0,2532	-0,164
Ar	-0,916	0,0295	-0,05	0,1478
pH	0,5941	0,3594	-0,3528	-0,3239
MO	-0,7993	-0,2494	-0,1948	-0,2125
Ca	0,0939	0,6411	-0,535	0,1009
Mg	-0,3973	0,7113	0,1005	0,3735
K	-0,7844	0,2044	0,1719	0,147
P	0,516	-0,498	-0,1781	0,1743
S	-0,4418	0,1448	0,0523	-0,4769
Fe	-0,7888	-0,4316	0,1806	-0,0553
Mn	-0,3185	-0,6285	-0,306	0,0131
Cu	-0,8378	-0,167	-0,014	-0,0948
B	-0,1404	0,0035	-0,7948	-0,2105
CO ₂	-0,0553	-0,2857	-0,458	0,6563

Con el conjunto de propiedades edáficas estadísticamente significativas se efectuó el respectivo análisis de redundancia, de igual manera como se hizo en el análisis de regresión, para definir el segundo grupo de indicadores GMD2, el cual quedó compuesto por las variables MO, Da, Mg, P, S, Mn, CO₂, pH, Ca y B.

Trabajos adelantados por diferentes autores en regiones donde se ha sembrado teca, han resaltado la importancia que tiene para su crecimiento el estado nutricional de los suelos. Por ejemplo, Ca y Mg han mostrado un efecto significativo y positivo sobre el crecimiento (IMA Altura); valores de saturación de Ca en el suelo superiores al 68 % han logrado incrementar hasta en un 59 % los incrementos en altura (Alvarado & Fallas; 2004; Mollinedo et al., 2005; Oliveira, 2003; Mora & Meza, 2004).

El Fósforo (P), Boro (B) y Azufre (S), aunque con menor demanda respecto a otros elementos minerales, han resultado importantes en los primeros años de establecimiento, y posteriormente en la etapa de crecimiento (Nwoboshi, 1984; Mollinedo et al., 2005; Pramod, 2009; De Camino & Morales, 2013). Deficiencias de Mn y Fe necesarios para un adecuado desarrollo foliar generan graves problemas en producción, tanto como el aumento desmedido del pH por inapropiadas prácticas de encalado (Oliveira, 2003; Mongia & Bandyopadhyay, 1993; Alvarado, 2006). La Materia Orgánica (MO) como fuente de Nitrógeno, principalmente, y acondicionador de propiedades físicas del suelo como Da,

entre otros atributos, favorece el desarrollo de la teca (Zech & Drechsel, 1991; Pramod, 2009).

Los indicadores del GMD2 parecen aproximarse bien a lo que diversos investigadores han señalado en cuanto a los requerimientos de la teca: suelos fértiles, pH cercano a la neutralidad, condiciones óptimas de drenaje, saturación de bases y buena profundidad efectiva.

▪ Selección del GMD3 a través de Análisis de Factor (AF)

Las variables incluidas en este análisis fueron Da, L, Ar, pH, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu, B y CO₂ y la Tabla 4.10 muestra el resultado obtenido con él. Cuatro factores tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0 y por ello fueron retenidos como nuevas variables explicativas de la variabilidad de las propiedades del suelo: los cuatro (4) factores explicaron el 68.51 % de dicha variabilidad.

Tabla 4.10. Resultados del Análisis de Factor

Factor Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	5.3384	35.589	35.589
2	2.2456	14.971	50.56
3	1.56484	10.432	60.992
4	1.12774	7.518	68.51
5	0.957274	6.382	74.892
6	0.807655	5.384	80.277
7	0.636	4.24	84.517
8	0.567228	3.782	88.298
9	0.474228	3.162	91.46
10	0.379417	2.529	93.989
11	0.29328	1.955	95.944
12	0.216201	1.441	97.386
13	0.181672	1.211	98.597
14	0.152285	1.015	99.612
15	0.0581842	0.388	100

El resultado de la rotación varimax de los factores retenidos se muestra en la Tabla 4.11. Teniendo en cuenta el tamaño de la muestra utilizada, se seleccionaron aquellas variables que tuvieron una carga en el factor igual o mayor a 0.7 (Hair et al., 2006): Ar, MO, Fe, Cu, Mg, B y CO₂. Después de hacer el análisis de redundancia con las variables seleccionadas se definió el tercer grupo de indicadores GMD3, el cual quedó conformado por Ar, Mg, B y CO₂, variables que como ya se ha señalado, resultan importantes para el crecimiento de

la teca; sin embargo, ninguna de ellas aparece seleccionada, de manera reiterativa, en los tres métodos estadísticos empleados en la obtención de los GMD.

Tabla 4.11. Carga de los factores después de la rotación varimax. En negrilla aquellas variables que tuvieron una carga en el factor mayor a 0.7.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Da	-0.28833	-0.582714	0.00217338	0.0723699
L	0.564639	0.378474	0.337491	-0.197898
Ar	0.74838	0.516511	0.0265419	0.0418115
pH	-0.612094	-0.200823	0.502505	-0.210212
MO	0.853757	0.100286	0.17911	-0.109527
Ca	-0.346843	0.410659	0.65406	0.0978016
Mg	-0.0564611	0.8993	0.0283592	0.0245344
K	0.542056	0.632274	-0.118341	-0.069007
P	-0.20745	-0.587826	-0.0416693	0.437066
S	0.375996	0.179372	0.146162	-0.48875
Fe	0.882416	0.077822	-0.256849	-0.0465909
Mn	0.608813	-0.358691	0.098735	0.285494
Cu	0.819536	0.260178	0.011353	-0.0970353
B	0.225775	-0.125043	0.789593	0.0827252
CO ₂	0.158036	0.0125562	0.166234	0.836891

4.3.2 Cálculo de los Índices de Calidad del Suelo (ICS)

Como se indicó en la metodología, antes de calcular los Índices de calidad del Suelo (ICS) se procedió a calificar los respectivos indicadores seleccionados con base en el método establecido por Andrews et al. (2002). Se calificaron con el criterio de “menos es mejor” las variables Da, A y L, y con “más es mejor” las propiedades Ar, MO, Ca, Mg, K, P, S, Fe, Mn, Cu, B y CO₂. Al pH se le asignó una calificación de 1 cuando presentó un valor igual a 6.1, mientras que si el valor fue menor a 6.1, la calificación se dio como “más es mejor”, y si estuvo por encima del valor crítico, se calificó como “menos es mejor”.

Una vez calificados los indicadores se procedió a calcular cada uno de los índices para cada sitio de muestreo y luego se hizo un análisis de los resultados para establecer el ICS respectivo para todo el lote (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Estadísticos básicos de los Índices de Calidad de Suelo (ICS) para el lote experimental de San Onofre, Sucre.

	Media	Mediana	DE ¹	CV % ¹	Mínimo	Máximo	Q1 ¹	Q3 ¹	Sesgo
ICS1	1.633 c *	1.627	0.181	11.1	1.241	1.922	1.50	1.79	-0.663
ICS2	5.807 b	5.820	0.606	10.44	4.485	7.33	5.42	6.25	0.603
ICS3	1.835 c	1.793	0.446	24.29	0.852	2.935	1.56	2.08	0.857
ICS4	9.259 a	9.300	1.189	12.8	6.61	12.76	8.29	9.98	0.769

¹DE: Desviación Estándar, CV: Coeficiente de variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. * Valores seguidos por diferente letra indican diferencia estadísticamente significativa al 95%.

Los mayores valores promedios de índice de calidad los presentaron los ICS4 e ICS2 que fueron los índices que se calcularon con un mayor número de indicadores en el GMD. El ICS4 presentó el mayor valor debido a que para calcularlo se incluyeron todas las propiedades edáficas estudiadas (Qi et al., 2009; Chen et al., 2013); además, presentó una diferencia estadísticamente significativa con los demás índices.

Un análisis de correlación lineal realizado entre los cuatro (4) índices de calidad y las variables biométricas (Tabla 4.13), mostró que la altura no correlacionó significativamente con ninguno de los índices, y que sólo el ICS1 lo fue con el DAP.

Tabla 4.13. Resultado de las correlaciones lineales (Pearson) entre las variables productivas y los diferentes ICS calculados (En negrilla variables significativas estadísticamente).

	ALTURA	DAP	ICS1	ICS2	ICS3
DAP	0.51	1.00			
ICS1	0.13	0.27	1.00		
ICS2	-0.05	-0.02	0.58	1.00	
ICS3	0.01	-0.09	0.59	0.82	1.00
ICS4	0.07	0.16	0.91	0.84	0.78

Las regresiones lineales simples hechas entre las variables dependientes Altura de la planta y el DAP y los índices de calidad del suelo como variables independientes no produjeron modelos estadísticamente significativos, como puede verse en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Valor-P del Anova para las regresiones simples entre las variables biométricas y los ICS.

		Valor-P		Valor-P	
Altura	ICS1	0.9325	DAP	ICS1	0.7388
	ICS2	0.6425		ICS2	0.7974
	ICS3	0.9615		ICS3	0.4742
	ICS4	0.5765		ICS4	0.212

El comportamiento observado entre los ICS y las variables biométricas puede estar mostrando que los niveles de calidad de los suelos eran suficientes para la edad de la plantación, al momento de hacer este trabajo, por lo que no se pudo detectar la influencia de las propiedades edáficas sobre la producción de la teca, como lo han observado otros investigadores a edades mayores del cultivo (Nwoboshi, 1984; Pramod, 2009). A este respecto también llama la atención el hecho de que sólo se presentó correlación significativa entre el DAP y el ICS1 que es el índice que se calculó con el menor número de indicadores.

4.3.3 Evaluación del Índice de Calidad de Suelo a través de regresiones lineales simples entre ICS4 y demás índices

Asumiendo que el ICS4 es el índice más completo de evaluación de la calidad del suelo, ya que se estableció utilizando todas las propiedades evaluadas como indicadores (Qi et al., 2009, Chen et al., 2013), se hicieron análisis de regresión lineal entre ICS4 y los demás índices, con el fin de establecer la capacidad predictiva de los mismos. En la Figura 4.1 se presentan los modelos de regresión obtenidos.

Figura 4.1. Modelos de regresión entre ICS4 y los otros índices de calidad de suelo.

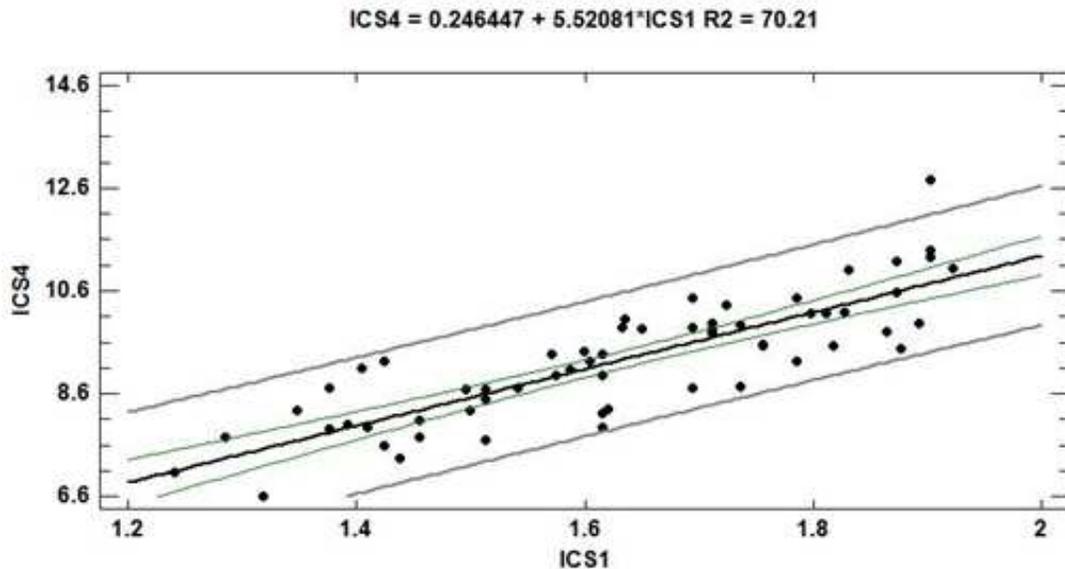
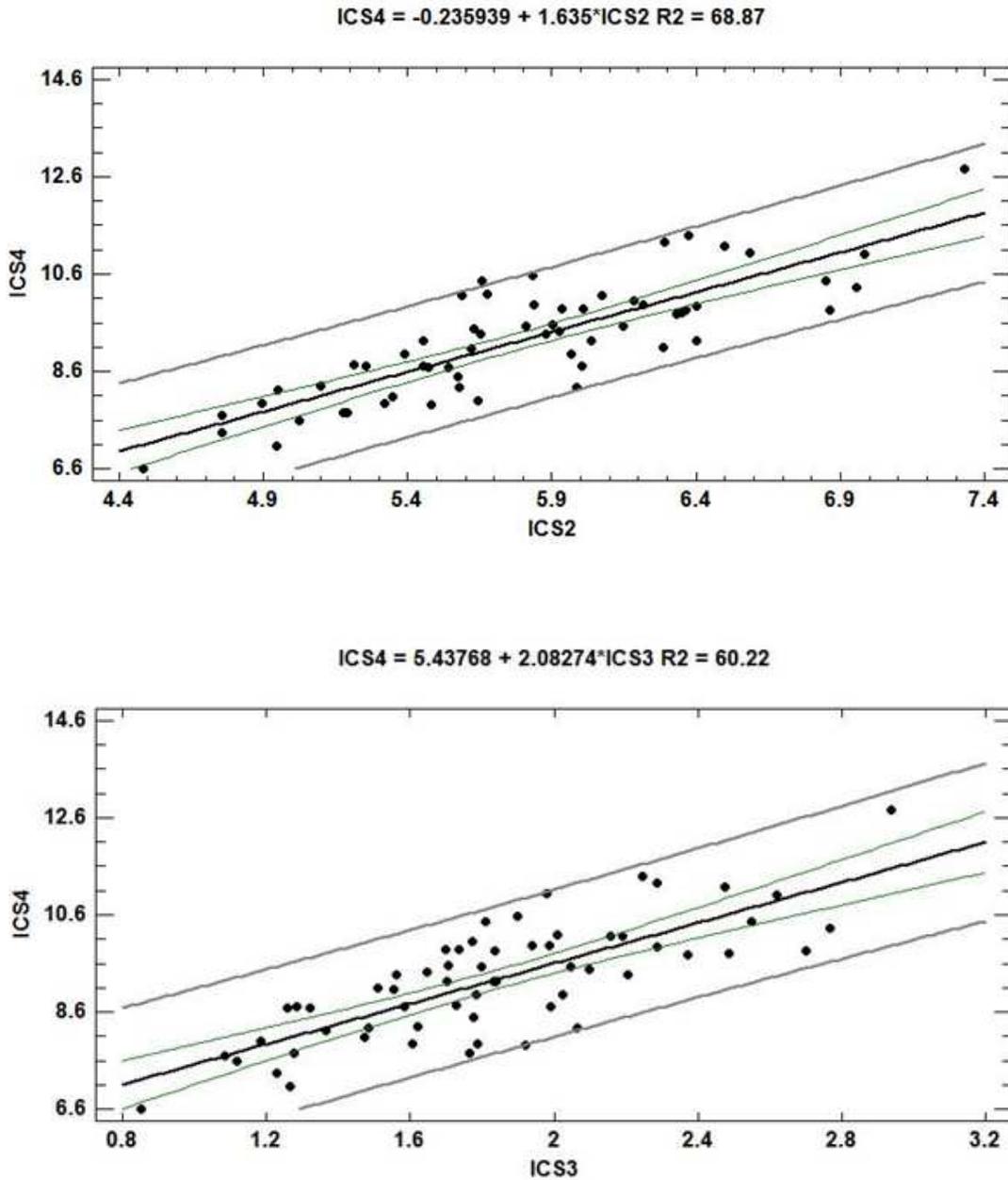


Figura 4.1. (Continuación).



De la Figura 4.1 se deduce que el ICS1 tiene una alta capacidad de evaluar la calidad de los suelos estudiados ($R^2 = 70.21\%$), con la ventaja de que es un índice que se puede calcular con muy pocas variables edáficas, haciendo el proceso eficiente y económico.

Con respecto a la forma como se establece la calidad de sitio forestal, tanto para teca como para otros sistemas productivos forestales, diversos autores (Vásquez & Ugalde, 1994; Vallejos, 1996; Scolforo, 1997; Ombina, 2008) han señalado como este criterio está directamente vinculado con los parámetros de crecimiento (Altura, DAP), a los que les asocian consideraciones sobre factores edáficos, fisiográficos y climáticos. Sin embargo,

Siddiqui & Abod (1998) y Ombina (2008) mencionan cómo la teca tiene diferencias fisiológicas en rendimiento, crecimiento y calidad por su origen, presentando un amplio rango de adaptación a factores climáticos (Tabla 2.3). Lo anterior, y tomando en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, permite señalar que la calidad de sitio debe ser determinada de manera integral, basada en condiciones físico-ambientales, material genético y criterios de manejo, ya que la respuesta de la altura y el DAP puede mejorar con prácticas eficientes de fertilización como lo señalan Alvarado y Fallas (2004); para que esto pueda darse es necesario conocer el suelo donde se desea sembrar, así como las demandas nutricionales de la especie a utilizar.

Conclusiones

- El mejor método para seleccionar el GMD fue el Análisis de Regresión Lineal Múltiple con el cual fue posible obtener el grupo de variables que representó de mejor manera las posibilidades productivas del suelo evaluado, resultado que se constituye en una herramienta útil para ayudar en la selección de nuevos sitios de siembra de manera puntual en la zona donde se adelantó el estudio.
- Este trabajo mostró diferencias importantes entre los GMD que se pueden establecer con distintos métodos estadísticos de selección de variables. Un índice de calidad de suelo calculado con apenas cuatro (4) indicadores: Ar, MO, pH y K tuvo una buena capacidad predictiva sobre la calidad de los suelos trabajados, haciendo el proceso de evaluación de los mismos eficiente y económico.
- No se encontraron correlaciones significativas entre los índices calculados y las variables biométricas altura de la planta y DAP, lo que hace suponer que la edad de la plantación, al momento de ser evaluada, no fue suficiente como para que se alcanzara a observar algún efecto por parte del suelo sobre su desarrollo. Se sabe que el efecto de la nutrición sobre el desarrollo de la teca es creciente en la medida en que la planta aumenta su edad.

Bibliografía

- Abellan, M.A., & García, F.A. (2006). La evaluación del impacto ambiental de proyectos y actividades agroforestales. Ediciones de la Universidad de Castilla, La Mancha, 1-242. Revisado el 07 de Agosto de 2012 desde internet: http://books.google.com.co/books?id=uYkQp1MGSH0C&pg=PA266&lpg=PA266&dq=suelo+es+un+componente+fundamental+de+la+biosfera+calidad+del+suelo&source=bl&ots=vEf4UkG26b&sig=PMAsgHVcXX0xdkd2H-xN6bYB-Ho&hl=es&sa=X&ei=l2wiUJ_pCuf30gGHroC4Bg&ved=0CFMQ6AEwBA#v=onepage&q=suelo%20es%20un%20componente%20fundamental%20de%20la%20biosfera%20calidad%20del%20suelo&f=false
- Acevedo, E. & Martínez, E. (2003). Sistema de labranza y productividad de los suelos. En: Sustentabilidad en Cultivos Anuales. Santiago, Universidad de Chile, *Serie Ciencias Agronómicas*, 8, 13-25.
- Afif, E., Canga, E., Cámara, A, & Gorgoso, J. (2007). Influencia de los Factores edáficos en la relación altura dominante - edad y estado nutricional de *Pinus radiata* D. don en Asturias (España). En: *Actas de la 2ª reunión del grupo de trabajo de ecología, ecofisiología y suelos forestales*, Salamanca, España.
- Alonso, M.J., Pérez, J., Lantinga, E.A. (2004). *Método para evaluar la calidad del suelo: estudio de cuatro praderas asturianas*. VI Congreso de SEAE y II Congreso Iberoamericano de Agroecología, Almería, España.
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo integrado de plagas y Agroecología (Costa Rica)*, 64, 17-24.
- Alvarado, A. (2006). Nutrición y fertilización de la Teca. *Informaciones agronómicas*. 61, 1-8.
- Alvarado, A; & Fallas, J. (2004) La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la Teca (*Tectora grandis* L.F.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81-87.
- Álvarez, P., & Biancucci, M. (2006). *Ciclo del Carbono: Materia Orgánica y Humus*. Seminario N° 8. Universidad Nacional Del Comahue. Argentina. Revisado el 22 de julio de 2012 desde Internet: http://faciasweb.uncoma.edu.ar/academica/materias/microbiologia_ambiental/informes_seminarios_2006/8_materia-organica-y-humus.pdf.

- Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, D.L., Hartz, T.K., Horwarth, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., & Munk, D.S. (2002). On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. *Published in Agron.*, 94, 12-23.
- Armida, L., Espinosa, D., Palma, D., Galvis, A., & Salgado, S. (2005). Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de Vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 545-551.
- Arshad, M.A., & Coen, G. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7, 25-31.
- Arshad, M.A., Lowery, B., & Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. 123-142. In: J. W. Doran & Jones, A. J. (eds.) *Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America Special Publication*, 49, 25-37.
- Arshad, M.A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture Ecosystems Environment*, 88, 153-160.
- Astier, C.M (2002). *El efecto de las leguminosas en el mejoramiento de la calidad del suelo de ando en sistemas agrícolas de ladera en la cuenca del lago de Zirahuén*. Tesis Doctoral. Facultad de Biología, UNAM, Ciudad de México, México.
- Astier, C.M., Maass, M. & Etchevers, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sostenible. *Agrociencia*, 36, 605-620.
- Bastida, J., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008) Past, present and future of oilquality indices: A biological perspective, *Geoderma*, 147, 159-171.
- Bautista, A., Etchevers, J., Del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La Calidad del Suelo y sus Indicadores. *Ecosistemas, Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, XIII (2).
- Bertsch, F. (1995). La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR. *Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo*, 157.
- Bhardwaj, A.K., Jasrotia, P., Hamilton, S.K., & Robertson, G.P. (2011) Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140, 3-4.
- Burguer, J.A., & Kelting, D.L. (1999). Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management*, 122(1-2), 155-166.
- Cantu, M., Becher, A., Bedano, J., & Schiavo, H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178.
- Carter, M.R. (2002). Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*, 94, 38-47.
- Ceron, L., & Melgarejo, L. (2005). Enzimas del suelo: Indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1), 5-17.

- Chávez, E., & Fonseca, W. (1991). Teca árbol de uso múltiple en América Central. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico N° 179. *Colección de guías Silviculturales*, 11, 47.
- Chen, Z.S. (2000). Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwan and uptake by crops. *Food and fertilizer technology center*.
- Chen, D., Wang, H., Zhou J., Xing, L., Zhu B., Zhao, Y., Chen, X. (2013). Minimum Data Set for Assessing Soil Quality in Farmland of Northeast China. *Pedosphere* 23(5): 564–576.
- Chocano, C., Hernández, M.T., Melgares de Aguilar, J., González, D., & García, C. 2008, septiembre). *La actividad microbiana como indicador de calidad del suelo en cultivos de ciruelo ecológico*. Trabajo presentado en el VIII Congreso SEAE sobre “Cambio climático, biodiversidad y desarrollo rural sostenible”, IV Congreso Iberoamericano Agroecología y II Encuentro Internacional de Estudiantes de Agroecología y Afines, Murcia, España.
- Clutter, J.L., Fortson, J.F., Pienaar, L.V., Brister, G.H., & Bayley, R.L. (1983). *Timber management: a quantitative approach*. New York, Wiley, 333.
- Cortés, A. (2007). *Los suelos contaminados y su gestión*. Apuntes, parte 1 para Master UTEM-UB, Barcelona, España.
- Dalurzo, H.C. (2002). *Agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos*. Efecto sobre variables que estiman sustentabilidad. Tesis de Magíster. Postgrado en Ciencia del Suelo. Universidad de Buenos Aires, 237.
- Dalurzo, H.C., Serial, R.C., Vásquez, S., & Rato, S. (2002). Indicadores químicos y biológicos de la calidad de suelos en oxisoles de Misiones (Argentina). *Facultad de ciencias agrarias (UNNE)*.
- De Camino, R., & Morales, J. P. (2013). Las Plantaciones de América Latina: Mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica. CATIE, 397, 392 p.
- Delgado, E., Rosales, F., Trejos, J., Villalobos, M., & Pocasangre, L. (2010). Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América Latina y El Caribe. *Bioagro*, 22(1), 53-60.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality part I. Theory, effect of soil texture, density and organic matter, and effect on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Diack, M., & Scott, D.E. (2001). Development of a Soil Quality Index for the Chalmers Silty Clay Loam from the Midwest USA. En: Scott D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (Eds). *The Global Farm*.
- Drechsel, P. & Zech, W. (1994). DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on teak growth in West Africa. *Forest Ecology and Management*, 70, 121–133.

- Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment. Doran, J. W., Coleman, D.C., Bezdicek, D. C., & Stewart B. A. (eds). *Soil Science Society of America. Special Publication*, 35, 3-21.
- (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J.W. & Jones, A.J. (eds). *Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science society of America Special*, 49, 25-37
- Edafología. (2006) *Textura del suelo. Propiedades físicas de los suelos*. Revisado desde Internet: edafologia.ugr.es/IntroEda/tema04te xt.htm/.
- Etchevers, J.D., Hidalgo, C., Vergara M., Bautista, M., & Padilla, J. (2009). Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En: López, J., & Rodríguez, M. (2009). *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. (Ed). *Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geográfica para el siglo XXI*. Serie Libros de Investigación, 3, 196.
- FAO, (2000). Los principales factores ambientales y de suelos que influyen sobre la productividad y el manejo. *Manual on integrated soil management and conservation practices*. Desde Internet: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/c20021221046e dafo_factoresambientalesysuelos.pdf
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., & Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 27, 103-114.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bacigaluppo, S., Dickie, M.J., Fernández, E., Bonel, B., & Bodrero, M. (2010). Rotaciones con gramíneas y cultivos de cobertura: alternativas para la conservación biológica del suelo. *Para mejorar la producción 45, INTA EEA oliveros 2010*, 63-68.
- Garbisu, C., Becerril, J.M., Epelde, L., Alkorta, I. (2007). Bioindicadores de la Calidad del Suelo: Herramienta Metodológica para la evaluación de la Eficacia de las Naciones Unidas, proceso fitorremediador. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 16(2), 44-49.
- García, C., & Hernández, T. (2003). *Técnicas de análisis de Parámetros Bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. Murcia, España: Ediciones mundi-prensa (ed. Española).
- Gardiazabal, F. (2004). *Factores agronómicos a considerar en la Implantación de un huerto de paltos*. Seminario internacional de paltos, Quillota, Chile.
- Glanz, J.T. (1995). *Saving Our Soil: Solutions for Sustaining Earth's Vital Resource*. Johnson Books, Boulder, CO, USA.
- Gil, F., Trasar, C., Leiros M. C. & Seoane, S. (2005). Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 877-887.

- Giraldo, L., Del Valle, J., & Escobar, M., (1980). El crecimiento de nogal (*Cordia alliodora* Ruiz & Pavon) Oken en relación con algunos factores climáticos, edáficos y fisiográficos en el suroeste de Antioquia (Colombia). *Revista de Agronomía Universidad nacional Colombia*, 23, 21-32.
- Glover J.D., Reganold J.P., & Andrews P.K (2000). Systematic method for rating soilquality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1-2), 29-45.
- González, S.J., Cabaneiro, A. Villar, M.C., Carballas, M., & Carballas, T. (1996). Effect of soil characteristics on N mineralization capacity in 112 native and agricultural soils from the northwest of Spain. *Biology and fertility of Soils*, 22(3), 252-260. Desde internet: <https://springerlink3.metapress.com/content/g758733615582584/resource-secured/?target=fulltext.pdf&sid=t3pn4plm1dc03orqlo3kyxa0&sh=www.springerlink.com>
- González, R., Dalurzo, H., & Vázquez, S. (2002). Indicadores de calidad de suelos del sur de la provincia de Misiones. *Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, 3, A-057.
- Gourley, .J.P. Potassium. In: Peverill, K.I., Sparrow, L.A., & Reuter, .J.A. (Eds). (1999). Soil Analysis Interpretation Manual. *Australian Soil and Plant Analysis Council*, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 229–243
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Doran, J.W., Pankhurst, C.E., & Dwyer J.M. (1997). Biological attributes of soil quality, 81-113. In: Gregorich E.G., Carter, M.R. (eds). *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Amsterdam, The Netherlands.
- Govaerts, B., Sayre, K., Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research*. 87, 163-174.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2006). *Multivariate data analysis* (Vol. 6). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Henríquez, C., Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque Agrícola*. ACCS. (1ª ed.). San José, Costa Rica.
- Herrera, B; Alvarado, A. (1998). Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. San José, CR. *Agronomía Costarricense*. 22(1), 99-117.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R., & Müller, S. (1997). *Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales*. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Kang, G.S., Beri, V., Sidhu, B.S., Rupela, O.P., (2005). A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems. *Biol. Fertil. Soils*, 41, 389–398. In: Bastida, J., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008) Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective, *Geoderma*, 147, 159-171.

- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Each, N.S. & Jordahl, J.L. (1994). Crop residue effects on soil quality following 10 years of no-till corn. *Soil and Tillage Research* 31(1-3), 149-167. Revisado el 10 de Julio de 2012 desde Internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198794900779>
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61, 4–10.
- Karlen, D.L, Andrews, S.S., and Doran, J.W. (2001). Soil Quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74, 1-40.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S. (2003). Soil quality: why and how. *Geoderma*. 114, 145-156.
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Wienhold, B.J., Zobeck, T.M. (2008). Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *Electronic Journal of Integrative Biosciences*. 6, 3-14.
- Koper, J., and Piotrowska, A. (2003). *Application of biochemical index to define soil fertility depending on varied organic and mineral fertilization*. EJPAU 6 (1), N. 06. Desde Internet: <http://www.ejpau.media.pl/volume6/issue1/agronomy/art-06.html>
- Ladrach, W. (2009). Management of teak plantations for solid wood products. *International Society of Tropical Foresters*, 1-25
- Larson, W.E. & Pierce, J.F. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. En: Defining soil quality for a sustainable environment. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., & Stewart, B.A., (eds). *Soil Sci. Soc. Am., Spec.*, 35, 37-51.
- Lewery, B., Arshad, M.A., Lal, R., and Hickey, W. J. (1996). Soil water parameters and soil quality. 143-157. In: Doran, J.W. & Jones, A. J. (eds.) *Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America Special Publication*, Madison, 49.
- Manahan, S.E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Desde Internet: <http://books.google.com.co/books?id=5NR8Dik1n68C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E., & Grego, S. (2006). Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*. 6(4), 701-711.
- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., & Patra, A.K. (2007). Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 130-142.
- Moffat, A.J. (2003). Indicators of soil quality for U.K. forestry. *Forestry*, 76(5), 547-568.

- Mohanty, M., Painuli, K., Misra, A.K., & Ghosh, P.K. (2007). Soil quality effects of tillage and residue under rice–wheat cropping on a Vertisol in India. *Soil and Tillage Research*, 92, 243-250.
- Mollinedo M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J.M. y Rudy, L.C. (2005). Relación suelo – árbol y factores de sitio en plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. EN: *Agronomía Costarricense*, 29 (1): 67-75.
- Mongia, A., & Bandyopadhyay, K. (1993). *Soils of the tropics*. Vikas Publishing House.
- Moody, P.W., & Bolland, M.D.A.(1999). Phosphorus. In: Peverill, K.I., Sparrow, L.A., & Reuter, D.J. (Eds.), *A Soil Analysis Interpretation Manual*. Australian Soil and Plant Analysis Council, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 187–220.
- Mora, F., & Meza, V. (2004). *Comparación del Crecimiento en Altura de la Teca (Tectona grandis) en Costa Rica con otros Trabajos Previos y con otras Regiones del Mundo*. Seminario y Grupo de Discusión Virtual en Teca (*Tectona grandis* L.). Heredia, Costa Rica.
- Morris, D.M., Kimmins, J.P., & Duckert, D.R. (1997). The use of soil organic matter as a criterion of the relative sustainability of forest management alternatives: A modeling approach using FORECAST. *Forest Ecology and Management*, 94, 61-78.
- Müller, T., & Höper, H. (2004). Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. *Soil Biol. Biochem*, 36, 877–888.
- Muñoz, J., Martínez, L., & Giraldo, R. (2006). Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*, 24(2), 355-366.
- Navas, M., Rodríguez, B., & Masaguer, A. (2011). Effect of five forage legume covers on soil quality at the Eastern plains of Venezuela. *Applied Soil Ecology*, 49, 242-249.
- Noble, A. D., Gillman, G. P., & Ruaysoongnern, S. (2000). A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics. *European Journal of Soil Science*. 51, 233-243.
- NOM-021-RECNAT (2000). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. *Estudios, muestreo y análisis*. Revisado el 01 de Agosto de 2012 desde Internet: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/509/analisis.pdf>
- Nwoboshi, L.C. (1984). Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. *Forest Scienc*, 30, 35-40.
- Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez, B., & García, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agro-ecosistemas ecológicos. *Inicio a la investigación*, 10.

- Oliveira, J. (2003). Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem de povoamentos de teca- NUTRITECA. Tesis Maestría. Viçosa, Brasil, Universidad Federal de Viçosa. 79 p.
- Ombina, C. (2008). *Soil characterization for Teak (Tectona grandis) plantations in Nzara District of South Sudan*. Thesis Master of Forest Science, Department of Forestry, Stellenbosh Univerity, South Africa.
- Pang, X.Y., Bao, W.K., & Zhang., Y.M. (2006). Evaluation of soil fertility under different *Cupressus chengiana* forests using multivariate approach. *Pedosphere*, 16(5), 602-615
- Parkin, T.B., Doran, J.W., & Franco, E. (1996). Field and laboratory tests of soil Respiration, 231-246. In: Doran, J.W., & Jones, A.J. (eds.) *Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America Special Publication*. Madison, 49.
- Porta C.J., López, R.M., & Roquero, D.C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. (3ª ed.). España.
- Pramod, K. S. (2009). *Nutrient dynamics of Teak plantations and their impact on soil productivity - A case study from India*. Ponencia presentada en el XIII World Forestry Congress, Buenos Aires, Argentina.
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3), 325-334.
- Ramos, E., & Zúñiga, D. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*. 7 (1-2), 123-130.
- Rendón, S., Artunduaga, F., Ramírez, R., Quiroz, J.A., & Leiva, E.I. (2011). Los Macroinvertebrados como Indicadores de la Calidad del Suelo en Cultivos de Mora, Pasto y Aguacate. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1) ,5793-5802.
- Rezaei, S.A., Gilkes, R.J., Andrews, S.S. (2004). A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. 13 International soil Conservation Organization Conference – Brisbane. Paper 605, 1-6.
- Rezaei, S.A., Gilkes, R.J., Andrews, S.S., Arzani, H. (2005). Soil quality assessment in semiarid rangeland in Iran. *Soil Use and Management*. 21, 402-409.
- Romanyà, J., Rovira, P., Vallejo, R.V., & Sanz, M (2003). *La materia orgánica en el suelo*. Trabajo presentado en el Seminario de gestión ambiental realizado en el Hotel Ciudad de Tarragona, Tarragona, España. Desde Internet: <http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/Tarragona%20170603/ROMANY.pdf>
- Rongjiang Y., Jingsong Y., Peng G., Jianbing Z., Wenhui J. (2013). Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil & Tillage Research*. 128, 137 – 148.

- Ruzek, L., Vorisek, K., Strnadova, S., Novakova, M., Barabasz, W. (2004). Microbial characteristics, carbon and nitrogen content in cambisols and luvisols. *Plant Soil Environ.* 50, 196–204.
- Sampat, G. (1991). Física de suelo principios y aplicaciones. *Editorial Limusa*, México.
- Sánchez, A. (1994). *Crecimiento de Eucalyptus deglupta y Eucalyptus grandis bajo tres sistemas de plantación a nivel de finca en la zona de Turrialba, Costa Rica*. Tesis Magister UCR, CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Sánchez, F., Rodríguez, R., Rojo, A., & Álvarez, J. (1998). Resultados preliminares del estudio de curvas de calidad de estación y de los factores ecológicos implicados en la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Galicia (España). En: Actas del primer Congreso Latinoamericano I.U.F.R.O., *Manejo sostenible de los recursos forestales, desafío del siglo XXI*. Valdivia, Chile.
- Sánchez, F., Rodríguez, R., Español, E., López, C.A., Merino, A. (2002). Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in north-western Spain. *Forest Ecology and Management*, 171(1-2), 181-189.
- Sánchez, M., Soriano, M., Delgado, G., & Delgado, R. (2002). Soil quality in Mediterranean mountain environments: Effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 948-958.
- Saña, J., More, J.C., & Cohi, A. (1996). *La gestión de la fertilidad de los suelos*. (Eds). MAPA, Madrid, España.
- Shukla, M., Lal, R., Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87, 194–204.
- Scolforo, J. R. S. (1997). Biometría Florestal. *Métodos para classificação de sítios florestais*. Lavras – UFLA/FAEPE, 151.
- SQI-Soil Quality Institute. (1996). *Indicators for Soil Quality Evaluation*. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Stocking, M.A. (2003). Tropical soils and food security: the next 50 years. *Science* 302,1356–1359.
- Thiele, H. (2008). *Variables edáficas que afectan el crecimiento de la Teca (Tectona grandis L.f) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica*. Tesis M.Sc. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., & Carter, M.R. (1997). Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., & Carter, M.R. (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science, Elsevier*, 25, 21-58.

- Torrán, E. (2007). *Impacto de las plantaciones de Eucalyptus grandis sobre el contenido de humedad del suelo. Análisis de un caso en el Noreste de la Provincia de Entre Ríos*. Tesis de Magister, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Concepción del Uruguay, Uruguay.
- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*: Buenos Aires: (CRN-CNIA-INTA, 82): Luters, A., & Salazar, J.C., 49, 59-67.
- Vaides. E.E. (2004). *Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (Tectona grandis L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala*. Memoria para optar al Título de Maestría en Ciencias sobre Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Centro Agronómico Tropical de investigación y enseñanza .Programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Vallejos, B.O. (1996). *Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para Tectona grandis L.f., Bombacopsis quinatum (Jacq), Dugand y Gmelina arborea Roxb, en Costa Rica*. Tesis Magister Scientiae. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Vásquez, W., Ugalde, L.A. (1994). *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea Roxb., Tectona grandis L.F., Bombacopsis quinatum (Jacq.) Dugand y Pinus caribaea en Guanacaste, Costa Rica*. Informe final, Convenio de Cooperación Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO). (Proyecto Madeleña-3). Turrialba.
- Vergara, M.A. (2003). *Identificación y Selección de Indicadores de Calidad del Suelo y Sostenibilidad en Sistemas Naturales y Agrícolas de Laderas en Oaxaca*. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Warkentin, B. P. (1995). The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50, 226-228.
- Yanbing, Q., Jeremy, L.D., Biao, H., Yongcun, Z., Weixia, X., Zhiquan, G. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149, 325-334.
- Yemefack, M., Jetten, V., Rossiter, D. (2006). Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation system. *Soil & Tillage Research*. 86, 84-98.
- Zech, W., Drechsel, P. (1991). Relationships between growth, mineral nutrition and factors of teak (*Tectona grandis*) plantation in the rainforest zone of Liberia. *Ecology Management*, 41, 221-235.
- Zúñiga, O., Cuero, R., Erazo, E., Torres, R., & Dávila, G. (2006). *Determinación del potencial productivo del suelo en un cultivo de yuca a partir de la medición de la conductividad térmica y resistividad eléctrica del suelo en el norte del Cauca*. XIII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo Ponencia, Colombia.