

**ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN PLANTACIONES DE
*Eucalyptus grandis***



DUBAL FERNEY PAPAMIJA MUÑOZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2012**

**ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN PLANTACIONES DE
*Eucalyptus grandis***



DUBAL FERNEY PAPAMIJA MUÑOZ

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación, como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Forestal**

**Director:
CATALINA GARCÍA SOLÓRZANO M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2012**

Nota de aceptación:

El director y los jurados han leído el presente trabajo, han escuchado la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio.

Oscar Darío Bermúdez M.Sc.
Presidente del jurado

Román Ospina M.Sc.
Jurado

Catalina García Solórzano M.Sc.
Director

Popayán 20 de febrero de 2012

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, estar siempre conmigo y permitirme hacer de ella toda una aventura llena de experiencias.

A mis padres por el apoyo, comprensión, paciencia, amor incondicional y el gran esfuerzo que realizaron para que llegara a ser quien soy, hoy en día.

A mis hermanos por sus consejos y apoyo continuo en todo momento y situación.

A todos mis familiares por su apoyo y fortaleza brindada.

A mis profesores por todas sus enseñanzas y consejos.

A todas y cada una de las personas que aprecio y quienes representan parte importante de mi vida.

A todos gracias por proporcionarme la motivación para seguir adelante y por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al departamento de investigación forestal de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, por brindarme la oportunidad de realizar mi investigación en sus plantaciones forestales y por darme el apoyo para que la investigación fuese posible.

Agradezco a mi director de tesis, Catalina García Solórzano, por brindarme su apoyo, colaboración y ayudarme a resolver las dudas e interrogantes presentados.

A los ingenieros Marcela Zapata y Mauricio Zapata, quienes fueron las personas que me guiaron y asesoraron durante todo el proceso de la investigación.

Al ingeniero Héctor Chica Ramírez, quien me dio la preparación y las instrucciones para el manejo del Plant Canopy Analyzer.

A cada uno de los auxiliares de campo quienes me colaboraron y me acompañaron a los diferentes sitios de medición.

Mi gratitud a los profesores Juan Pablo Paz, Román Ospina, Juan Carlos Villalba y demás, quienes me brindaron un poco de su tiempo para guiarme en la resolución de dudas.

A mi familia en especial a mi Mamá, Papá y Abuela, quienes siempre estuvieron pendiente de mi progreso de formación, a mis amigos por el apoyo en todo el proceso de mi investigación y por estar siempre pendientes de mi avance para lograr presentar hoy este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
GLOSARIO	15
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 ANTECEDENTES	18
1.2 MARCO CONCEPTUAL	19
1.2.1 Generalidades del <i>Eucalyptus grandis</i>	19
1.2.2 El índice de área foliar en los procesos fisiológicos.	20
1.2.3 Métodos para la estimación del índice de área foliar	22
2. METODOLOGÍA	24
2. 1 ÁREA DE ESTUDIO	24
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES	25
2.3 INFORMACIÓN DASOMÉTRICA	28
2.4 MODELO MATEMÁTICO	28
2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	30

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR CON EL PLANT CANOPY ANALYZER Y EL PIPE _{cv}	31
3.1.1 Estimación del índice de área foliar en la finca Chupillauta	31
3.1.2 Estimación del índice de área foliar en la finca Don Miguel	32
3.1.3 Estimación del índice de área foliar en la finca Pital	34
3.1.4 Estimación del índice de área foliar en la finca Rancho Grande	36
3.2 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A TRAVÉS DEL MODELO MATEMÁTICO.	40
3.3 RELACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ESTIMADO CON EL MODELO MATEMÁTICO CON PCA Y PIPE _{cv} .	42
4. CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	51
LITERATURA CITADA	52

LISTA DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1. Tratamientos y porcentaje de aplicación de los fertilizantes nitrógeno, fósforo y boro empleados en la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> , en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	19
Cuadro 2. Promedio del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> , para cada tratamiento en la finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	32
Cuadro 3. Promedio del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> para cada tratamiento en la finca Don Miguel de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	33
Cuadro 4. Promedio del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> para cada tratamiento en la finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	34
Cuadro 5. Promedio del LAI en <i>Eucalyptus grandis</i> , para cada tratamiento en la finca Rancho Grande de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	36
Cuadro 6. Valores máximos, mínimos y promedios del índice de área foliar estimados con el método de PCA y PIPEcv, para la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> .	38
Cuadro 7. Análisis de varianza ANOVA, relacionando el software PIPEcv y el Plant Canopy Analyzer para la estimación del índice de área foliar, en la interacción con los tratamientos y las fincas, en las plantaciones de <i>Eucalyptus grandis</i>	39
Cuadro 8. Parámetros estadísticos de la regresión lineal realizada a las metodologías del Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv con la precipitación.	39
Cuadro 9. Valor máximo, mínimo y promedio de índice de área foliar para la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> , estimados a través del modelo matemático.	42

Cuadro 10. Índices de área foliar promedio, para las metodologías del PIPEcv, PCA y modelo matemático en cada una de las fincas para *Eucalyptus grandis*. 45

Cuadro 11. Resultado de los modelos de regresión lineal en la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*, para el modelo matemático vs el software PIPEcv y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer, para los tratamientos (fertilizado y no fertilizado). 47

Cuadro 12. Análisis de varianza, relacionando el modelo matemático con respecto a la metodología del Plant Canopy Analyzer, teniendo como factores las fincas y tratamientos, para la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*. 48

Cuadro 13. Análisis de varianza, relacionando el modelo matemático con respecto a la metodología del PIPEcv, teniendo como factores, los tratamientos fertilizados y no fertilizados en la plantación de *Eucalyptus grandis*. 48

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Representación esquemática de los anillos concéntricos del PCA, divididos en los diferentes ángulos de mira del lente.	21
Figura 2. Capacitación y práctica para el manejo del Plant Canopy Analyzer, en plantaciones de <i>Eucalyptus grandis</i> en el Municipio de Restrepo Valle.	25
Figura 3. Secuencia ingresada al Plant Canopy Analyzer, para la estimación del índice de área foliar en las plantaciones de <i>Eucalyptus grandis</i> .	25
Figura 4. Modelo de la parcela donde se realizaron las mediciones con el PCA y toma de las fotografías, para realizar la estimación del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> .	26
Figura 5. Toma de las fotografías digitales en la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas en las fincas de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	27
Figura 6. Fotografía plana tomada en la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> y procesada en el Software PIPEcv	27
Figura 7. Proceso de deshoje, recolección y marcación de bolsas, para pesar el total de hojas y tomar la muestra de hojas de <i>Eucalyptus grandis</i> .	28
Figura 8. Escáner utilizado para medir el área foliar de <i>Eucalyptus grandis</i> .	29
Figura 9. Comportamiento del LAI en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas de <i>Eucalyptus grandis</i> , en la Finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	32
Figura 10. Comportamiento del LAI en <i>Eucalyptus grandis</i> en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas, en la Finca Don Miguel de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	33

Figura 11. Comportamiento del LAI en <i>Eucalyptus grandis</i> en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas, en la Finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	35
Figura 12. Árboles de <i>Eucalyptus grandis</i> afectados por la caída de rayos en la finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	35
Figura 13. Árboles de <i>Eucalyptus grandis</i> afectados por la caída de rayos en la finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	36
Figura 14. Comportamiento del LAI en <i>Eucalyptus grandis</i> en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas, en la Finca Rancho Grande de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	37
Figura 15. Relación entre el Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv, para la estimación del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> .	39
Figura 16. Diagrama de dispersión de los diámetros de los árboles con respecto a su área foliar y curva trazada por el modelo matemático exponencial.	41
Figura 17. Relación del modelo matemático para estimar índice de área foliar frente al Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv en <i>Eucalyptus grandis</i> en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia.	43
Figura 18. Diagramas de dispersión de índice de área foliar estimado con el método del modelo matemático vs el software PIPEcv (A) y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer (B), para el tratamiento fertilizado en la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> .	45
Figura 19. Diagramas de dispersión de índice de área foliar estimado con el método del modelo matemático vs el software PIPEcv y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer respectivamente, para el tratamiento no fertilizado en la plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> .	46

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Formato para la organización de los datos de estimación de índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> .	57
Anexo B. Comparación del comportamiento del índice de área foliar de <i>Eucalyptus grandis</i> , estimado con el Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv.	58
Anexo C. Comportamiento del índice de área foliar en <i>Eucalyptus grandis</i> en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia, respecto a la precipitación.	59

RESUMEN

Se realizó la estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* de cuatro fincas, tres fincas, ubicadas en el Municipio de Popayán, Cauca y una ubicada en el Municipio de Restrepo, Valle del Cauca, todas propiedad de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia; cada finca presentaba tres parcelas fertilizadas y tres parcelas no fertilizadas, con 64 individuos cada parcela. Para dicha estimación se utilizaron tres metodologías, la primera de ellas fue, Plant Canopy Analyzer, el segundo método fue fotografía plana a través del software PIPEcv y la tercera metodología fue realizada a través de un método destructivo, con el cual se generó un modelo matemático. Para las dos primeras metodologías se realizaron mediciones bimensuales durante un año, y para el último método se realizó una clasificación diamétrica para cortar los árboles en la última medición. Las mediciones bimensuales se realizaron en todas las parcelas de cada una de las fincas en horas de la mañana con el fin de minimizar el efecto de la luz en los resultados; las fotografías fueron tomadas con una cámara digital a una altura de 1.30 metros en el centro de cada cuatro árboles; para el caso del Plant Canopy Analyzer se introdujo una secuencia que constaba de un punto A y diez puntos B, esta secuencia se repitió tres veces, con el fin de hacer un barrido completo de la parcela. Junto a las mediciones realizadas se tomaron datos de los diámetros de los árboles pertenecientes a las parcelas a fin de usarlos en la formulación del modelo matemático para realizar la estimación del índice de área foliar. Las estimaciones del índice de área foliar para el caso del Plant Canopy Analyzer, estuvieron entre 0,82 y 3,91 con un promedio para el periodo de medición de 2,01; para el software PIPEcv entre 1,15 y 5,03 con un promedio de 3.12 y finalmente con el modelo matemático estuvo en un rango entre 1,62 y 3,80 con un promedio de 2,83; esto corresponde a los promedios y rangos de índice de área foliar, obtenidos con cada metodología en el total de fincas. Finalmente se realizaron análisis estadísticos, los cuales permitieron establecer que las tres metodologías desarrolladas en la investigación no guardaron ningún tipo de relación

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, Índice de área foliar, Plant Canopy Analyzer.

ABSTRACT

It was carried out an estimate of the leaf area index on the plantations of *Eucalyptus grandis* in four farms, three of them located in the Municipality of Popayan Cauca and the other one in the Municipality of Restrepo Valle del Cauca, all of them property of the enterprise Smurfit Kappa Cartón de Colombia; each presented three fertilized plots and three non-fertilized plots; with 64 individuals each plot. For such estimate it was used three methodologies, the first one was, Plant Canopy Analyzer, the second method was the plane photography using the PIPEcv software, and the third methodology was the one carried out through a destructive method with which it was generated a mathematical model. For the two first methodologies we did bimonthly measurements throughout a year, and for the last method we did a diametric classification in each of the farms and we cut the trees on the last measurement. Bimonthly measurements were performed on all parcels for each farm in the morning to minimize the effect of light on the results, the photographs were taken with a digital camera at a height of 1.30 meters in the center of each four trees, for the case of Plant Canopy Analyzer was introduced a sequence consisting of a point A and ten points B, this sequence is repeated three times to make a complete sweep of the plot. Along with the measurements data were taken from the diameters of the trees of the plots to use in formulating the mathematical model for estimating the leaf area index. Estimates of leaf area index for the case of Plant Canopy Analyzer, were between 0.82 and 3.91 with an average for the period of measurement of 2.01, for software PIPEcv between 1.15 and 5.03 with an average of 3.12 and finally with the mathematical model ranged between 1.62 and 3.80 with an average of 2,83, this corresponds to the averages and ranges of leaf area index, obtained with each method of total farms. Finally, statistical analyzes, which established that the three methodologies developed in the investigation did not keep any relationship

Key Words: *Eucalyptus grandis*, Leaf area index, Plant Canopy Analyzer.

GLOSARIO

Área foliar: El área foliar de una planta se refiere a la cantidad de superficie de hoja que ella posee

Análisis de varianza. Es una técnica estadística diseñada para medir si existen diferencias entre los valores medios de una variable dependiente calculados para los distintos grupos que se pueden obtener con otra variable independiente y nominal.

Coefficiente de correlación r . Es la medida de la intensidad de la relación existente entre dos variables.

Coefficiente de determinación r^2 . Mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente Y respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. En otros términos, indica la magnitud de cambio de la variable dependiente Y, que se puede atribuir al cambio en la variable independiente X.

Diagrama de dispersión. Es una gráfica realizada trazando puntos en un plano coordenado de acuerdo con los valores de pares de datos observados para mostrar la relación entre dos variables cuantitativas.

Diseño experimental. Es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas qué variables hay manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relación de causa-efecto.

Índice de área foliar: Se define como unidades de superficie de hoja verde (en metros cuadrados) por unidad de superficie de terreno (en metros cuadrados), por tanto es una unidad adimensional.

Modelo matemático. Es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones

sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

PIPEcv. Es un software propiedad de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, utilizado para realizar estimaciones de índice de área foliar a través del procesamiento de imágenes como la fotografía plana.

Plant Canopy Analyzer. Es un instrumento utilizado para realizar estimaciones del índice de área foliar, a través de la interceptación de luz (320 y 490nm) por medio de 5 ángulos cenitales con los cuales se hacen las mediciones por encima y por debajo del dosel.

Significancia estadística. Se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o "falso positivo"). La decisión se toma a menudo utilizando el valor P (o p-valor): si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado.

INTRODUCCIÓN

Los diferentes ecosistemas boscosos nativos y cultivados presentan una estructura foliar denominada dosel; conformado básicamente por el conjunto de las copas de los árboles que lo componen (Cabrelli *et al.*, 2004). Dicha estructura varía dependiendo del tipo de bosque tanto en el plano horizontal como vertical y de características como, la composición florística, densidad, distribución espacial de los árboles, tipo de copa, estado fenológico de las especies, edad y manejo (Lieberman *et al.*, 1989; Pukkala *et al.*, 1991). El dosel forestal está directamente relacionado con la atenuación de la cantidad de Radiación Fotosintéticamente Activa (RAFA) que llega al piso del bosque (Pukkala *et al.*, 1991) de ahí que el índice de área foliar (LAI) sea un indicador de la producción de un bosque; así como también es ampliamente reconocido que bajo el dosel de un bosque, se genera un microclima que se halla fuertemente regulado por la cantidad y calidad de radiación solar que ingresa al mismo (Hutchison y Matt, 1977; Chazdon y Fetcher, 1984; Kellomaki *et al.*, 1985; Poulson y Platt, 1989; Canham *et al.*, 1990), presentando a nivel del suelo una alta variabilidad espacial y temporal (Pukkala *et al.*, 1991, Hardy *et al.*, 2004).

En el caso de las plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis*, la estructura foliar se encuentra de una forma más ordenada y homogénea, debido al cuidado y manejo silvicultural dado durante todo el período de siembra, hasta el momento de la cosecha; en las plantaciones de *Eucalyptus grandis* el LAI varía principalmente por variables como, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, condiciones y calidad de luz, estado fitosanitario y de desarrollo del árbol. La siguiente investigación tuvo como objetivos, la estimación del LAI a través de dos métodos indirectos (Plant Canopy Analyzer 2000 y fotografía plana), buscar un factor de conversión que permitiese ajustar la metodología de la fotografía plana vs el Plant Canopy Analyzer 2000, realizar una prueba destructiva con el fin de validar la información recolectada en campo con los dos métodos mencionados y formular un modelo matemático para estimar el LAI.

El modelo matemático relacionó el diámetro en centímetros, a la altura de 1.30 metros y el área foliar de cada árbol, con el fin de establecer un modelo que permitiera obtener el índice de área foliar de una forma rápida y confiable. Resulta interesante estudiar el comportamiento del LAI, ya que es un indicador de producción de la plantación. Uno de los problemas más difíciles de resolver en la investigación, fue la de desarrollar la metodología, puesto que el principal equipo (PCA) utilizado para la experiencia, está diseñado para estimar LAI, en cultivos agrícolas de bajo porte y las plantaciones alcanzan alturas de más de 30 metros.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

Las limitaciones nutricionales en plantaciones forestales ocurren cuando las demandas de nutrientes de las especies no pueden ser suplidas por el suelo sobre el cual crecen. Cuando se considera la forma como los niveles de uso de nutrientes cambian con el tiempo y como la disponibilidad de los mismos varían a lo largo de las etapas de desarrollo, se observa falta de sincronía entre las ofertas de nutrientes presentes en el suelo y las demandas de las plantaciones por los diferentes elementos nutritivos (Allen *et al*, 1990)

A medida que el suministro y la disponibilidad de nutrientes disminuyen, también lo hacen el desarrollo del área foliar (copas) y la producción de madera. En este punto la tasa de crecimiento pasa a ser regulada y limitada por las cantidades de los nutrientes contenidos en las hojas y otros tejidos jóvenes. Por lo anterior no resulta sorprendente que plantaciones de eucaliptos entre 2 y 4 años muestren respuestas importantes a adiciones de nutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y boro.

Por tal razón SKCC ha desarrollado una serie de ensayos para evaluar el efecto de la fertilización en el mantenimiento de plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis*, iniciando con los estudios de dosis y frecuencias de fertilización intensiva y luego aplicando el tratamiento que tuvo un mejor efecto en la productividad en otra serie de ensayos. De todo un conjunto de ensayos, se realizó un análisis preliminar, de donde se seleccionaron 3 estudios para evaluar a la edad del turno y el efecto del manejo intensivo comparado con un testigo.

En cada uno de los sitios se estableció un estudio con diseño en bloques completamente al azar generalizados y dos tratamientos T1= 0 fertilizante o tratamiento control y T2 = fertilización; de los ensayos de fertilización se definió que, de la cantidad aplicada de nitrógeno se le debía sacar el 10% para saber la dosis de fósforo y del 1% para el boro. Es decir en las fincas de SKCC, se están aplicando 180kg de Nitrógeno (correspondiente al 100%), 18Kg de Fósforo (correspondiente al 10%) y 1,8 kg de Boro (correspondiente al 1%) cada 24 meses como se muestra en el cuadro 1, con parcelas de establecimiento de 14*14 árboles y parcelas de medición de 8*8 árboles; éstas cantidades son aplicadas por hectárea.

En Colombia la estimación del índice de área foliar en plantaciones es un tema nuevo y más específicamente en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, únicamente el Centro de Investigación Nacional del Café CENICAFE ha realizado experiencias de la estimación de LAI en cultivos de café. En otros países como Australia, Costa Rica, Canadá, se han realizado diferentes tipos de estudios para estimar el LAI

con el Plant Canopy Analyzer 2000, pero se han utilizado para comparar y ajustar otros métodos, como la fotografía hemisférica (Zhang *et al*, 2005), imágenes satelitales (Cifuentes, 1999; Berger *et al*, 2009) y métodos destructivos (Macfarlane *et al*, 2007; Gonsamo y Pellikka 2008), pero no para ajustar el método de fotografía plana.

Cuadro 1. Tratamientos y porcentaje de aplicación de los fertilizantes nitrógeno, fósforo y boro empleados en la plantación de *Eucalyptus grandis*, en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

Tratamiento	Nitrógeno (N) (100%)	Fósforo (P) (10%)	Boro (B) (1%)
Tratamiento 1 (Control)	0 Kg/ha	0 Kg/ha	0 Kg/ha
Tratamiento 2 (Fertilización realizada cada 24 meses)	180 Kg/ha	18 Kg/ha	1.8 Kg/ha

1.2 MARCO CONCEPTUAL

1.2.1 Generalidades del *Eucalyptus grandis*. El *Eucalyptus grandis* se encuentra naturalmente entre 32 y 17° de Latitud Sur en la región costera de Queensland y en el Nuevo Gales del Sur (Australia), en un rango altitudinal desde 0 hasta 900 m, con precipitación media anual entre 1.000 y 1.780 mm, una estación seca de tres meses en promedio y temperatura máxima de 35°C y mínima de 5°C.

Se ha introducido en África, Asia, América del Sur y América Central, gracias a su rápido crecimiento, productividad y adaptabilidad, ha permitido su introducción en sitios de una variada oferta ambiental como en el bosque seco tropical (bs-T), bosque húmedo tropical (bh-T), bosque húmedo pre-montano (bm-PM), bosque muy húmedo premontano (bmh- PM) y bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (Conif, 2002).

En Colombia crece bien entre 1.000 y 2.000 m.s.n.m., y es una de las especies forestales más cultivadas en los Departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Caldas, Risaralda y Antioquia. Por su alta productividad es la especie preferida para la producción de pulpa de fibra corta. En el país se tienen plantaciones con fines comerciales en un área de 15.984 hectáreas (Ospina, *et al.*, 2006)

1.2.2 El índice de área foliar en los procesos fisiológicos. La composición estructural del dosel desempeña un papel muy importante para describir los flujos de masa y de cambio de energía en los ecosistemas forestales (Eschenbach y Kappen, 1996). El dosel está directamente relacionado con numerosos procesos del ecosistema; este es el responsable de modificar las condiciones microclimáticas y de radiación solar principalmente en el subdosel, por lo tanto interviene en la fotosíntesis y las tasas de evapotranspiración (Cutini *et al*, 1998). El índice de área foliar o Leaf Area Index (LAI), es un parámetro usualmente usado para cuantificar las propiedades del dosel, y de las hojas en los cultivos agrícolas. El LAI se puede definir como el área de hoja verde por unidad de área de terreno (m^2/m^2 por tanto es una unidad adimensional) pudiéndose valorar como total (ambas caras) o proyectada (superficie capaz de interceptar la radiación). La relación entre total y proyectada es de 2.0 para las especies de hoja ancha y oscila entre 2 y 3 para las hojas en forma de acículas, con valores típicos entre 2.4 y 2.6. (Waring *et al*, 1992)

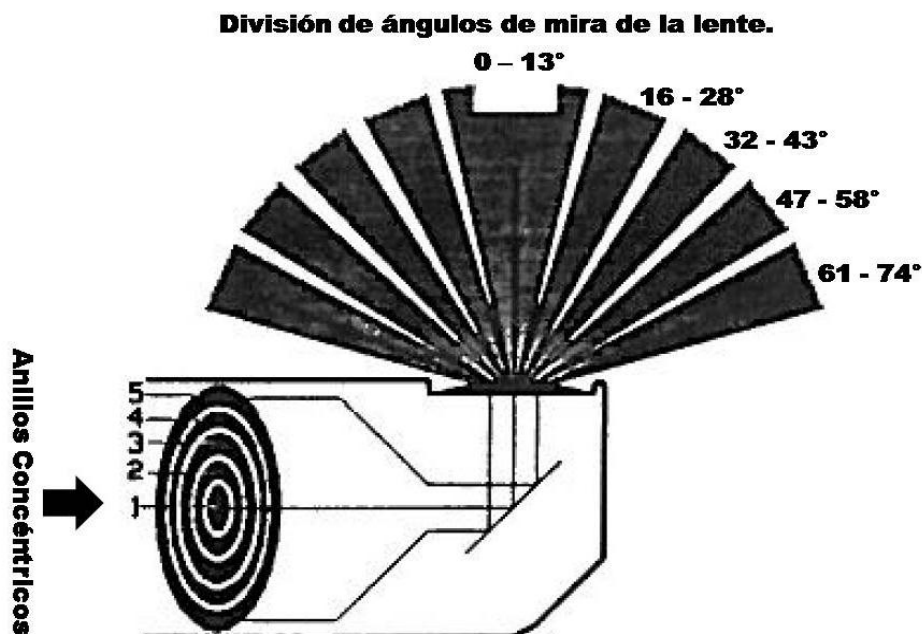
El LAI interviene en las ecuaciones que ayudan a describir muchos de los procesos físicos y químicos de un dosel vegetal (Landsberg y Waring, 1997) por lo que es utilizado frecuentemente en los modelos de simulación de los procesos fisiológicos. Aun así siendo una medida tan importante, es un parámetro difícil de medir, debido a la falta de metodologías y a la altura que los árboles alcanzan durante su vida. Hay métodos directos e indirectos que permiten estimar el LAI; el método directo hace referencia al método destructivo, para lo cual se debe realizar la tala del árbol, tomar las hojas y medir a cada una de ellas su área, con el fin de estimar el LAI. Entre los métodos indirectos están las imágenes satelitales, fotografía digital hemisférica, y el Plant Canopy Analyzer 2000 (PCA, Licor Inc); estas medidas indirectas se han desarrollado como respuesta a las dificultades que se presentan para la estimación directa del LAI sobre todo en bosques naturales y plantados, donde la altura de los árboles y la densidad de los mismos, hace que no sea fácil la medición de la variable, estas condiciones limitan las investigaciones relacionadas con este parámetro, ya que no permiten realizar una medición rápida y confiable, como se hace o efectúa en los cultivos agrícolas, los cuales son de porte bajo.

Las técnicas de estimaciones indirectas del LAI se fundamentan en que el follaje del bosque se supone está distribuido al azar y el dosel es homogéneo; aunque el follaje en las direcciones horizontal y vertical no está distribuido al azar, debido a que su distribución responde a las condiciones de luz ofrecidas en el bosque (Terborgh, 1985; Chazdon, 1988). El PCA 2000 fue diseñado para estimaciones no destructivas y para áreas de hojas continuas del dosel. Este instrumento estima el LAI por la probabilidad de contactos usando la luz como una sonda, con un sensor fabricado para sentir la presencia de follaje (Welles y Norman, 1999). Varios modelos de la transmisión de dosel están disponibles, éstos se extienden en la complejidad de modelos de un parámetro simple que asume que el follaje se distribuye al azar hasta modelos más complejos que distinguen entre la luz

directa y difusa, que explican la variación en distribuciones del ángulo de la hoja, y se adaptan a la posición del sol en el momento de la medida. (Nel y Wessman, 1993; Fassnacht *et al*, 1994; Balster y Marshall, 2000).

Las medidas ligeras del PCA son hechas usando cinco anillos de silicio concéntricos (Fig.1) que reciben luz, probando cinco sectores de cielo concéntricos (con el ángulo de cenit central) de 0 - 13°, 16 - 28°, 32 - 43°, 47 - 58°, 61 - 74°, respectivamente y recibe la radiación del cielo (<490 nm para minimizar efectos que se dispersan) por una lente hemisférica (Planchais y Pontailier, 1999). El LAI es estimado por la diferencia de radiación solar, es decir por el diferencial de sombra que se da simultáneamente para cada sector del cielo, ya que se realiza una medición arriba del dosel (cielo libre) y otra abajo del dosel (Li-Cor, 1992).

Figura 1. Representación esquemática de los anillos concéntricos del PCA, divididos en los diferentes ángulos de mira de la lente.



Fuente: Manual Li-Cor 2000

En el manejo forestal, el índice de área foliar (LAI) puede efectivamente ser usado como indicador de crecimiento, donde bajos valores de índice de área foliar indican baja productividad (Peduzzi, 2007). Además del vínculo que hay entre el LAI y la producción forestal, hay otras relaciones y procesos ecológicos, como la evapotranspiración y el ciclo de nutrientes. Debido a su importancia en muchos

procesos ecológicos, varias investigaciones se han focalizado en desarrollar herramientas para estimar el LAI (Flores *et al*, 2006).

La importancia del área foliar y la interceptación de la luz por un cultivo se ve reflejada en muchas prácticas agronómicas que se realizan (Lallana, 1999) (determinación de una apropiada densidad y distribución uniforme de plantas, fertilización, riego, entre otras). Otro aspecto importante en la interceptación de la luz, es la arquitectura foliar de la planta, es decir cómo están distribuidas las hojas en relación al tallo y su inclinación respecto a la vertical (Gimenez, 1992).

Resumiendo se puede decir que la cosecha es el resultado de la eficacia que el cultivo tenga en la interceptación (superficie foliar) y utilización (fotosíntesis) de la radiación solar durante el periodo de crecimiento. La superficie foliar da idea de la magnitud del sistema fotosintético y de su distribución espacial depende la eficiencia de captación de energía lumínica. Lo expuesto justifica la importancia de conocer el área foliar de una planta o un cultivo, que además de imprescindible en cualquier estudio de fisiología vegetal, es parte esencial en el estudio del crecimiento (Lallana, 1999).

En el mundo, la utilización del género *Eucalyptus* en plantaciones forestales cada día se hace más importante en la industria, debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad y facilidad de mejoramiento genético, de ahí la importancia de conocer su comportamiento en cuanto a crecimiento y procesos físico-químicos, los cuales se pueden simular y/o saber haciendo muy buenas estimaciones del LAI.

1.2.3 Métodos para la estimación del índice de área foliar. Los métodos para determinar el índice de área foliar se clasifican según el tratamiento que se les dé a las muestras (Ginzo, 1968; Fernández *et al*, 1989; Castillo, 1994) y en general se pueden clasificar en métodos destructivos, métodos de estimación y métodos no destructivos.

Métodos destructivos. En estos métodos se requiere arrancar las hojas de las plantas, es decir requieren la destrucción completa de la muestra objeto de estudio. La mayoría de esos métodos se desarrollan en laboratorio y entre los más comunes podemos citar el método del planímetro, dibujo de las hojas sobre el papel milimetrado y método gravimétrico.

Métodos de estimación: Estos métodos se basan en la demostración de una relación matemática entre alguna característica biométrica de la hoja (longitud, ancho, diámetro, etc) o de biomasa (peso fresco o seco de una sección de hoja o de todas las hojas) y el área foliar. A partir de un elevado número de determinaciones se establecen modelos matemáticos que resumen en una

ecuación el cálculo del área foliar, normalmente a partir de una sola medida (longitud, ancho medio, materia seca de la hoja).

Métodos no destructivos. En esta categoría se incluyen aquellos métodos que pueden ser usados en campo sin necesidad de destruir la muestra (arrancar las hojas). Algunos han sido derivados de los métodos de laboratorios, en particular los comentados en los métodos de la estimación a través del uso de plantillas con medidas lineales (Kieffer y Lallana, 1989) o bien el uso de formatos de hojas estándar y su correspondiente área. Otros métodos se basan en el uso de un planímetro fotoeléctrico por donde se pasan las hojas y el área es estimada en forma directa a través de la integración de su superficie. Este aparato posee una o varias fotoceldas en la que es necesario que la luz se difunda de manera uniforme. El planímetro transforma la cantidad de luz interceptada por la hoja en una medida de superficie con un error menor a 1mm^2 por determinación. Uno de los inconvenientes de este método es el tamaño de la caja del sensor por donde tiene que pasar la hoja para interceptar la luz emitida, pudiendo resultar pequeña en relación a hojas de gran tamaño. Estos equipos son de altísimo costo y se presentan en versiones de laboratorio y de campo (Li-cor, 1992). El uso del equipo en laboratorio implica la destrucción de la planta, haciendo pasar las hojas una a una. En campo, en el caso de algunas especies (hojas de ancho medio no mayor a 12,7cm y 1mm de longitud máxima) es posible calcular el área foliar sin destruir la planta (Giménez, 1999).

Con el desarrollo de la informática hoy se abren nuevas posibilidades para la medición del área foliar. En este sentido el desarrollo de escáneres manuales y posteriormente de página completa, permiten copiar imágenes con precisión cualquiera sea su forma y transformación en señales digitales.

Otra de las formas de realizar el cálculo del área foliar es por medio de la fotografía hemisférica (Zhang *et al*, 2005), fotografía plana (a través del software PIPEcv) y en última instancia a través de las imágenes satelitales (Cifuentes, 1999; Berger *et al*, 2009).

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló dentro de cuatro fincas pertenecientes a la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia en los Departamentos del Valle del Cauca y el Cauca. La ubicación de los ensayos fue preestablecida por la empresa y ubicados en las parcelas donde ya se habían desarrollado los ensayos de fertilización y se tenían además las plantaciones de control; es decir aquellas que no habían recibido ningún tratamiento químico o de fertilización. La caracterización general de los lugares de estudio se presenta a continuación.

Finca “Chupillauta” (latitud 2° 31' 01" N y Longitud 76° 37' 17" W) ubicada a las afueras del sector urbano de Popayán, correspondiente al subnúcleo forestal Chupillauta así denominado por la empresa SKCC, se encuentra a 1736,3 m.s.n.m. y una precipitación promedio de 2177 mm anual. La finca está situada sobre la unidad de suelos Pubenza.

Finca “El Pital” (latitud 2° 35' 43" N y Longitud 76° 35' 15" W) ubicada en el Municipio de Cajibío Cauca, pertenece al subnúcleo forestal San José con una elevación de 1793 m.s.n.m. y una precipitación promedio de 2244 mm anual. Dicha finca también está dentro de la unidad de suelos Pubenza, con un horizonte de 9 cm de profundidad, compuesto de 19% de arcilla, 36% de limo y un 45% de arena que representa una textura franca del suelo. Posee una porosidad total de 74,12%, densidad real de 2,28% y una densidad aparente de 0,59%.

Finca “Don Miguel” (latitud 2° 17' 27" N y Longitud 76° 39' 46" W) ubicada en el Municipio de Sotará (Paispamba), perteneciente al subnúcleo forestal Juanambu dentro del núcleo Salinas, así denominado por la empresa. Se encuentra a 2069 m.s.n.m. y presenta una precipitación promedio de 2539 mm anual, perteneciente a la unidad de suelos Salinas.

Finca “Rancho Grande” (latitud 3° 51' 43" N y Longitud 76° 30' 48" W) ubicada en el Municipio de Restrepo Valle, esta finca se atañe al núcleo de la zona centro de la empresa SKCC, con una elevación de 1455 msnm y una precipitación media anual de 1167mm.

Cada una de las fincas mencionadas anteriormente, tenía 3 parcelas fertilizadas y 3 no fertilizadas; las cuales fueron codificadas como 1218, 2218, 3218 y 1000, 2000 y 3000 respectivamente, esto con el fin de tener un orden y poder hacer comparaciones entre fincas. Sobre estas parcelas, fue donde se realizaron las mediciones correspondientes, para la estimación del LAI, durante un año con los métodos del PCA y la fotografía plana.

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El diseño experimental utilizado para el establecimiento de las parcelas en cada una de las fincas se llevó a cabo a través de bloques completamente al azar generalizados, en donde los tratamientos se repiten dentro de cada bloque. Para efectos de la investigación cada finca correspondió a un bloque.

Antes de comenzar a efectuar las mediciones, se llevó a cabo en el municipio de Restrepo Valle, una capacitación con personas especialistas en el manejo del PCA (Figura 2); seguido a ésta se llevó a cabo una práctica para determinar el número de puntos a medir dentro de las parcelas, con el fin de encontrar la secuencia más adecuada garantizando que el número de puntos fuese significativo y el error fuera mínimo.

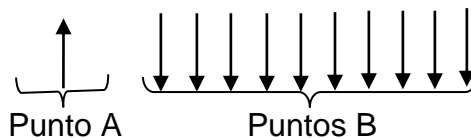
Esta práctica permitió finalmente establecer la secuencia mostrada en la figura 3; ésta fue la más factible, ya que era operable en campo y la estimación del LAI se haría con buena confiabilidad estadística, de esta secuencia se realizaron tres replicas para realizar el barrido completo de la parcela.

Los puntos A (Above), hacen referencia a los tomados a cielo abierto, y los puntos B (Below) a los que se tomaron debajo del dosel de la plantación.

Figura 2. Capacitación y práctica para el manejo del Plant Canopy Analyzer, en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el Municipio de Restrepo Valle.



Figura 3. Secuencia ingresada al Plant Canopy Analyzer, para la estimación del índice de área foliar en las plantaciones de *Eucalyptus grandis*.



Las mediciones del LAI se llevaron a cabo cada dos meses, durante un año debido a que la variación del dosel en la especie *Eucalyptus grandis* no es muy significativa en un tiempo menor al establecido, además de ayudar a reducir la cantidad de datos obtenidos; para ello se usó el Plant Canopy Analyzer (LICOR 2000) con un viewcap de 30° en seis puntos por parcela con 5 réplicas por punto (Figura 4), y para la validación de LAI con un método operativo, se tomaron 9 fotografías por parcela, para ello se tomó la cámara digital, de forma perpendicular al suelo, con la lente apuntando hacia las copas de los árboles (Figura 5), a una altura de 1.30m.

Las mediciones con el PCA en cada una de las cuatro fincas objeto fueron tomadas en horas de la mañana (para minimizar el efecto de la luz, ya que el PCA, está diseñado para estimar el LAI en condiciones de luz difusa) tanto en las parcelas fertilizadas como en las testigo. Para cada parcela se dejó una zona buffer o de amortiguamiento correspondiente a tres líneas de árboles a lado y lado de la parcela, con el fin de garantizar que lo que se estaba midiendo era, realmente la parcela objeto de estudio (Figura 4). Para las mediciones del punto A, se contó con un medio de transporte, a fin de evitar cambios rápidos y pasajeros en las condiciones del cielo entre la medición de referencia y las mediciones debajo del dosel que fueron los puntos B. Se tomaron tres puntos A y 10 puntos B; 5 en un punto de la parcela y 5 en otro punto de medición, y del mismo modo hasta hacer el barrido completo de la parcela.

Figura 4. Modelo de la parcela donde se realizaron las mediciones con el PCA y toma de las fotografías, para realizar la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*.

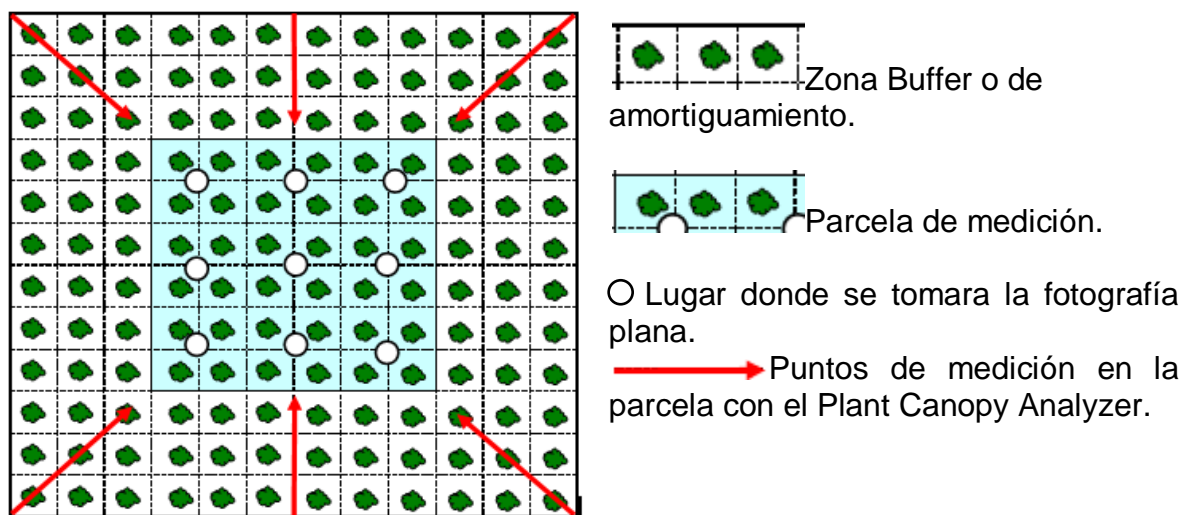
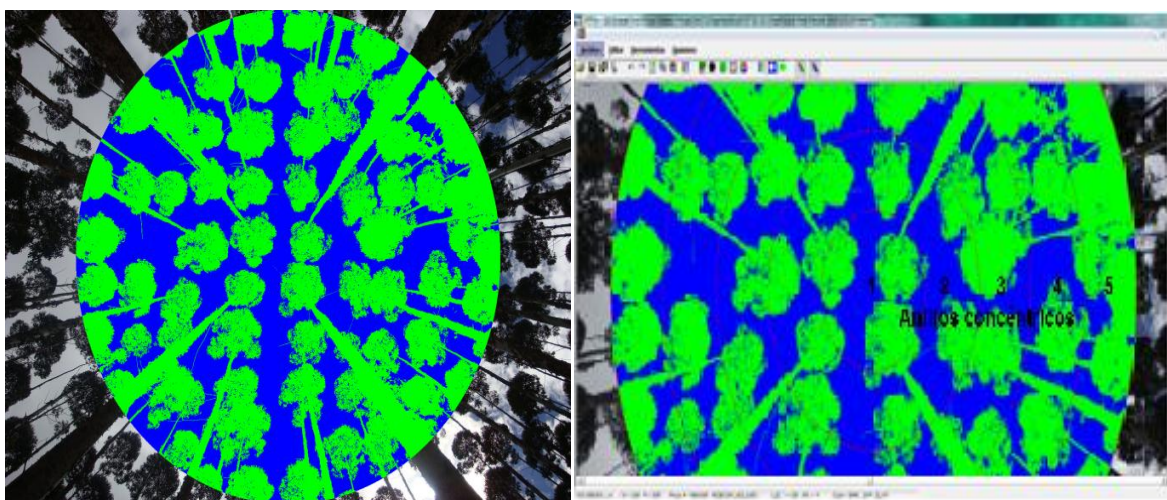


Figura 5. Toma de las fotografías digitales en la plantación de *Eucalyptus grandis* en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas en las fincas de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



Con las fotografías tomadas con la cámara digital se realizó una base de datos generada con el PIPEcv, el cual es un programa que procesa las imágenes y arroja un dato de índice de área foliar por cada foto (Figura 6). Una vez procesadas todas las fotos de una determinada parcela se promediaron los resultados para tener un estimativo del índice de área foliar, por parcela objeto de estudio.

Figura 6. Fotografía plana tomada en la plantación de *Eucalyptus grandis* y procesada en el Software PIPEcv.



2.3 INFORMACIÓN DASOMÉTRICA

Paralelo a las mediciones para la estimación del LAI, se tomaron las mediciones de los diámetros en centímetros a la altura de 1.30 metros, de cada uno de los árboles que conformaban la parcela objeto de estudio. Esta se llevó a cabo durante todo el periodo de la investigación con el fin de utilizarlos en la formulación del modelo matemático.

2.4 MODELO MATEMÁTICO

Para realizar el modelo matemático se llevó a cabo una última medición, en ésta se cubicaron árboles seleccionados por categorías diamétricas, con el objeto de tener una buena representatividad. Una vez seleccionados y talados los árboles se procedió a coger todas las hojas de cada uno de ellos, éstas se pesaron en campo para obtener el peso fresco; se tomó una muestra de 30 hojas, las cuales también fueron pesadas, marcadas y empacadas (Figura 7) para ser llevadas a laboratorio y procesarlas en un escáner que medía directamente el área de cada una de las hojas (Figura 8), con el fin de encontrar el área de las 30 hojas.

Figura 7. Proceso de deshoje, recolección y marcación de bolsas, para pesar el total de hojas y tomar la muestra de hojas de *Eucalyptus grandis*.

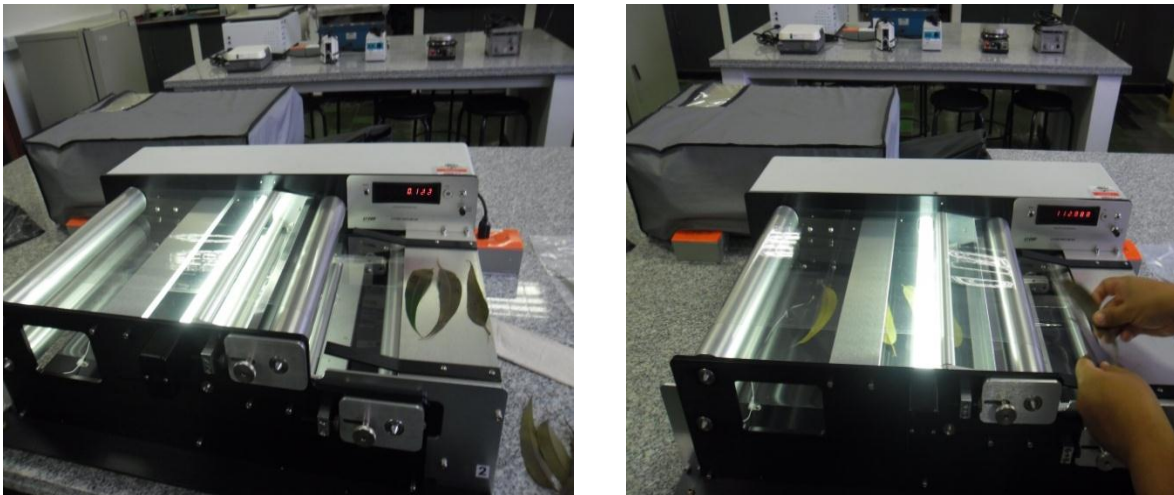


Para encontrar el área foliar de cada árbol se procedió a tomar el porcentaje de contenido de humedad de las 30 hojas, este porcentaje de humedad se usó a fin de hallar su propio peso seco. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento para hallar el peso seco del total de hojas de cada árbol en kilogramos. Seguidamente se procedió a calcular el área foliar efectiva, para lo cual se tomó el

área de las 30 hojas en metros cuadrados y se dividió entre su peso seco en kilogramos, de igual forma se procedió a encontrar el área efectiva del total de hojas del árbol. Finalmente para hallar el área foliar de cada árbol se multiplicó el área foliar efectiva total del árbol por el peso seco total del mismo, quedando de esta manera en unidades de área.

Una vez encontrada el área foliar de cada árbol se tomó su respectivo diámetro a las altura de 1.30 metros en centímetros, para emparejar los datos y correlacionar las dos variables; en el software se diferencia la variable dependiente que es la variable de respuesta y la independiente que es la variable predictiva, en este caso la variable independiente fue el diámetro y la dependiente el área foliar. Ésta base de datos se llevó al software CurveExpert Professional, con el fin de encontrar el modelo matemático que mejor ajuste tuviera, para ello se tuvo en cuenta el coeficiente de correlación para establecer el mejor modelo, así como también el criterio biológico, para llevar la dinámica de crecimiento de los árboles y la observación de la masa de puntos en el gráfico de dispersión.

Figura 8. Escáner utilizado para medir el área foliar de *Eucalyptus grandis*.



Una vez definido el modelo matemático, se llevó a Microsoft Excel, en donde se organizaron los datos para llevarlos a la ecuación matemática con el fin de encontrar el área foliar de todos los árboles de cada parcela. Finalmente para llegar a la estimación del LAI a través del modelo se realizó una sumatoria del área foliar de todos los árboles pertenecientes a la parcela y se dividió entre el área de suelo ocupada. Este mismo procedimiento se llevó a cabo con todas las parcelas y para cada una de las fincas.

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con todos los datos obtenidos tanto en campo como en oficina, se realizaron gráficos de dispersión entre los métodos utilizados y un análisis de correlación lineal, lo que permitió ver si, existía o no relación entre las variables de respuesta. Posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal en el software SPSS 11.5 para Windows, diferenciando parcelas fertilizadas de las no fertilizadas y comparando el modelo matemático para la estimación del LAI con los otros dos métodos usados, es decir, con el PIPEcv y el PCA.

Una vez realizada la estimación del LAI con el modelo matemático, se realizó una comparación de éste método con el PCA y PIPEcv. Para ello se realizaron gráficos de dispersión con el software CurveExpert y regresiones lineales en el software SPSS 11.5 para Windows con el fin de tabular los resultados de los parámetros estimados con sus errores estándar, en un intervalo de confianza (95%) para el intercepto y la pendiente, el límite superior e inferior para el total de los datos.

Una vez verificado que los datos fueron normales y que los supuestos estadísticos se cumplían, se realizó un análisis de varianza ANOVA en el software SPSS 11.5 para Windows, con las diferencias encontradas entre los datos estimados con el modelo matemático frente a los estimados con el PCA y PIPEcv (Anexo A), con el fin de verificar si el modelo matemático guardaba relación alguna con las metodologías instrumentales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR CON EL PLANT CANOPY ANALYZER Y EL PIPEcv

Los valores estimados del índice de área foliar a través de las metodologías del PCA y PIPEcv, presentadas a continuación son valores promediados del total de las mediciones realizadas para cada una de las fincas. En el anexo A se encuentra el formato usado para la organización de los datos y en el anexo B, las gráficas en donde se compara el comportamiento del índice de área foliar con las metodologías del PCA y el PIPEcv.

3.1.1 Estimación del índice de área foliar en la finca Chupillauta. El índice de área foliar estimado a través del método del PCA y PIPEcv, se encuentran en el cuadro 2; en él se observa que en la columna los tratamientos fertilizados y no fertilizados de los tratamientos hay una numeración; esta hace referencia a los tratamientos fertilizados y no fertilizados, de forma que las numeraciones 1000, 2000 y 3000 corresponden a los no fertilizados y las numeraciones 1218 y 3218 corresponden a los fertilizados. También se observa que los valores obtenidos con el PCA varían entre 1.41 y 1.94 siendo el mayor valor correspondiente al tratamiento 1000 (parcela no fertilizada) y el menor valor al tratamiento 3218 (parcela fertilizada). Teniendo en cuenta la hipótesis planteada al principio de la investigación, en donde se pensaba que las parcelas fertilizadas deberían responder con un área foliar mayor que las no fertilizadas, es posible ver que los resultados muestran un comportamiento diferente para la finca; esto puede ser debido a que, al momento de fertilizar, los árboles responden a dicha fertilización, con un proceso de expansión foliar, que se mantiene hasta un punto en el que se estabiliza e inicia su crecimiento en diámetro y altura, como la fertilización se había realizado dos años atrás no hay diferencias notorias entre los tratamientos en el índice de área foliar. Sin embargo se pudo verificar que existen diferencias entre los tratamientos con respecto a diámetros y alturas ya que las parcelas fertilizadas son las que consiguen mayor crecimiento en las variables mencionadas en comparación con las no fertilizadas.

Los resultados obtenidos con el PIPEcv, variaron entre 1,97 para el tratamiento 2000 y 2,77 para el tratamiento 1000; esta metodología también afirma que el tratamiento que mayor índice de área foliar es el tratamiento 1000, pero no coinciden en cuanto al tratamiento que menor índice de área foliar ostenta. Es posible decir entonces que los resultados conseguidos con las dos metodologías difieren una de la otra, debido a que el PIPEcv, para realizar la estimación, cae en errores como superponer las hojas, tomar ramas y troncos; esto no sucede con el PCA, el cual es capaz de diferenciar, la hoja que se encuentra una encima de la

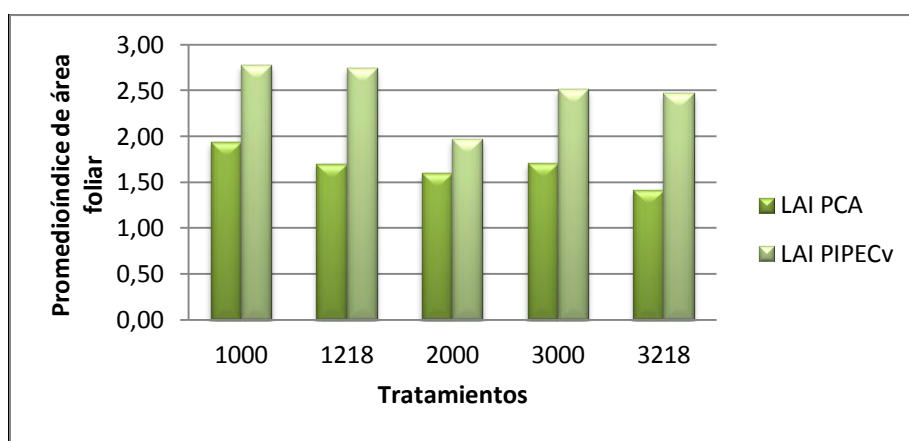
otra, ramas y troncos, debido a que se encuentra provisto de sensores que le permite reconocer solo lo que se debe medir.

A diferencia de las otras tres fincas, la finca Chupillauta presenta 5 parcelas; tres parcelas no fertilizadas, correspondientes a los tratamientos 1000, 2000 y 3000 y dos parcelas fertilizadas que hacen referencia a los tratamientos 1218 y 3218, esto se puede observar en la figura 9, en donde se muestra el comportamiento del índice de área foliar promedio por tratamientos, para la finca.

Cuadro 2. Promedio del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*, para cada tratamiento en la finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

Tratamiento	LAI PCA	LAI PIPEcv
1000	1,94	2,77
1218	1,70	2,74
2000	1,60	1,97
3000	1,70	2,51
3218	1,41	2,47

Figura 9. Comportamiento del LAI en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas de *Eucalyptus grandis*, en la Finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



3.1.2 Estimación del índice de área foliar en la finca Don Miguel. Para esta finca los valores obtenidos a través de las dos metodologías del PCA y PIPEcv se observan en el cuadro 3, en él se puede identificar que el tratamiento con mayor índice de área foliar para el PCA es el tratamiento 3218, con un valor de 2,47 y un

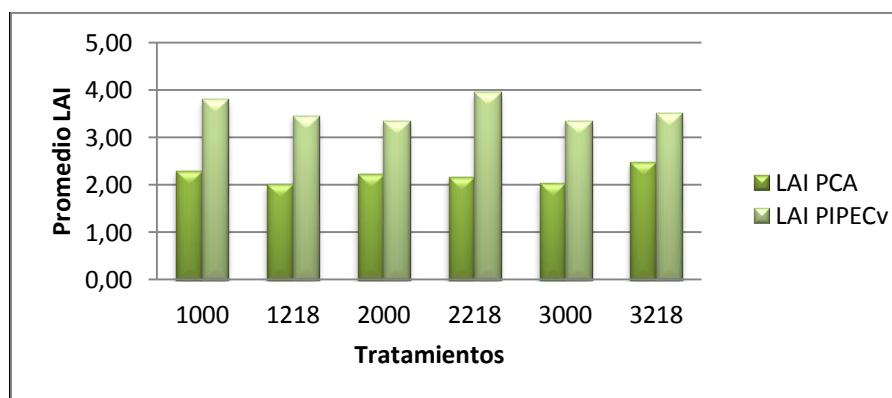
valor mínimo de 2,01 para el tratamiento 1218. Con el PIPEcv los valores varían entre 3,35 y 3,95, para los tratamientos 2000 y 2218, respectivamente.

En el cuadro también se observa que los valores estimados por cada método se mantienen cerca uno de otro; lo que indica que no hay una variación marcada entre los tratamientos fertilizados y no fertilizados, lo que muestra correspondencia con el último período de fertilización (2 años atrás) y el tiempo de expansión foliar expresado por los árboles. En esta finca las metodologías difieren en las estimaciones realizadas y no guardan una relación cercana a la hora de hacer las respectivas estimaciones del índice de área foliar, en la figura 10, se puede observar el gráfico de barras para cada método, en el cual se observa que con PIPEcv, se obtienen valores de índice de área foliar, mayores a los encontrados con el PCA.

Cuadro 3. Promedio del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis* para cada tratamiento en la finca Don Miguel de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

Tratamiento	LAI PCA	LAI PIPEcv
1000	2,30	3,81
1218	2,01	3,45
2000	2,22	3,35
2218	2,16	3,95
3000	2,02	3,35
3218	2,47	3,52

Figura 10. Comportamiento del LAI en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas de *Eucalyptus grandis*, en la Finca Don Miguel de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



3.1.3 Estimación del índice de área foliar en la finca Pital. Los valores estimados para esta finca con los métodos de PIPEcv y PCA, se observan en el cuadro 4, en este se puede detallar los resultados obtenidos para cada tratamiento; los tratamientos 3218 y 2218 consiguen los mayores índices de área foliar con 2,18 y 2,12 respectivamente y el menor índice de área foliar lo presenta el tratamiento 2000 con un valor de 1,74, todos estimados a través del PCA. Con el PIPEcv, se manifiesta el tratamiento 1218 con el mayor índice de área foliar con un valor de 3,34 y el menor índice para el tratamiento 2218.

Cuadro 4. Promedio del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis* para cada tratamiento en la finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

Tratamiento	LAI PCA	LAI PIPEcv
1000	2,01	3,28
1218	1,91	3,34
2000	1,74	2,91
2218	2,12	2,51
3000	2,08	3,11
3218	2,18	3,08

En la figura 11, se puede observar el comportamiento del índice de área foliar, en donde las estimaciones realizadas con el PIPEcv son mayores en comparación a las obtenidas con el PCA. De manera puntual es de resaltar que el tratamiento 2218 es quien reporta menos índice de área foliar con el método del PIPEcv; éste fue afectado por la caída de rayos lo que ocasionó que el dosel de los árboles se cayera (Figura 12), quedando en pie solo los troncos y ramas. Esta situación hace que a la hora de procesar la imagen en el PIPEcv, el cuál realiza la estimación a través de la integración de áreas oscuras, tenga mayor área clara (por la entrada de luz) y los valores sean bajos para la parcela en comparación al valor estimado con el PCA.

Teniendo en cuenta las gráficas anteriormente ilustradas para el índice de área foliar en cada una de las fincas, es claro observar que la finca con mayor índice de área foliar, fue la finca de Don Miguel, y la finca con menor índice de área foliar fue Chupillauta, esto pudo darse, porque esta finca a diferencia de las demás presenta solo cinco parcelas y fue afectada por rayos, lo que ocasionó que muchos individuos quedaran sin hojas; en la Figura 13 es claro ver que las copas de los árboles están completamente defoliadas, lo que propicia mayor incidencia de entrada de luz, afectando los resultados obtenidos.

Figura 11. Comportamiento del LAI en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas de *Eucalyptus grandis*, en la Finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

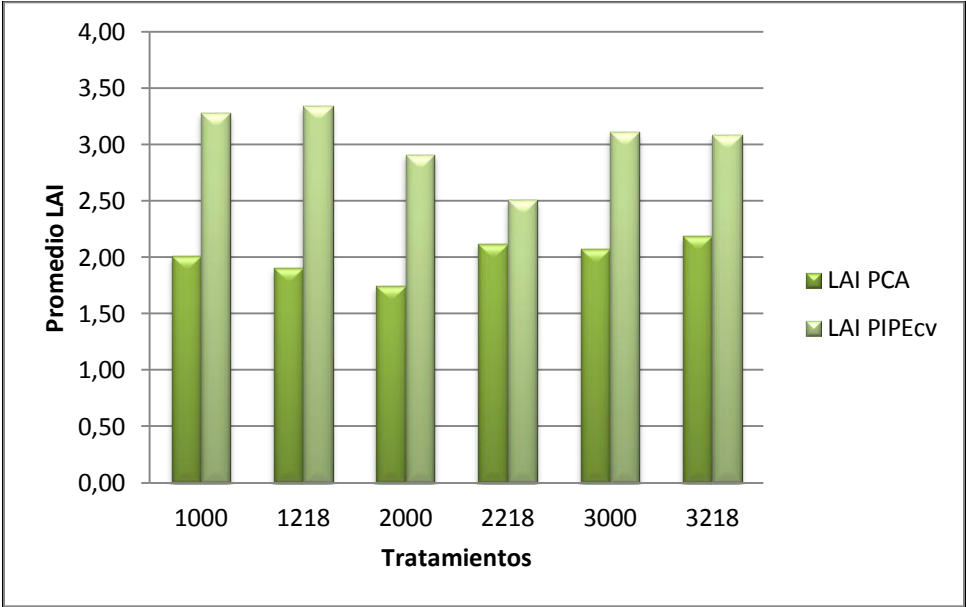


Figura 12. Árboles de *Eucalyptus grandis* afectados por la caída de rayos en la finca Pital de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



Figura 13. Árboles de *Eucalyptus grandis*, afectados por la caída de rayos en la finca Chupillauta de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



3.1.4 Estimación del índice de área foliar en la finca Rancho Grande. En el cuadro 5, se muestran los valores estimados y promediados para la finca con las metodologías del PCA y el PIPEcv. Esta finca se diferencia de las otras tres fincas principalmente por la altura a la que se encuentra sobre el nivel del mar, las precipitaciones y el suelo. Se observa que los valores estimados con el PCA varían entre 2,02 y 2,24 para los tratamientos 2218 y 3218 respectivamente; con el PIPEcv se observa que los mismos tratamientos son lo que presentan el menor y mayor índice de área foliar.

Cuadro 5. Promedio del LAI en *Eucalyptus grandis*, para cada tratamiento en la finca Rancho Grande de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.

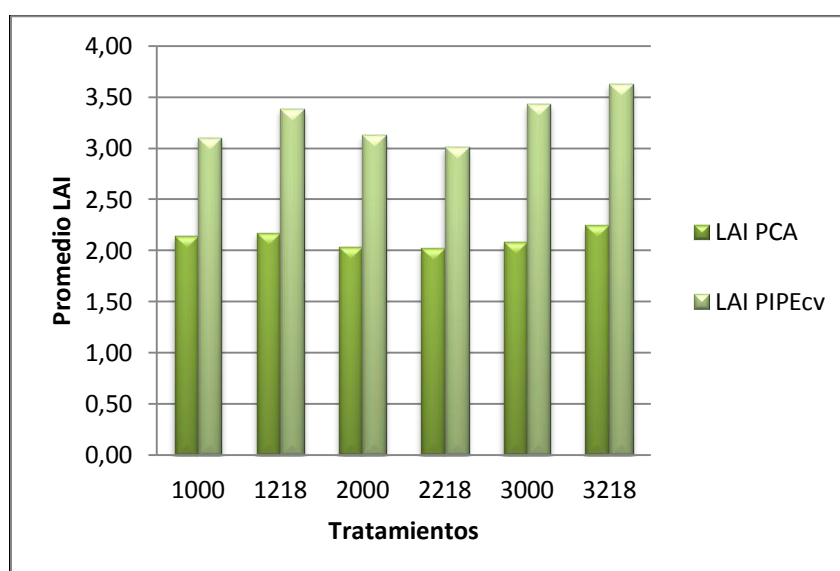
Tratamiento	LAI PCA	LAI PIPEcv
1000	2,14	3,10
1218	2,17	3,38
2000	2,03	3,13
2218	2,02	3,01
3000	2,08	3,43
3218	2,24	3,63

En la figura 14, se observa que el comportamiento del índice de área foliar en la finca durante el período de medición no es muy cambiante, se mantiene en valores muy cercanos entre los métodos usados. Esto pudo darse como consecuencia a que en el Municipio de Restrepo Valle, las variaciones del clima no son tan marcadas como lo son en el Municipio de Popayán, en donde la ocurrencia de las precipitaciones sucede de forma regular durante todo el año, esto condiciona variables ambientales, como la disponibilidad de nutrientes, agua, luz entre otras.

Las diferencias que existen entre la finca Rancho Grande y las fincas del Municipio de Popayán son notables; se puede observar claramente que la dinámica de la especie es diferente, ya que se encuentran en condiciones ambientales distintas, esto hace que la especie se adapte a determinadas condiciones y aproveche los recursos diferencialmente.

Se puede observar que el LAI en las plantaciones de *Eucalyptus grandis*, estimados con los diferentes métodos varían, uno del otro, pero todos siguen una misma tendencia a la hora de describir el comportamiento del índice de área foliar; esto es, que si se utiliza la metodología del PCA, PIPEcv o modelo matemático, los tres, ayudan a la identificación de la finca o tratamiento con mayor o menor índice; lo cual se observa en el cuadro 6; éste contiene los valores máximos, mínimos y promedios de índice de área foliar obtenidos en la plantación, para el periodo de medición.

Figura 14. Comportamiento del LAI en las parcelas fertilizadas y no fertilizadas de *Eucalyptus grandis*, en la Finca Rancho Grande de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



Cuadro 6. Valores máximos, mínimos y promedio del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*, estimados con el método de PCA y PIPEcv.

	LAI PCA	LAI PIPEcv
Valor máximo	3,91	5,03
Valor mínimo	0,82	1,15
Promedio	2,01	3,12

Según lo expuesto por Waring (1992), los valores obtenidos con las dos metodologías se encuentran dentro del rango reportado para las especies de hoja ancha a nivel mundial que es entre 2 y 3, aunque es de resaltar que los valores muy altos corresponden especialmente a los estimados con el método de fotografía plana, debido a que este toma otras partes del árbol como si fueran hojas. Para efectos de realizar una investigación rápida y de bajo costo, es una metodología factible, ya que aunque los valores no son parecidos a los encontrados con el PCA, ayuda a identificar las parcelas o tratamientos con mayor y menor índice de área foliar.

De acuerdo a lo expuesto por Peduzzi (2007), es posible observar que el índice de área foliar, es un indicador de crecimiento, donde bajos valores indican baja productividad, caso que no se presenta en la plantaciones estudiadas donde los promedios obtenidos de LAI se mueven en los rangos normales y en algunos casos sobrepasan el valor de 3,0.

Con el fin de verificar si las diferencias entre ambos métodos eran significativas o no, se realizó un análisis de varianza teniendo como factores a las fincas y a los tratamientos; los tratamientos no se analizaron por separado es decir, fertilizados y no fertilizados, debido a que no se encontraron diferencias significativas entre los mismos. En el cuadro 7, se observa que no hay diferencias significativas en la interacción de las metodologías desarrolladas con el factor tratamiento; pero si existen diferencias significativas entre las metodologías con el factor finca; esto significa que para realizar las estimaciones de índice de área foliar con las dos metodologías a nivel de fincas a la hora de dar los resultados para hacer las comparaciones pertinentes, pueden variar; esto pudo deberse a las condiciones ambientales y a la disponibilidad de nutrientes ofrecidas por cada finca o por las afecciones naturales a las que se ven expuestas las plantaciones de *Eucalyptus grandis* como la que se mencionó con anterioridad.

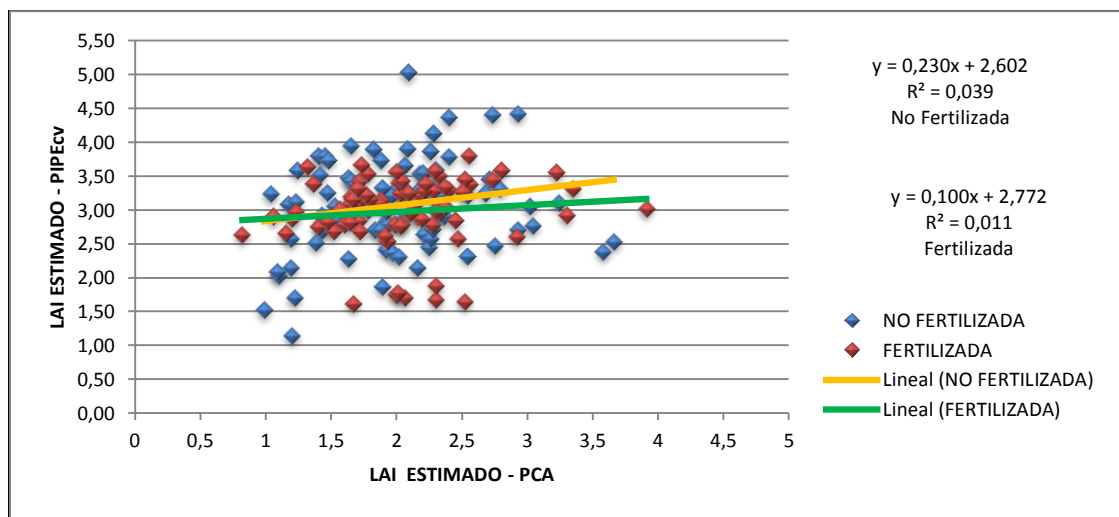
Con el objeto de comprobar si las dos metodologías usadas tenían una relación se realizó un diagrama de dispersión y una regresión lineal (Figura 15) en el cual se observa que la relación existente entre estas dos metodologías es débil para los dos casos de los tratamientos, fertilizado y no fertilizado. Los coeficientes de determinación, para ambas líneas de tendencia son muy bajos encontrándose

para los tratamientos fertilizados un coeficiente r^2 de 0,011 y para los no fertilizados de 0,039. Esto evidencia que la magnitud de cambio del índice de área foliar estimado con el PIPEcv, no se atribuye en casi nada al cambio del índice de área foliar estimado con el PCA.

Cuadro 7. Análisis de varianza ANOVA, relacionando el software PIPEcv y el Plant Canopy Analyzer para la estimación del índice de área foliar, en la interacción con los tratamientos y las fincas, en las plantaciones de *Eucalyptus grandis*

ANOVA PARA LA INTERACCIÓN CON FINCAS Y TRATAMIENTOS					
Diferencia entre el LAI estimado con el software PIPEcv y el PlantCanopyAnalyzer					
Fuente	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo	206,274	8	25,784	43,703	0,000
FINCA	6,048	3	2,016	3,417	0,019
TRATAMIENTO	0,126	1	0,126	0,214	0,644
FINCA * TRATAMIENTO	1,904	3	0,635	1,076	0,361
Error	90,268	153	0,590		
Total	296,542	161			

Figura 15. Relación entre el Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv, para la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*.



Finalmente se realizó una regresión lineal, teniendo en cuenta las metodologías del PCA y el PIPEcv con la precipitación ocurrida, diferenciando las fincas del

Municipio de Popayán de la finca de Restrepo Valle; el cuadro 8, muestra los resultados obtenidos de la regresión lineal; este muestra que para el Municipio de Popayán no existe una relación fuerte, para el método de PCA se obtuvo una relación de las dos variables del 4.2% y con el método del PIPEcv del 1,6%. En el Municipio de Restrepo Valle, se observa que para la metodología del PCA existe una relación mayor, que en los dos casos anteriores, con un coeficiente de determinación del 28,8% y con el método del PIPE del 1%. Los resultados obtenidos se deben a que en el Municipio de Popayán, se tienen precipitaciones distribuidas a lo largo del año, suceso que no ocurre en el Municipio de Restrepo Valle, en donde se tienen las precipitaciones marcadas en una época del año. El anexo C, muestra el comportamiento del LAI con respecto a la precipitación.

Cuadro 8. Parámetros estadísticos de la regresión lineal realizada a las metodologías del Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv con la precipitación.

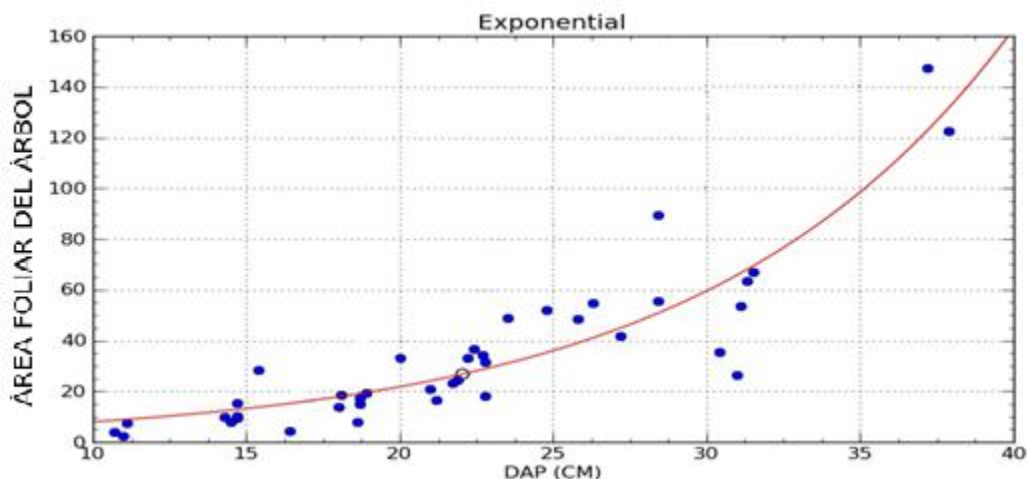
Parámetros estadísticos metodología del PCA vs Precipitación en el Municipio de Popayán			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
0,204	0,042	0,032	0,48138
Parámetros estadísticos metodología del PIPEcv vs Precipitación en el Municipio de Popayán			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
0,125	0,016	0,006	0,76909
Parámetros estadísticos metodología PCA vs Precipitación en el Municipio de Restrepo Valle			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
0,537	0,288	0,267	0,48943
Parámetros estadísticos metodología PIPEcv vs Precipitación en el Municipio de Restrepo Valle			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
0,099	0,010	-0,019	0,37194

3.2 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR A TRAVÉS DEL MODELO MATEMÁTICO.

Se estimó un modelo exponencial que describe el comportamiento de los datos de campo, el cual se usó para estimar el índice de área foliar de las diferentes parcelas. La figura 16, muestra la curva trazada en la masa de puntos por el modelo matemático; en el eje X se puede observar los diámetros medidos en campo y emparejados con su respectiva área foliar en el eje Y.

En la ecuación del modelo exponencial estimado, los parámetros a y b para la estimación del índice de área foliar, son constantes establecidas por el modelo matemático, a partir de los datos suministrados al software de diámetros y de área foliar de los árboles.

Figura 16. Diagrama de dispersión de los diámetros de los árboles de *Eucalyptus grandis*, con respecto a su área foliar y curva trazada por el modelo matemático exponencial.



El modelo matemático resultante de los datos tomados fue,

- $LAI = ae^{bx}$

En donde:

- $LAI = \text{Índice de área foliar}$
- $e = \text{Exponencial}$
- $a = 2,91274630540194$
- $b = 0,100592754068322$
- $x = \text{Diámetro a la altura de 1.30 metros (cm)}$

El modelo encontrado tiene un error estándar de 13,22 un coeficiente de correlación $r = 0.9066$, lo que indica que la intensidad de la relación entre el diámetro a la altura de 1.30m y el área foliar de cada árbol es alta, ya que se encuentra muy próximo a 1. Para el coeficiente de determinación el modelo arrojó un $r^2 = 0,8220$, lo cual indica que el aumento del diámetro de los árboles se ve explicado en un 82,2% por el aumento del área foliar de los árboles estudiados, lo que es concordante si se tiene en cuenta que son las hojas las que realizan la fotosíntesis procesos que se traduce en el crecimiento de los árboles.

Con este modelo se realizó la estimación del índice de área foliar ingresando en él cada uno de los diámetros medidos en las fincas, en el cuadro 9, se observa el valor máximo de índice de área foliar estimado a través de la ecuación

matemática, que fue de 3,80 el mínimo de 1,62 y un valor promedio de 2,83 para la plantación de *Eucalyptus grandis*.

De acuerdo con Landsberg y Waring (1997), quienes afirman que el LAI interviene en las ecuaciones que ayudan a describir muchos de los procesos físicos y químicos de un dosel vegetal, así como su comportamiento fisiológico, se puede observar que el modelo descrito permite simular el comportamiento de un proceso como el crecimiento diamétrico en términos de índice de área foliar.

Cuadro 9. Valor máximo, mínimo y promedio de índice de área foliar para la plantación de *Eucalyptus grandis*, estimados a través del modelo matemático.

	LAI MODELO MATEMÁTICO
Valor máximo	3,80
Valor mínimo	1,62
Promedio	2,83

Comparando esta metodología con las otras dos, se puede observar que las tres tienen una misma tendencia, aunque difieran en los resultados estimados. Cada metodología ayuda a la identificación de las parcelas con mayor o menor índice de área foliar, pero difieren en el resultado debido a que cada metodología presenta un error, la fotografía plana toma para la estimación los troncos y ramas del árbol, el modelo sobreestima con diámetros superiores a 30cm y el PCA presenta inconvenientes con la altura de los árboles y las condiciones de luz.

El modelo matemático realiza buenas estimaciones del índice de área foliar, para diámetros menores de 30cm, a partir de este valor en adelante el modelo comienza a sobreestimar el índice de área foliar; esto como consecuencia de la baja representatividad de árboles en las categorías diamétricas superiores a los 30cm.

3.3 RELACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ESTIMADO CON EL MODELO MATEMÁTICO CON PCA Y PIPEcv

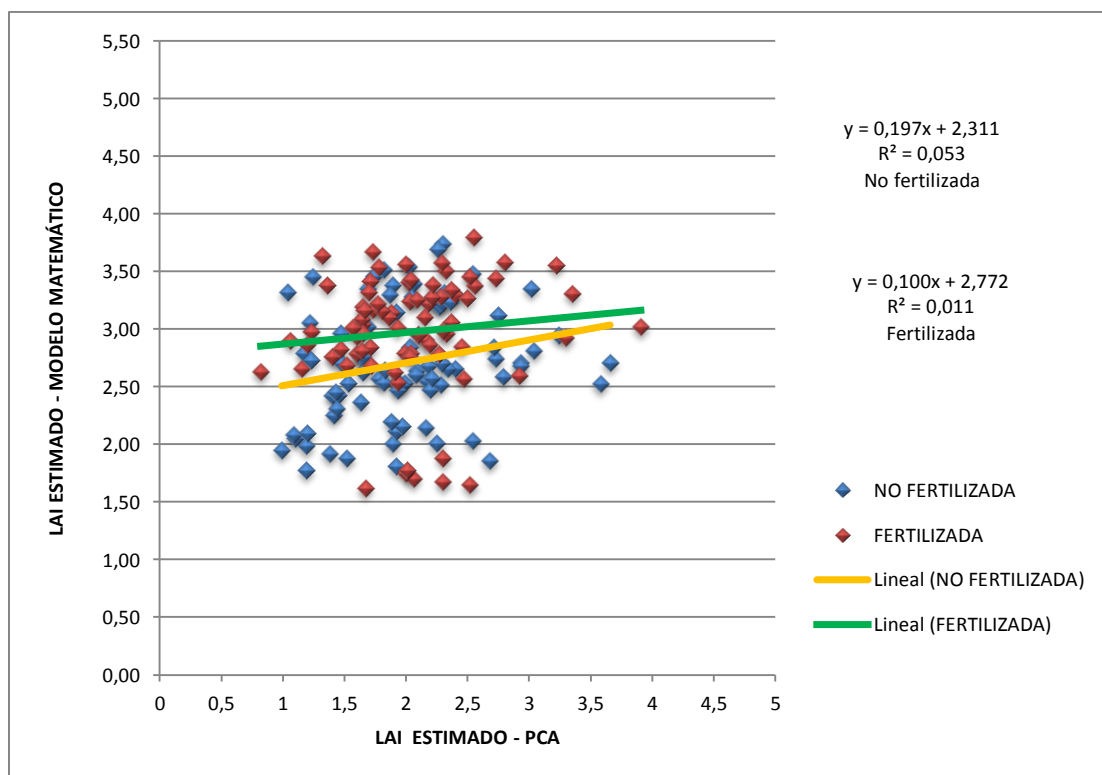
Se realizó la comparación de valores de índice de área foliar estimados con el modelo matemático frente a los obtenidos con el PCA y el PIPEcv, con el fin de observar si existía o no relación entre las tres metodologías usadas; la figura 17, muestra las dos gráficas en donde se relacionan los métodos, en ella se observa que los coeficientes de determinación afirman que hay una mejor relación entre la metodología del modelo matemático y la del PIPEcv; lo que se debe a que ambas metodologías infieren en errores, el PIPEcv al momento de realizar la estimación,

en una fotografía toma partes del árbol diferentes de las hojas y el modelo matemático cuando se usa con diámetros por encima de 30cm, comienza a sobreestimar. Cabe aclarar que el PCA también cae en errores causados por efectos de la luz, pero es una variable que puede llegar a ser manejada a fin de minimizar el error en la estimación del LAI; de ahí que las metodologías que mejor se ajustan son la del PIPEcv y el modelo matemático, aunque en general, no se presentan valores altos de correlación entre ninguna de las tres metodologías.

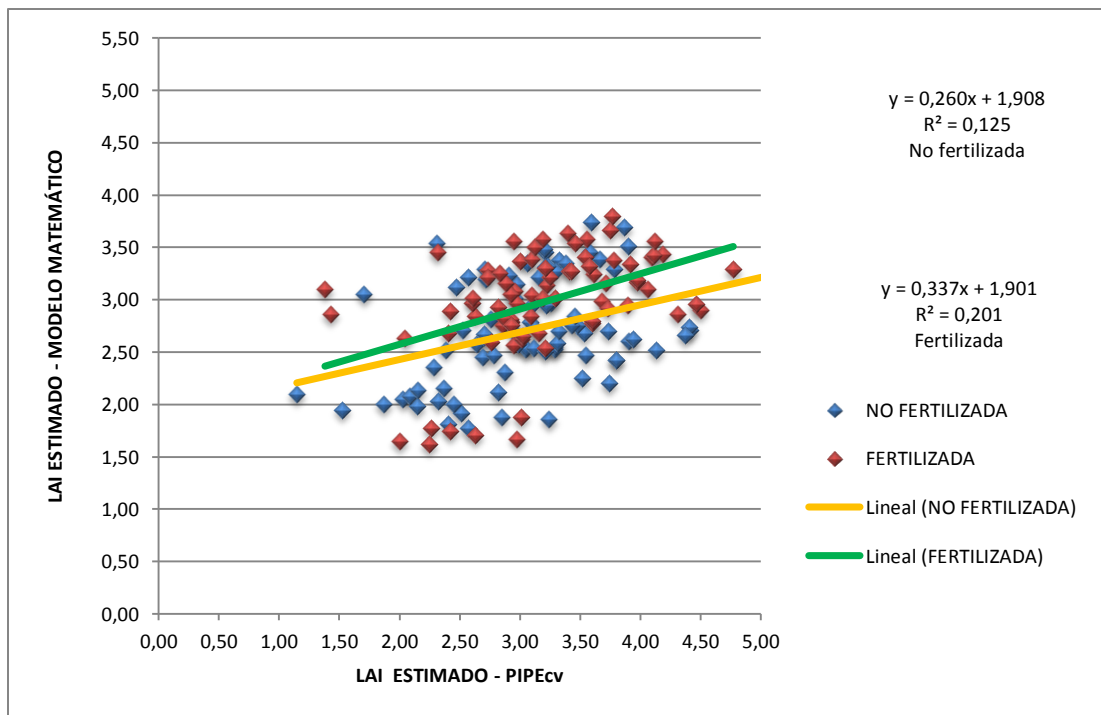
En el caso del PCA para el tratamiento fertilizado existe una relación de 20,01% la cual es mayor a la relación existente en los tratamientos no fertilizados que fue de 12,50%. Para el caso de la relación de la metodología del modelo matemático y el PCA, el tratamiento no fertilizado es quien demuestra tener mayor porcentaje de relación con un 5,30% y el tratamiento fertilizado muestra una relación de apenas el 1.1%.

Las gráficas permiten corroborar que no existe una buena relación entre las dos metodologías instrumentales usadas en comparación al modelo matemático, esto se evidencia en los bajos porcentajes de relación encontrados entre los mismos.

Figura 17. Relación del modelo matemático para estimar índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*, frente al Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



Continuación Figura 17. Relación del modelo matemático para estimar índice de área foliar frente al Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv en *Eucalyptus grandis* en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia.



El modelo matemático al ser una función a la cual se le introducen datos tomados en campo puede verse como el método más confiable, sin embargo, para que éste sea significativo y se aproxime en un alto grado a la realidad se deben tomar una cantidad adecuada de datos y cada variable debe estar bien representada, en el caso de esta investigación, se utilizó una clasificación diamétrica para seleccionar y cortar los árboles; las categorías más pequeñas son las que mayores individuos presentan, a diferencia de las categorías grandes (Figura 16), que presentan pocos individuos, lo que hace que el modelo al momento de realizar las estimaciones con diámetros de árboles grandes, sobreestime el índice de área foliar.

En el cuadro 10, se observa que la finca con mayor índice de área foliar fue la finca Don Miguel con los métodos del PCA y PIPEcv; pero para el modelo matemático la finca con mayor índice de área foliar es la finca Rancho grande, esto se debe a que en esta finca los árboles presentan grandes diámetros, y como ésta categoría, en el modelo matemático no está bien representada al hacer los cálculos para la estimación del LAI, los sobreestima, por lo tanto los resultados para esta finca no son confiables.

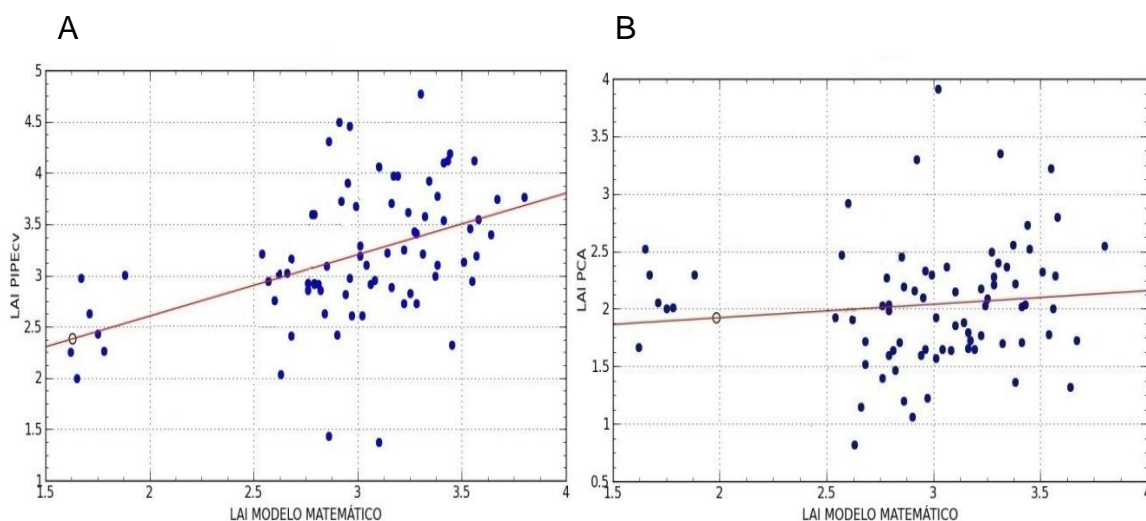
Posteriormente se realizaron cuatro diagramas de dispersión, asignando el índice de área foliar estimado con el modelo matemático al eje X y el estimado con el software PIPEcv y el PCA al el eje Y, para los datos de los tratamientos fertilizados y no fertilizados, tal como se muestra en las Figuras 18 y 19.

Cuadro 10. Índices de área foliar promedio, para las metodologías del PIPEcv, PCA y modelo matemático en cada una de las fincas para *Eucalyptus grandis*.

FINCA	LAI PROMEDIO PCA	LAI PROMEDIO PIPEcv	LAI PROMEDIO MODELO MATEMÁTICO
CHUPILLAUTA	1,67	2,49	2,54
DON MIGUEL	2,20	3,57	2,80
PITAL	2,01	3,04	2,77
RANCHO GRANDE	2,12	3,28	3,18

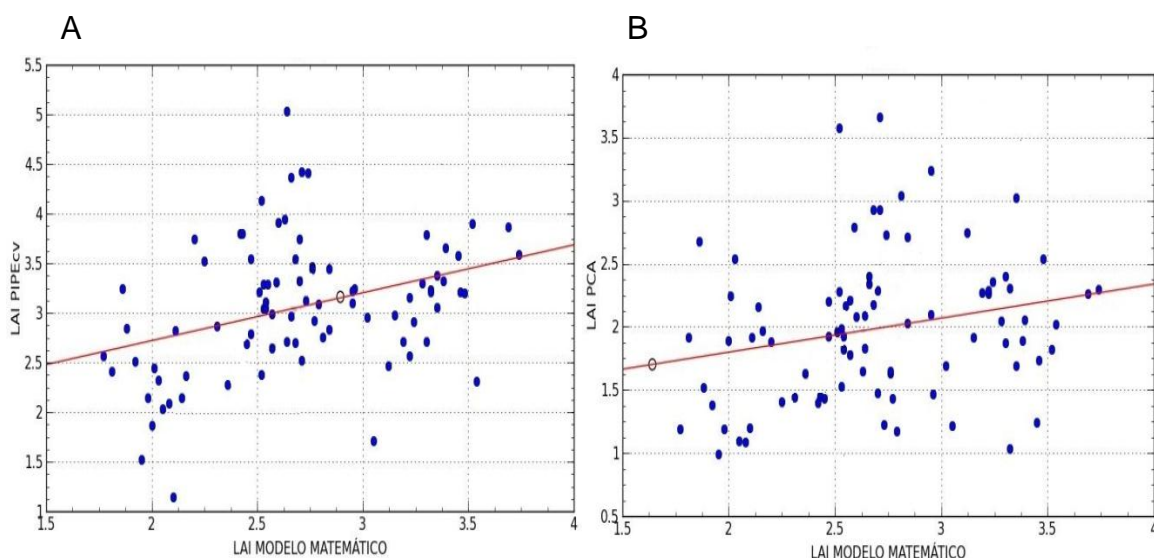
Las Figura 18 muestra dos diagramas de dispersión, los cuales tienen una tendencia creciente para la estimación del índice de área foliar; la gráfica que relaciona el modelo matemático con el PIPEcv (A), fue la que presentó una mayor pendiente, esto quiere decir que hay una mejor relación entre estos dos métodos en comparación al hallado con el PCA.

Figura 18. Diagramas de dispersión de índice de área foliar estimado con el método del modelo matemático vs el software PIPEcv (A) y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer (B), para el tratamiento fertilizado en la plantación de *Eucalyptus grandis*.



La figura 19, muestra los diagramas de dispersión correspondientes a los tratamientos no fertilizados, para las gráficas se encontraron pendientes similares, pero sigue teniendo mayor pendiente la del modelo matemático con respecto al PIPEcv.

Figura 19. Diagramas de dispersión de índice de área foliar estimado con el método del modelo matemático vs el software PIPEcv y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer respectivamente, para el tratamiento no fertilizado en la plantación de *Eucalyptus grandis*.



Una vez realizados los diagramas de dispersión, se procedió hacer las regresiones correspondientes a cada uno de ellos, los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 11, en donde se observa que los mejores ajustes, teniendo en cuenta los intervalos de confianza, se dan entre los modelos 2 y 4, es decir, entre el modelo matemático y el PIPEcv para los tratamientos fertilizados y no fertilizados respectivamente, lo que reitera los resultados obtenidos con la regresión lineal. Para la relación entre el modelo matemático y el PCA, se observa que los intervalos están alejados unos de otros, lo que ratifica que entre estos dos métodos no hay una buena relación.

Posteriormente se realizaron análisis de varianza, a la diferencia obtenida entre los datos del modelo matemático con el PCA y a la diferencia entre el modelo matemático y el PIPEcv; teniendo como factores a la variable finca y los tratamientos.

Cuadro 11. Resultado de los modelos de regresión lineal en la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*, para el modelo matemático vs el software PIPEcv y modelo matemático vs Plant Canopy Analyzer, para los tratamientos (fertilizado y no fertilizado).

MODELOS				Intervalo de confianza al 95%		
	Parámetros	Error típico	Significancia	Límite inferior	Límite superior	
Modelo 1. Modelo Matemático – PCA, Tratamientos fertilizado	a	2,772	0,224	0	2,325	3,218
	b	0,101	0,107	0,347	-0,111	0,313
Modelo 2. Modelo Matemático – PIPEcv, Tratamiento fertilizado	a	1,899	0,252	0	1,397	2,401
	b	0,338	0,077	0	0,184	0,492
Modelo 3. Modelo Matemático – PCA, Tratamiento no fertilizado	a	2,311	0,191	0	1,932	2,69
	b	0,198	0,092	0,034	0,015	0,381
Modelo 4. Modelo Matemático – PIPEcv, Tratamiento no fertilizado	a	1,906	0,238	0	1,433	2,379
	b	0,261	0,076	0,001	0,11	0,412

El cuadro 12, presenta los resultados obtenidos para el análisis de varianza, a las diferencias establecidas entre el modelo matemático y el PCA, teniendo como factores a las fincas y a los tratamientos. En este se observa que a nivel de fincas existen diferencias significativas, esto es que las dos metodologías no guardan una relación o las metodologías no se describen entre sí. Sucede lo contrario cuando se estudian las diferencias entre los tratamientos; este nos muestra que no existen diferencias significativas entre las metodologías, lo que indica que el modelo matemático se ajuste en cierto grado al PCA.

El último análisis de varianza realizado, se hizo al igual que en el anterior, entre la diferencias establecida entre el modelo matemático y el PIPEcv, teniendo en cuenta como factores a las fincas y a los tratamientos. En el cuadro 13, se observa la misma situación que en el anterior, y es que a nivel de fincas existen diferencias significativas, pero no las hay entre los tratamientos. Esto indica que el modelo matemático se ajusta en demuestra que al igual que el PCA el PIPEcv, describe al modelo matemático.

Cuadro 12. Análisis de varianza, relacionando el modelo matemático con respecto a la metodología del Plant Canopy Analyzer, teniendo como factores las fincas y tratamientos, para la estimación del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis*.

ANOVA					
Diferencia entre el índice de área foliar estimado con el modelo matemático y el Plant Canopy Analyzer					
Fuente	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo	118,975	8	14,872	34,657	0,000
FINCA	4,184	3	1,395	3,250	0,024
TRATAMIENTO	0,008	1	0,008	0,019	0,891
FINCA * TRATAMIENTO	5,878	3	1,959	4,566	0,004
Error	65,654	153	0,429		
Total	184,628	161			

Cuadro 13. Análisis de varianza, relacionando el modelo matemático con respecto a la metodología del PIPEcv, teniendo como factores, los tratamientos fertilizados y no fertilizados en la plantación de *Eucalyptus grandis*.

ANOVA					
Diferencia entre el LAI estimado con el modelo matemático y el PIPEcv					
Fuente	Suma de cuadrados tipo II	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo	33,021	8	4,128	9,127	0,000
FINCA	14,995	3	4,998	11,053	0,000
TRATAMIENTO	0,070	1	0,070	0,156	0,694
FINCA * TRATAMIENTO	4,639	3	1,546	3,420	0,019
Error	69,192	153	0,452		
Total	102,213	161			

4. CONCLUSIONES

El hecho de que las fertilizaciones se hayan realizado 2 años atrás hacen que las diferencias obtenidas en el índice de área foliar a nivel de tratamientos no difieran fuertemente, sin embargo, estas diferencias pueden ser observadas a nivel de crecimiento diamétrico y en altura.

Se encontró que existe relación entre el índice de área foliar estimado a través de las tres metodologías; del modelo matemático frente al PIPEcv y del modelo matemático con respecto al PCA. Teniendo una mejor relación entre las metodologías del PIPEcv y el modelo matemático.

Se pudo establecer que la finca con mayor índice de área foliar fue la finca Don Miguel, para los métodos del Plant Canopy Analyzer y el software PIPEcv, y la finca con menor índice de área foliar fue la finca Chupillauta; para las tres metodologías empleadas.

En general el índice de área foliar en las cuatro fincas estudiadas estuvo en un promedio de 2,01 para el Plant Canopy Analyzer, 3,12 para el software PIPEcv y 2,83 para el modelo matemático, lo que responde a lo reportado para especies de hoja ancha a nivel mundial

Los modelos matemáticos en general, se ven influenciados al momento de estimar el índice de área foliar por el suministro de datos, en este caso, la representatividad de la muestra de árboles con diámetros mayores a 30 cm fue baja, por lo que se incurre en errores de sobreestimación.

Aunque no se halló una correlación fuerte entre las tres metodologías usadas, todas siguen la misma tendencia y permiten confirmar que todos los métodos usados para estimar índice de área foliar en doseles de bosques presentan errores debido principalmente a la altura de los árboles, a la imposibilidad de obtener con exactitud los diferenciales de sombras por las hojas y a las limitaciones que presenta el modelo matemático cuando se evalúa con diámetros superiores a los 30cm.

El software PIPEcv es una herramienta útil y rápida de utilizar cuando se desea hacer una estimación en corto tiempo del índice de área foliar con una precisión media. Sin embargo, para tener una buena estimación se deben tomar un buen

número de fotografías, de tal forma que la muestra sea representativa del dosel que se quiere estudiar.

No se pudo hallar el factor de conversión que permitiera ajustar el método de estimación del índice de área foliar a través de fotografía plana con el estimado con el Plant Canopy Analyzer, debido a que éstas dos metodologías son diferentes y los análisis estadísticos mostraron que la relación existente entre éstas, es débil.

Se encontró que las precipitaciones no influyen en la variación del índice de área foliar en la plantación de *Eucalyptus grandis*, durante el período de medición, cuando se estudia por separado a los Municipios, pero cuando se compara entre los dos Municipios objeto de estudio se observa que la precipitación interviene en el índice de área foliar de *Eucalyptus grandis*.

Esta investigación, se convierte en una línea base para la estimación de índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en Colombia, y provee datos importantes para futuras mediciones y comparaciones, ya que a hoy no existe en Colombia ningún trabajo que tenga datos sobre este tipo de índice en plantaciones.

Aunque se han desarrollado algunas estimaciones de índice de área foliar en el mundo con fotografía hemisférica, no existe ninguna con fotografía plana que haya sido corroborada con métodos matemáticos y de campo especializados, por lo que este trabajo se convierte en un aporte importante para la estimación de crecimiento con métodos rápidos y fáciles en campo como lo son las fotografía digitales.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda para ajustar el modelo y mejorar su precisión en una futura medición, cortar más árboles en todas las clases diamétricas, enfatizando en tener más en las clases superiores con diámetros iguales o mayores a 30cm.

Las mediciones de índice de área foliar con fines de comparación entre parcelas fertilizadas y no fertilizadas, se recomienda que se realicen posterior a la fertilización, con el fin de observar la respuesta de los árboles fertilizados en expansión foliar.

Para realizar la estimación del índice de área foliar a través del software PIPEcv, se recomienda no tener en cuenta los árboles afectados por sucesos naturales que causen apertura del dosel, ya que esto genera que el software subestime el resultado.

Para realizar la estimación del LAI a través del software de PIPEcv, se debe tener en cuenta el área a investigar, puesto que si es muy grande la cantidad de fotografías resultantes podrían ser muchas y demandaría gran esfuerzo y tiempo para procesar todas las imágenes. También se debe tener en cuenta el pixelaje con el que se toma la fotografía digital, ya que a mayor pixel mayor es el tiempo que demanda el software para procesar la imagen.

Se recomienda contrastar los resultados de la investigación con otras realizadas a la par en las mismas parcelas, con el fin de comparar índice de área foliar con producción y descomposición de hojarasca y disponibilidad de nutrientes en el suelo y así obtener un diagnóstico más completo de los efectos de fertilización en las parcelas estudiadas para la especie.

LITERATURA CITADA

ALLEN, H.L. Manipulating loblolly pine productivity with early cultural treatment., In: S.P. Gessel, D.S. Lacate, G.F. Weetman, and R.F. Powers (eds.). Sustained Productivity of Forest Soils. Proceedings of the 7th North American Forest Soils Conference, University of British Columbia, Faculty of Forestry, Vancouver, B.C., 1990. 301-317 p.

BALSTER, N.J., MARSHALL, J.D. Eight-year responses of light interception, effective leaf area index, and stemwood production in fertilized stands of interior Douglas fir (*Pseudotsugamenziesii* var. *glauca*), 2000. Canadian Journal of Forest Research 30, 733–743 p.

BERGER R., CALDATO S., BÁEZ R., TRUJILLO R. Utilización de índice de área foliar para optimización de inventarios forestales. En:XIII Congreso Forestal Mundial (18-23, octubre: Buenos Aires, Argentina) 2009. 2 p.

CABRELLI, D., REBOTTARO, S., EFFRON, D. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. Quebracho. Revista de Ciencias Forestales, diciembre, número 013. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina, 2006. 17-25 p.

CANHAM, C. D., J.S. DENSLOW, W. J. PLATT, J. R. RUNKLE, T. A. SPIES AND P. S. WHITE. Light regimes beneath closed naopies and tree-fall gaps in temperatura and tropical forest. Canadian Journal of Forest Research 1990. 20: 620-631 p.

CASTILLO L.M., Estudio del área foliar en tres variedades de remolacha de mesa (*Beta vulgaris* L., variedad *cruenta* Alef.) cultivadas bajo invernadero en Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha España, 1994. 159 p.

CHAZDON R. L. AND N. FETCHER. Photosynthetic light environments in a lowland tropical forest in Costa Rica. Journal of Ecology 1984. 72: 553:564 p.

CHAZDON R. Sun flecks and their importance to forest understory plants. Advances in Ecological Research 18, 1988. 1-63 p.

CIFUENTES V.J. Determinación del índice de área foliar en masas forestales usando imágenes Landsat-TM. Revista internacional de ciencias de la tierra Conclusiones de un primer estudio en la sierra norte de Córdoba.1999. ISSN: 1.131-9.100

CORPORACIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y FOMENTO FORESTAL – CONIF. Guía forestal para Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) CONIF. Bogotá, 2002. 26 p.

CUTINI A., MATTEUCCI G., SCARASCIA G., Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests. Forest Ecology and Management 105. 1998. 55–65 p.

DEL POZO P.P., ÁLVAREZ A. Estimación del área foliar de la *Leucaenaleucocephala* de la masa seca de sus hojas [en línea]. En: Deposito de documentos de la FAO. Página Web versión HTML. [Citado 24 abril 2010] Disponible en Internet: <<http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s0e.htm>>.

ESCHENBACH C., KAPPEN. Leaf area index determination in an alder forest: a comparison of three methods. Journal of Experimental Botany, Vol. 47, No. 302, 1996.14-57 p.

FASSNACHT, K.S., GOWER, S.T., NORMAN, J.M., MCMURTRIE, R.E. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. Agricultural and Forest Meteorology.71, 1994.183–207 p.

FERNÁNDEZ E.M., ASNAL W.E., GIAYETTO O., CHOLAKY L., Estimación del índice de área foliar del lino oleaginoso, Revista Facultad de Agronomía Universidad Nacional de la Pampa 4(1), 1989. 47-58 p.

FLORES, F.J., ALLEN, H.L., CHESHIRE, H.M., DAVIS, J.G., FUENTES, M., KELTING, D.L. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. Canadian Journal of Forest Research 36 2006. 1587-1596 p.

GIMENEZ C., Bases fisiológicas de la producción hortícola, Nueva horticultura, 1992. 57-74 p.

GINZO, H.D., Revisión de métodos para medir el área foliar, Ciencia e investigación 24. 1968 83-87 p.

GONSAMO A., PELLIKKA P. Methodology comparison for slope correction in canopy leaf area index estimation using hemispherical photography. Forest Ecology and Management 256, 2008.749–759 p.

HARDY, J. P., R. MELLOH, G. KOENIG, D. MARKS, A. WINSTRALL, J. W. POMEROY AND T. LINK. Solar radiation transmission through conifer canopies. Agricultural and Forest Meteorology 126. 2004. 257-270 p.

HUTCHISON, B. A. AND D.R. MATT. The distribution of solar radiation within a deciduous forest. Ecology Monographs 1977. 47: 47: 185-207 p.

KELLOMAKI, S. P. OKER-BLOM AND T. KUULUVAINEN. The effect of crown and canopy structure on light interception and distribution in a tree stand. In P.M.A. Tigerstedt, p. PUTTONEN, V. KOSKI (edts). Crop Physiology of Forest trees. Helsinki University Press. Helsinki. 1985. 107 – 115 p.

KIEFFER L.A., LALLANA.V.H. Nuevo método para la determinación del área foliar en *Eichhorniacrassipes* (Ponte-deriaceae), Revista Asociación Ciencia Natural Litoral 20(1y2), 1989. 69-79 p.

LALLANA V.H., Medición del área foliar mediante escáner y software IDRISI, Revista FAVE 13(2), 1999. 27-33 p.

LANDSBERG, J. J., y WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. Forest Ecology and Management 95, 1997. 209– 228 p.

LI-COR. LAI-2000 plant canopy analyzer instruction/operatingmanual.1992.

LIEBERMAN, M., D. LIEBERMAN AND R. PERALTA. Forest are nor just swischeese: Canopy stereogeometry of non-gaps in Tropical forest. Ecology 1989 70: 550-552 p.

MACFARLANE, C., HOFFMAN, M., EAMUS, D., KERP, N., ADAMS, M.A., HIGGINSON, S., MCMURTRIE, R. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 143, 2007. 176 – 188 p.

NEL, E.M., WESSMAN, C.A. Canopy transmittance models for estimating forest leaf area index. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 1993. 2579–2586 p.

OSPINA P.C., HERNÁNDEZ R.R., RODAS P.C., URREGO B.J., GODOY B.J., ARISTIZÁBAL V.F., OSORIO L.O., RIAÑO H.N., Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina Colombiana, El Eucalypto, *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden, Blanecolor Cenicafe, 2006. 5,6 p.

PEDUZZI, .Leaf Area Assessments of the Overstory and Understory Vegetation in Pine Plantations Located in South Georgia and North Florida, US. M.S. Thesis. Dept. of Forestry, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2007. 42 p.

PÉREZ AMARO, J. A., GARCIA MOYA E., ENRÍQUEZ QUIROZ J. F., QUERO CARRILLO A. R., PÉREZ PÉREZ J., HERNÁNDEZ GARAY A. Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto “mulato” (*Brachiaria híbrido*, cv), *TécPecu México* 42(3), 2004. 447-458 p.

PLANCHAIS, I., & PONTAILLER, J. Y. Validity of leaf areas and angles estimated in a Beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and a plant canopy analyzer. *Annals of Forest Science*, 56, 1999. 1 – 10 p.

POULSON, P. L. AND W. J. PLATT. Gap light regimes influence canopy tree diversity. *Ecology* 1989. 70:553-555 p.

PUKKALA, T., P. BECKER, T. KUULUVAINEN AND S. P. OKER-MLOM. Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 1991. 55: 295-307 p.

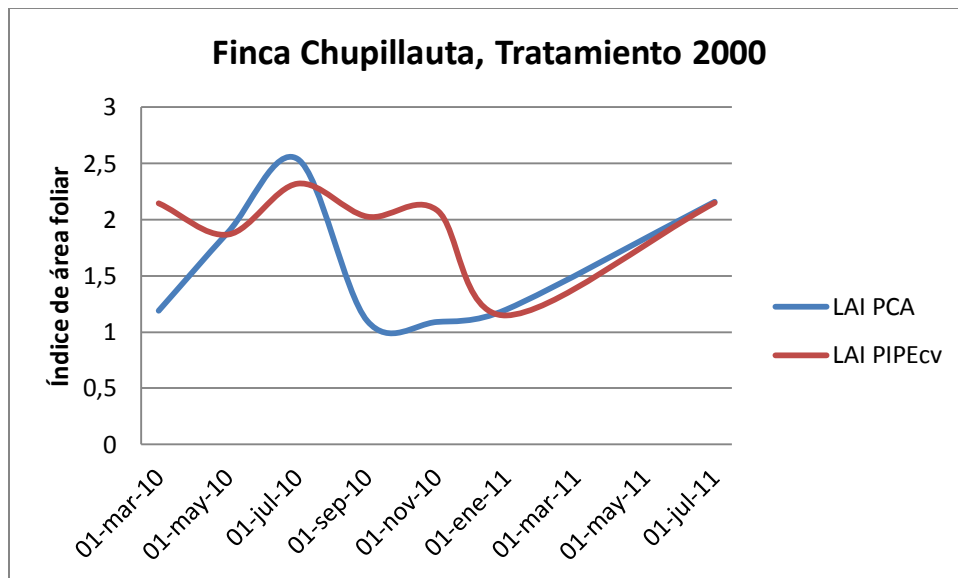
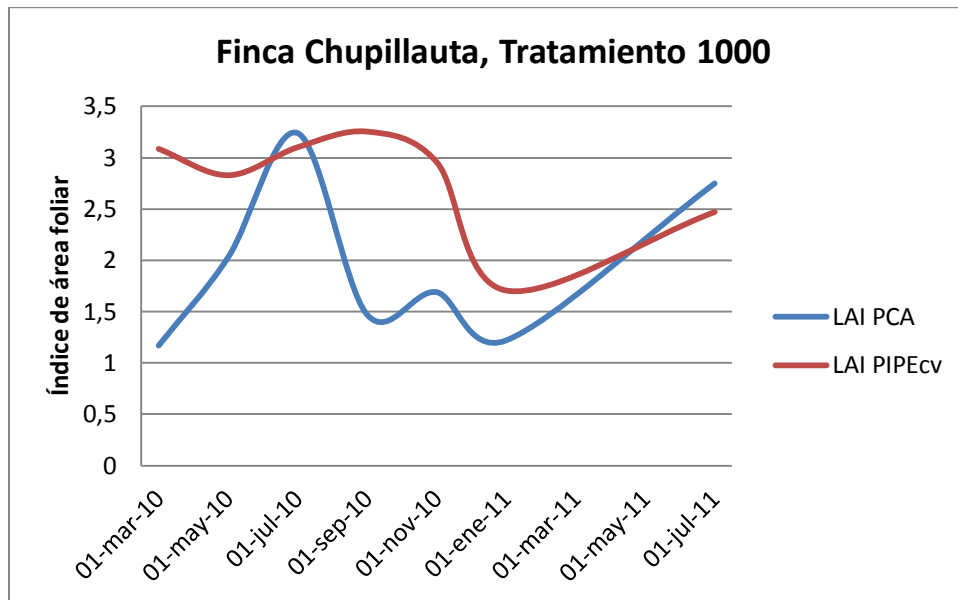
TERBORGH J. The vertical component of plant species diversity in temperate and tropical forests. *The American Naturalist Journal* 26, 1985. 760-76 p.

WARING., SCHROEDER y OREN. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area, Canadian Journal of Forest Research 12, 1992. 556-560 p.

WELLES, J.M., NORMAN, J.M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agronomy Journal 83, 1999. 818–825 p.

ZHANG, Y., CHEN, J.M., MILLER, J.R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. Agricultural and Forest Meteorology 133, 2005. 166–181 p.

Anexo B. Comparación del comportamiento del índice de área foliar de *Eucalyptus grandis*, estimado con el Plant Canopy Analyzer y el PIPEcv.



Anexo C. Comportamiento del índice de área foliar en *Eucalyptus grandis* en las fincas de Smurfit Kappa Cartón de Colombia, respecto a la precipitación.

