

Estimación visual de la sombra en cacaotales y cafetales

Eduardo Somarriba¹

Palabras claves: Agroforestería; dosel; espaciamientos; *Coffea arabica*; *Theobroma cacao*; sistemas multiestratos.

Varios cultivos perennes tropicales importantes (café –*Coffea arabica*–, cacao –*Theobroma cacao*–, té –*Camelia sinensis*–, vainilla –*Vanilla planifolia*–, pimienta negra –*Piper nigrum*–, cardamomo –*Elattaria cardamomum*–, yerba mate –*Ilex paraguarensis*, cupuacú –*Theobroma grandiflorum*–) se cultivan bajo un dosel de sombra. Un **dosel** es el conjunto de hojas y ramas ubicado a cierta altura sobre el piso de la plantación. Las alturas se definen arbitrariamente. Por ejemplo, el **dosel del cacao** está formado por las ramas y hojas de las plantas de cacao que se ubican entre, digamos, 1,5 m (la base de las copas del cacao) y 7 m (la altura máxima de las copas del cacao). El **dosel de sombra** está formado por las hojas y ramas de las plantas ubicadas entre, digamos, 9 m (la base de las copas) y 25 m (la altura máxima de las plantas de sombra en ese sitio). El dosel se puede estratificar a voluntad para representar una gran variedad de sistemas multiestratos. El término **cacaotal** denota una plantación de cacao, la cual incluye, además del cacao, las plantas del piso, otros cultivos asociados y las plantas del dosel de sombra. Lo mismo aplica para cafetales.

El dosel de sombra puede incluir varias especies arbóreas, bananos, bambúes y palmas, de diferentes edades, todos en densidades variables y en diferentes arreglos verticales y horizontales que dan lugar a una rica variedad de tipologías (Rice y Greenberg 2000; Somarriba *et al* 2003). La mayoría de las plantas del dosel de sombra se mantiene en la plantación porque producen frutas, madera, leña, miel o por su valor para la fauna local, medicina, ornato o rito. Por ejemplo, en los cacaotales Mayas del Distrito de Toledo, Belice, los agricultores mantienen especies melíferas a pesar de que la densidad de sus copas y la arquitectura de las plantas no son “buena sombra” para el cacao. Se ha sugerido dejar de llamar-

las “plantas de sombra” y en lugar de eso llamarlas plantas compañeras (Boa *et al* 2000). Independientemente de la razón por la que se les mantiene dentro de la plantación, todas las plantas del dosel de sombra “dan sombra”.

La sombra (o su inverso, la cantidad de radiación que entra a la plantación) determina la tasa fotosintética de los cultivos de los estratos inferiores, su crecimiento, su demanda de nutrientes y de agua, la dinámica de plagas y enfermedades y eventualmente, la producción comercial (Guharay *et al* 2001; Hagggar *et al* 2001; Hagggar y Staver 2001). La regulación de sombra permite al productor cafetalero ajustarse a las condiciones de fertilidad del suelo, manejar las malezas, regular el microclima para controlar plagas y enfermedades, etc. (Muschler 1999). Por ejemplo, en sitios de baja fertilidad se mantiene más sombra para atenuar la demanda de nutrientes del cultivo; en cacaotales jóvenes, con copas pequeñas y poco desarrolladas que proveen poco autosombreamiento, se mantiene más sombra que en cacaotales adultos porque las hojas tiernas se marchitan fácilmente. Es importante contar con un método rápido, barato y confiable para estimar la cantidad de sombra, evaluar el estado de la plantación y planificar las actividades correctivas necesarias.

En este artículo se presenta un método para estimar visualmente el porcentaje de sombra de cafetales y cacaotales. En las siguientes tres secciones se discuten las ventajas y desventajas de los diferentes métodos utilizados para medir la sombra y se describen los pasos prácticos para estimar visualmente la apertura (o su contrario, la oclusión) de las copas y el porcentaje de sombra en la plantación. En el resto del documento se discute la validez de utilizar círculos para aproximar la forma de las

¹ Profesor – Investigador. CATIE. Líder Grupo Temático: Modernización y Competitividad de la Cacaocultura Latinoamericana. E-mail: esomarr@catie.ac.cr (autor para correspondencia)

copas; se analiza la evolución de la sombra al aumentar el diámetro y forma de la copa y el distanciamiento entre plantas; se explora la evolución de la sombra en arreglos cuadrados, rectangulares y triangulares de plantación; se analiza el traslape de copas y se discuten las características de la sombra proyectada por copas en el estrato alto. Al final se mencionan las principales ventajas y limitaciones del método.

LA ESTIMACIÓN DE LA SOMBRA

Los métodos para medir cuánta sombra recibe una plantación pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Los que miden directamente la radiación incidente a una altura determinada.
- Los que miden la apertura del dosel de sombra.

Los métodos del primer grupo pueden medir directamente la radiación incidente a nivel del piso, inmediatamente encima de las copas del cultivo principal o en varios estratos verticales. Esta medición puede expresarse en términos absolutos, ya sean como mediciones radiométricas (por ejemplo: Wm^{-2} , Jm^{-2} , antes también se usaban $cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$ y $langleys\ min^{-1}$), de quantum ($\mu mol\ s^{-1}\ m^{-2}$), fotométricas (lux) o en términos relativos (porcentajes de la cantidad de radiación que se recibe a pleno sol). Las mediciones pueden ser instantáneas o acumular la radiación recibida en un sitio dado por un cierto tiempo. Se puede evaluar la radiación solar global o solamente parte del espectro; por ejemplo, la radiación fotosintéticamente activa (0,4-0,7 μm). Los instrumentos utilizados para estas mediciones son numerosos (World Meteorological Organization 1986).

Los métodos e instrumentos del primer grupo generalmente requieren de condiciones ambientales y procedimientos de medición y análisis complejos y caros. Por ejemplo, si se utilizan valores absolutos de radiación y se pretende realizar comparaciones entre varios sitios o tratamientos experimentales, las mediciones tienen que realizarse simultáneamente en las mismas fechas y horas, a menos que se utilicen acumuladores de radiación, los cuales deben dejarse en el campo durante el periodo de interés y ponen en riesgo la seguridad y manipulación de los instrumentos (por ejemplo, cuando se hace investigación fuera de las condiciones controladas de la estación experimental). Si se pretende obtener estimaciones relativas, se deben tomar simultáneamente mediciones bajo sombra y a pleno sol, lo cual dificulta aún más la comparación simultánea entre sitios y tratamientos.

En el segundo grupo se incluyen los métodos que miden la oclusión o la apertura del dosel de sombra, el cual bloquea (o permite el paso de) la radiación. En este grupo se encuentran las fotografías hemisféricas y los densitómetros ópticos (hemisféricos o de punto). Si se combina la información de apertura del dosel con la ubicación geográfica, el día y la hora de la evaluación (que determinan la declinación y altura solar) se puede estimar la radiación recibida en cualquier sitio sobre la tierra. Por supuesto, esta estimación no toma en cuenta las condiciones locales de nubosidad y orografía que pueden modificar sustancialmente la radiación recibida en una localidad en un momento dado.

Gracias a que la presencia de la ramas y hojas es "estática" (es decir, no cambia tanto, ni tan rápido como los flujos de radiación), los métodos basados en la oclusión del dosel se prestan para mediciones y comparaciones, simultáneas o no, entre tratamientos. Sin embargo, también tienen limitaciones. Por ejemplo, el software para interpretar las fotografías hemisféricas requiere que las condiciones de nubosidad sean homogéneas para diferenciar entre píxeles bloqueados por follaje y ramas de aquellos bloqueados por parches nubosos (Rich 1990). Varios tipos de densitómetros ópticos obvian estos problemas y son recomendados para estimaciones rápidas del porcentaje del dosel de sombra que impide el paso de la radiación. Sin embargo, estos instrumentos son difíciles de obtener para la mayoría de los productores y agentes de extensión.

El método presentado en este artículo pertenece a esta segunda familia de métodos. El porcentaje de sombra que recibe un cultivo se estima con base en la oclusión, el diámetro de copa y la densidad poblacional de las plantas del dosel de sombra.

¿CÓMO ESTIMAR VISUALMENTE CUÁN CERRADA (OCLUIDA) ES UNA COPA?

Los pasos son los siguientes:

- Delinee el perímetro de la copa, caminando varias veces por la periferia, marcando temporalmente en el suelo varias proyecciones del borde de la copa hasta visualizar la figura de la copa (la proyección plana de la copa sobre el suelo). A la vez que se delinea el perímetro, se pueden medir los ejes para estimar el diámetro promedio de la copa.
- Párese en la base del árbol, mire hacia arriba y observe la copa en todas direcciones, buscando seleccionar un "eje de corte" que la divida en dos mitades

iguales (lados A y B). A veces, una copa puede partirse en mitades iguales tomando diferentes ejes de corte (Figura 1). Las mitades se dividen en cuartos (Q1-Q4).

- Observe bien las dimensiones de las masas de follaje y de los “huecos” abiertos en cada mitad de copa. Habiendo cuantificado mentalmente el espacio bloqueado y el espacio abierto en cada mitad de la copa, “mueva mentalmente” el área bloqueada de una mitad a la otra y pregúntese si al mover lo tapado de A a B:

1. ¿Se tapa exactamente el lado B? En caso afirmativo, la oclusión de la copa sería 0,5 (o el 50%).

2. ¿No se llena B? En caso afirmativo se sabrá que la oclusión es <50%, pero habrá que estimar cuánto menos. Para esto, partimos la mitad B en cuartos y preguntamos:

- ¿Se llena exactamente un cuarto? En caso afirmativo la oclusión es del 25%.
- ¿Es más de un cuarto? ¿Cuánto? Para esto, dividimos el cuarto en octavos (un octavo equivale al 12% del área de copa) y después de una rápida reflexión, “al ojo” hacemos una estimación final de la oclusión de la copa. Por ejemplo, si después de considerarlo decidimos que el exceso no llena un octavo, la estimación final de oclusión variará entre 25 – 37%.
- ¿Es menos de un cuarto? ¿Cuánto? Aplicamos el procedimiento recién descrito: dividimos el cuarto en octavos y estimamos al ojo.

3. ¿Se excede B? En caso afirmativo sabremos que la oclusión es >50%. ¿Cuánto se excede? Aplicamos el mismo procedimiento descrito en el paso 2.

La estimación visual de áreas y fracciones se utiliza en fitopatología para estimar la severidad de las lesiones de patógenos sobre la lámina foliar (van Schoonhoven y Pastor-Corrales 1987), en agrostología para estimar la biomasa forrajera antes y después del pastoreo (Shaw et al 1976) y en agroforestería para la regulación de sombra en cacaotales (Somarriba et al 1996).

¿CÓMO ESTIMAR EL PORCENTAJE DE SOMBRA QUE RECIBE UN CULTIVO?

Es necesario tomar cuatro medidas básicas:

- El área total de la plantación o parcela de muestreo (**at**);
- el número de árboles (**n**) en **at**;
- el diámetro de copa promedio (**d**) o los diámetros de copa de cada árbol (**di**); y
- la oclusión promedio de las copas (**o**) ó la oclusión de la copa de cada árbol (**oi**).

El algoritmo de cálculo es sencillo:

- Con el diámetro de copa (**d** o **di**) calculamos el área de proyección vertical de la copa (**a** o **ai**) suponiendo una forma circular [**a** = **d**²*($\pi/4$)];
- ajustamos el área de proyección de copa con el factor de oclusión de la copa (**o** u **oi**) para estimar el área “tapada” por árbol (p.ej., **a*****o**);

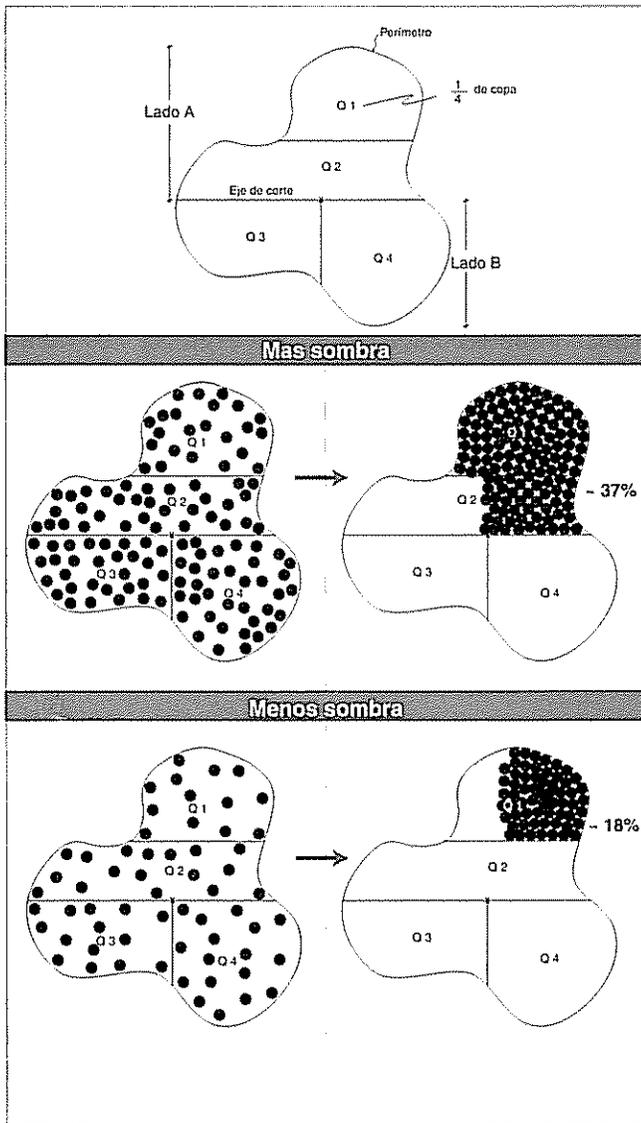


Figura 1. Estimación visual del porcentaje de oclusión de la copa.

- estimamos la superficie tapada en toda la plantación o parcela de muestreo (**b**) expandiendo el área por árbol a toda la población arbórea ($b = n \cdot a \cdot o$); y
- dividimos el área tapada "**b**" entre el área total de la plantación o parcela (**a**), y lo expresamos en porcentaje [p.ej., $100 \cdot (b/a)$].

Por ejemplo, si la plantación mide 0,8 ha ($a_t = 8000 \text{ m}^2$) y contiene $n = 50$ árboles de guaba (*Inga spp.*) con un diámetro promedio de copa $d = 8 \text{ m}$ (área circular por árbol de $50,26 \text{ m}^2$) y una oclusión de copa estimada en $o = 0,45$, el área bloqueada por árbol es de $50,26 \cdot 0,45 = 22,62 \text{ m}^2$ y el porcentaje de sombra del dosel es $b = 100 \cdot (22,62 \cdot 50) / 8000 = 14\%$, aproximadamente. Los valores promedios pueden dar una buena aproximación en doseles mono-específicos, con árboles plantados en arreglos regulares, de similar tamaño y manejo. En doseles heterogéneos se utilizan datos por árbol.

¿ES RAZONABLE SUPONER QUE LAS COPAS PROYECTAN SOMBRAS CIRCULARES?

El círculo es la forma de la proyección vertical de las copas de árboles con copas de formas regulares (elipsoidales y semi-elipsoidales, cilíndricas, esféricas, semiesféricas y cónicas). En doseles mono-estratificados (donde las copas se ubican en el mismo estrato vertical) y saturados (donde las copas de todos los árboles "se tocan" con las de sus vecinos), las copas adoptan formas prácticamente cuadradas o poligonales de muchos lados para los que el círculo es una buena aproximación. Aún en doseles insaturados, donde las copas de los árboles crecen sin tocarse con las de sus vecinos, la mayoría de los árboles desarrollan copas con formas aproximadamente regulares.

LA ESTIMACIÓN DEL DIÁMETRO DE COPAS IRREGULARES

La poda puede producir copas de formas totalmente irregulares (p. ej., *Inga spp.* o *Erythrina spp.* en cafetales). En la Figura 2 se explora un caso hipotético en el que una copa irregular de área conocida (a_c) es estimada por el área de un círculo (a_e) de diámetro promedio "**d**". Interesa determinar en cuántos ejes, espaciados regularmente a lo largo del perímetro de la copa, hay que medir el diámetro de la copa para estimar **d**, de modo que se minimice el error de estimación de a_c . El error se mide como:

$$\text{Error} = 100 \cdot \left(\frac{a_c - a_e}{a_c} \right) \quad [1]$$

El tamaño de muestra requerido para reducir el error depende de la irregularidad de la copa:

- Si la copa es perfectamente circular, un solo eje de medición bastará para estimar **d** y reducir a cero el error.
- Si la forma de la copa departe de la forma del círculo, se necesitará medir más ejes para estimar **d**; entre más irregular la copa, mayor el número de ejes que hay que medir. Once ejes de medición redujeron el error al 2% en la copa irregular de la Figura 2.

Se recomienda medir el diámetro de la copa en 6-12 ejes, igualmente espaciados (60° o 30° de distanciamiento angular entre ejes, respectivamente), para estimar **d**.

Eje	d (m)	\bar{d} (m)	Error (%)
1	16	16,00	99,00
2	8	12,00	12,00
3	16	13,30	37,55
4	14	13,50	41,72
5	11	13,00	31,41
6	11	12,67	24,83
7	8	12,00	11,97
8	10	11,75	7,35
9	11	11,67	5,90
10	10	11,50	2,84
11	11	11,45	1,95

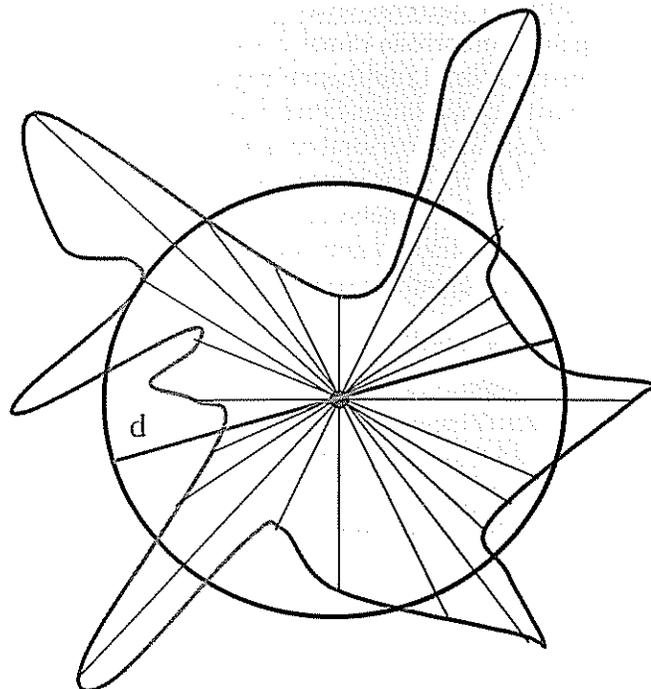


Figura 2. Error de estimación del área de copa usando un número variable de ejes de medición para estimar diámetro promedio de la copa (d)

ARREGLOS DE PLANTACIÓN

Los productores tratan de distribuir uniformemente la sombra por toda la plantación para que las plantas de café o cacao desarrollen y cosechen en forma homogénea. Para homogenizar la sombra, se siembran plantas de sombra y otras especies valiosas (p. ej., *Cedrela odorata* en los cafetales de Turrialba, Costa Rica) y se ralea selectivamente la regeneración natural. *Inga* spp., *Erythrina* spp. o *Gliricida sepium* son las principales especies de sombra plantadas en los cafetales y cacaotales de Centroamérica. Los arreglos cuadrados (p. ej., 6 x 6 m, 10 x 10 m) o ligeramente rectangulares (p. ej., 6 x 9, 8 x 11, 9 x 12, 10 x 15, 15 x 20, 20 x 30 m) son los preferidos; los arreglos triangulares se utilizan poco.

Arreglos fuertemente rectangulares, como rompevientos y barreras vivas para proveer sombra lateral, se utilizan en forma rutinaria en algunas zonas cafetaleras (Somarriba et al 2003). Por ejemplo, en los departamentos de Santa Ana y Ahuachapán, El Salvador, una zona nubosa, los cafetales se protegen del viento con cortinas de copalchi (*Croton reflexifolius*) a 1,0 m entre plantas y 30-50 m entre cortinas (Escalante 2000). En sitios ventosos pero soleados, los agricultores plantan pepeto peludo (*Inga punctata*) a 14 x 14 m (51 árboles ha⁻¹) en las franjas entre cortinas.

Si las cortinas y barreras vivas son muy densas, la copa de cada árbol desarrolla ramas cortas y delgadas dentro de la cortina (por el fuerte sombreado entre árboles vecinos) y ramas largas entre cortinas, formando una "franja rectangular" de sombra a lo largo de la cortina. Conociendo la distancia entre cortinas, el ancho de la franja de sombra (el ancho de la copa) y la oclusión de las copas (generalmente muy alta), se puede estimar fácilmente el porcentaje de sombra en estas plantaciones.

ESPACIAMIENTOS

El espaciamiento (y por ende, la densidad de población) de los árboles de sombra depende de cómo se maneja la forma y el tamaño del árbol:

- Si los árboles son grandes, solo se mantienen pocos árboles por hectárea y viceversa. Por ejemplo, en los cafetales de El Crucero, Nicaragua, la sombra la proveen grandes árboles de chilamate (*Ficus isophlebia*) plantados a razón de 25 árboles ha⁻¹ con copas que alcanzan >20 m de diámetro (Bonilla 1999). A los chilamates (que ramifican en verticilios cuando están desarrollando en altura) se les aplica la práctica del descentrado, la cual consiste en

eliminar (a 10-15 m de altura) el eje central del árbol para que las ramas de los verticilios debajo del corte crezcan hacia arriba y hacia fuera del eje del tronco, expandiendo la copa y diluyendo la sombra. Las ramificaciones secundarias y terciarias finalmente "llenan el hueco del centro de la copa" y crean una sola capa de hojas en la punta de las ramas. Después del descentrado, los árboles se dejan prácticamente a libre crecimiento. Este tipo de doseses, con pocos árboles grandes espaciados ampliamente, se conoce en la literatura inglesa como "parkland agroforestry", por su semejanza con la arborización de parques recreativos.

- Si los árboles de sombra son de porte pequeño (por podas o por su hábito natural de crecimiento) se plantan a mayores densidades. Por ejemplo, en muchos cafetales de Costa Rica la sombra la proveen estacones de poró (*E. poeppigiana*) plantados generalmente a 278 árboles ha⁻¹ (espaciamiento equivalente a 6 x 6 m), con dos descopas totales por año (en enero después de la cosecha del café y en julio al inicio de la maduración y la cosecha). Algunas fincas (incluyendo orgánicas) mantienen hasta 500 árboles ha⁻¹ (espaciamiento equivalente a 4,5 x 4,5 m) de poró, pero con tres podas al año. Árboles de poró a libre crecimiento (sin podas) se plantan a razón de 40-70 árboles ha⁻¹ (espaciamientos equivalentes entre 15 x 15 y 12 x 12 m) en los cafetales de Dipilto, Nicaragua (observaciones personales).

DESARROLLO DE COPAS Y SOMBRA

En cafetales y cacaotales con sombra mono-específica, en arreglos cuadrados, rectangulares y triangulares y a diferentes espaciamentos, la sombra y el "cierre" del dosel evolucionan con el desarrollo de las copas, es decir, con el aumento del diámetro de copa. Hay varias etapas críticas (Figura 3):

- Cuando el diámetro de copa es menor que el espaciamento, la plantación incluye dos condiciones de sombra: 1) sin sombra y 2) con sombra. A medida que aumenta *d*, se reduce el área sin sombra y se aumenta el área con sombra.
- Cuando el diámetro de copa es igual al espaciamento, las copas de los árboles vecinos apenas se tocan sin traslaparse.
- Cuando el diámetro de copa es mayor que el espaciamento, las copas de árboles vecinos se cruzan y se produce una tercera condición de sombra: 3)

sombra con traslape. A medida que el diámetro de copa crece y aumenta el grado de traslape, se llega a una situación donde desaparece el espacio sin sombra y solo prevalecen las condiciones de sombra con y sin traslape.

En el Anexo 1 se presenta la distribución porcentual de las tres condiciones de sombra (sin sombra, sombra con y sin traslape) en las etapas críticas del desarrollo del diámetro de la copa en arreglos rectangulares, cuadrados y triangulares.

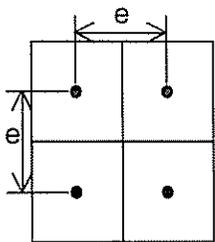
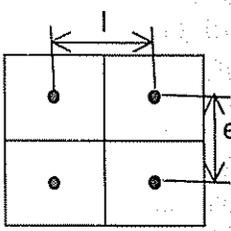
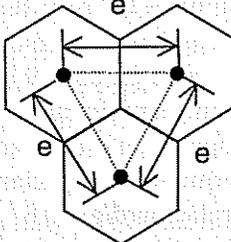
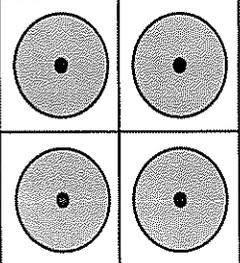
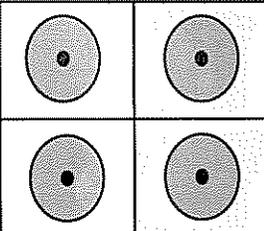
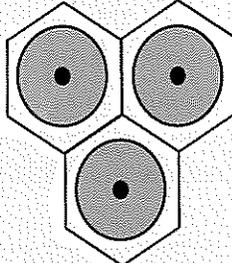
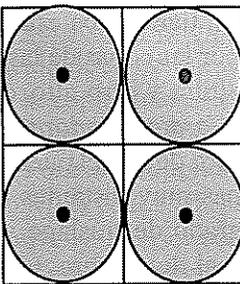
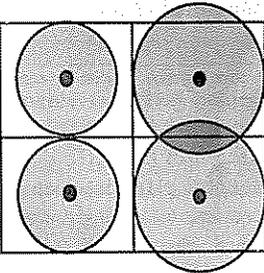
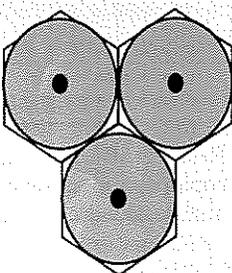
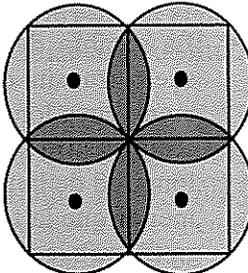
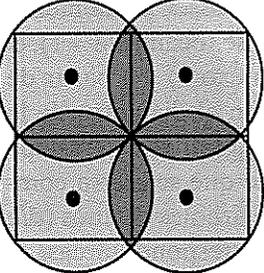
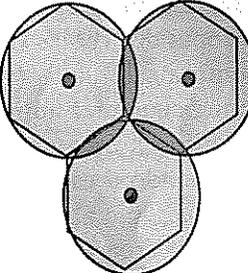
Condición	Cuadrados	Rectangulares	Triangulares
			
Diámetro de copa menor que el espaciamiento			
Diámetro de copa igual al espaciamiento (largo, en caso de arreglos rectangulares).			
Se cierra todo el dosel; no hay espacio abierto			

Figura 3. Condiciones de sombra (sin sombra, sombra con y sin traslape) en tres momentos críticos del desarrollo de la copa y en arreglos de plantación rectangulares, cuadrados y triangulares.

TRASLAPE DE COPAS

Si las copas de dos árboles vecinos se encuentran a la misma altura y sus copas se traslapan, decimos que ocurre traslape a nivel. El traslape ocurre cuando el diámetro de copa (**d**) es mayor que el espaciamiento mínimo entre los árboles (**e**). En arreglos cuadrados y triangulares, se puede utilizar la relación **d/e** para modelar la evolución del traslape de copa entre árboles vecinos (ver Figura 4 para arreglos cuadrados). Por ejemplo, si conocemos el espaciamiento, digamos 12 m, y sabemos que con la especie local de sombra se debe mantener una relación **d/e** = 0,8 para la producir bien café, el nomograma en la Figura 4 indica que se debe mantener el diámetro de copa en unos 9 m. Otra aplicación. Si sabemos que una especie maderable alcanza 15 m de diámetro de copa en su estado adulto, el nomograma indica que se requiere un espaciamiento de unos 19 m para lograr una relación **d/e** = 0,8.

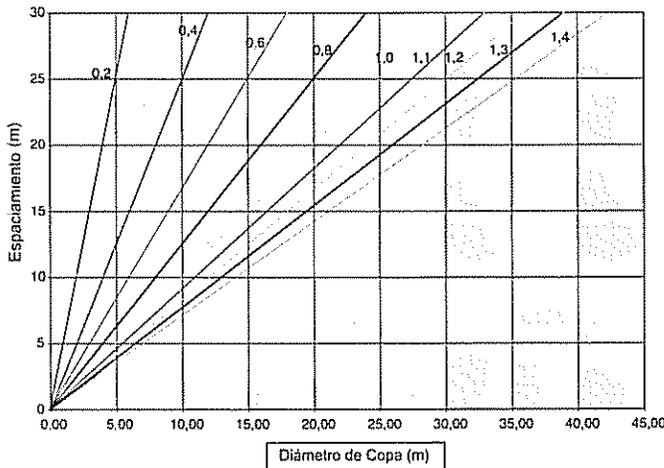


Figura 4. Relación **d/e** ante variaciones en el diámetro de copa (**d**) y el espaciamiento entre plantas (**e**) en arreglos cuadrados de plantación.

El área bajo cada condición de sombra cambia con la relación **d/e**. Así, en arreglos cuadrados, en el momento en que las copas de árboles vecinos se tocan (**d/e** = 1), el área sin sombra es 21,46% (ver Anexo 1) y a partir de ese momento, cualquier aumento en el diámetro de la copa se traduce en un aumento en el área de traslape (Figura 5). Cuando **d** es tan grande que se cierra completamente el espacio abierto entre árboles vecinos (**d/e** = $\sqrt{2}$ = 1,41), el área traslapada corresponde a casi el 60% del área total ocluida. En el campo es poco común encontrar tal grado de traslape entre copas vecinas.

□ Opacidad Nula
 ■ Opacidad sin traslape
 ◻ Opacidad con Traslape

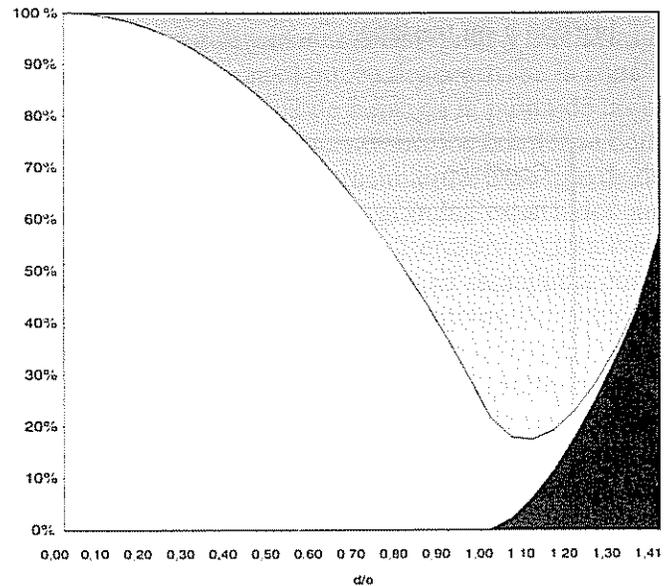


Figura 5. Porcentaje del área sin sombra, sombra sin traslape y sombra con traslape ante diferentes valores de la relación entre el diámetro de copa (**d**) y el espaciamiento entre árboles (**e**) en arreglos cuadrados de plantación.

SOMBRA ALTA

Algunos cacaotales indígenas de Talamanca, Costa Rica, tienen dos estratos de sombra: uno bajo dominado por las copas de las guabas (*Inga spp.*) entre 10-18 m de altura y otro alto, dominado por la presencia de laurel (*Cordia alliodora*) entre 30-35 m. Un árbol de guaba y otro de laurel pueden estar muy juntos en el piso, sus copas muy distantes verticalmente una de otra, con alto grado de traslape vertical pero con muy poco traslape real de sombra. Los agricultores saben que “la sombra baja es densa y que la sombra alta es rala”. ¿Por qué?

- La sombra de una copa a cierta altura sobre el suelo, transita diariamente sobre una franja de terreno cuya longitud depende de la altura a la que se encuentra la copa. Si la copa está baja (10 m), la longitud de la trayectoria diaria de la sombra será menor que la trayectoria de una copa a gran altura (35 m); la sombra transita más rápidamente sobre su trayectoria cuando la copa está alta (Quesada *et al* 1987).

- Si la sombra pasa rápido sobre todos los puntos de la trayectoria, cada punto recibe pocas horas de sombra por día. Si en la trayectoria hay copas de otras plantas de sombra en los estratos más bajos, la duración efectiva del traslape vertical entre las copas es insignificante.
- Si los estratos de sombra están ampliamente espaciados verticalmente, mucha radiación directa oblicua pasa entre las copas y alcanza los doseles bajos de la plantación.
- Si la sombra alta es rala: ¿Se podrían poner en el dosel alto algunas especies valiosas pero que tienen copas muy opacas?, ¿Qué densidades de éstas y otras especies debemos mantener en el dosel alto?, ¿Se podrían plantar árboles valiosos, altos y de hoja fina a altas densidades sin sombrear excesivamente a los estratos inferiores?

LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

El método descrito en este artículo para estimar visualmente el porcentaje de sombra de un dosel tiene dos fuentes importantes de error: 1) la estimación visual de cuán abierta o cerrada es la copa y 2) el delineamiento del perímetro y la estimación del diámetro promedio de copa. La dificultad para estimar cuán abierta es una copa depende en gran medida del tipo de follaje. Por ejemplo, es más difícil estimar visualmente la oclusión de la copa en plantas con follaje muy fino (como las de la familia Mimosoidae) que en plantas de hojas grandes y oscuras. La forma de la proyección vertical de la copa tiene muy poco impacto en la estimación de su oclusión. El error de delinear el perímetro de la copa en árboles altos se puede minimizar utilizando un densitómetro óptico de punto (GRS Densitometer, Forestry Suppliers 2002-2003, www.forestry-suppliers.com), el cual es básicamente un pequeño periscopio con nivel y un visor con un punto central para determinar si la línea de visión toca o no el perímetro de la copa. Se ha mostrado que midiendo un número suficiente de ejes para estimar el diámetro promedio de copa se puede estimar con exactitud el área real de copas irregulares.

El método presentado en este artículo está basado en la proyección vertical del dosel de sombra y por consiguiente, considera únicamente la radiación que incide perpendicularmente sobre la plantación. Fuera de los trópicos, y a medida que nos acercamos a los polos, toda la radiación que incide sobre una plantación (¡ya no de café ni cacao, por supuesto!) es oblicua y por eso las interpretaciones derivadas en este artículo son más aplicables a condiciones tropicales.

A pesar de estas limitaciones, la estimación visual de la sombra es una herramienta rápida, barata y de gran valor para el manejo agroforestal de cafetales y cacaotales. Es importante que el especialista agroforestal "afine su ojo" y calibre sus estimaciones visuales con mediciones de densitómetros ópticos o fotografías hemisféricas. La práctica hace al maestro, por lo que se recomienda evaluar la oclusión de la copa de cada árbol, palma, etc. que encontremos a nuestro paso, estimar visualmente las dimensiones de las copas, los espaciamientos promedios entre árboles, las densidades y el porcentaje de sombra del dosel de cada cacaotal y cafetal que visitamos. El especialista agroforestal dispone de una gran variedad de formas, tamaños y oclusiones de copa para optimizar el diseño agroforestal de cacaotales y cafetales.

AGRADECIMIENTOS

Las figuras fueron elaboradas por Eduardo Somarriba Lucas y Rocío Jiménez. Los cálculos presentados en el Anexo 1 fueron realizados por Francisco Quesada, Escuela de Matemáticas, UCR, E. Somarriba Lucas y el autor. Francisco Jiménez proporcionó información sobre las unidades de medición de la radiación solar utilizadas regularmente. Rocío Jiménez elaboró la Figura 2. John Beer y Guillermo Detlefsen revisaron y comentaron el documento.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Boa, E; Bentley, J; Stonehouse, J. 2000. Cacao and neighbour trees in Ecuador. How and why farmers manage trees for shade and other purposes. UK, CABI Bioscience, Final Technical Report 45 p
- Bonilla, G. 1999. Tipologías cafetaleras en el Pacífico de Nicaragua. Tesis Mag Sc Turrialba, Costa Rica, CATIE. 70 p
- Escalante, M. 2000. Diseño y manejo de cafetales del occidente de El Salvador. Tesis Mag Sc Turrialba, Costa Rica, CATIE. 70 p
- Guharay, F; Monterroso, D; Staver, C. 2001. El diseño y manejo de la sombra para la supresión de plagas en cafetales de América Central. *Agroforestería en las Américas* 8(29):22-29.
- Haggar, J; Schibli, C; Staver, C. 2001. ¿Cómo manejar árboles de sombra en cafetales? *Agroforestería en las Américas* 8(29):37-41
- Haggar, J; Staver, C. 2001. ¿Cómo determinar la cantidad de sombra que disminuya los problemas fitosanitarios de café? *Agroforestería en las Américas* 8(29):42-45
- Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 137 p. (Colección Módulos de Enseñanza Agroforestal no 5)
- Quesada, F; Somarriba, E; Vargas, E. 1987. Modelo para la simulación de patrones de sombra de árboles. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 91 p. (Serie Técnica Informe Técnico no. 118)
- Rice, A; Greenberg, R. 2000. Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio* 29 (3): 167 – 173.
- Rich, PM. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews* 5(1):13-29.
- Shaw, NH; tMannetje, L; Jones RM; Jones, RI. 1976. Pasture measurements. In *Tropical pasture research: principles and methods*.

Eds NH Shaw; WW Bryan Farnham Royal, Bucks, England Commonwealth Agricultural Bureaux p 235-250.
 Van Schoonhoven, A; Pastor-Corrales, MA, Comps 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Cali, Colombia, CIAT. 56 p.
 Somarriba, E; Beer, J; Bonnemann; A. 1996 Árboles leguminosos y maderables como sombra para cacao. El concepto. Turrialba, Costa Rica, CATIE 51 p (Serie Técnica, Informe Técnico no. 274)

Somarriba, E; Harvey, C; Samper, M; Anthony, F; González, J; Staver, C; Rice, R 2003 Conservation of biodiversity in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations. In Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes. Eds. G Schroth; G Fonseca; C A. Harvey; C. Gascon; H. Vasconcelos; A M N Izac Washington Island Press (en imprenta).
 World Meteorological Organization 1986. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications Series No 7. 140 p.

Anexo 1. En toda plantación, cada planta del dosel de sombra “dispone” de un territorio propio, centrado en el sitio de siembra y cuya forma y dimensiones dependen del espaciamiento entre plantas (e) y del arreglo de plantación (ver Figura 3). Al territorio propio de cada planta lo llamamos “área tributaria”. En el cuadro de abajo se presentan los porcentajes del área tributaria bajo cada condición de sombra, en tres etapas críticas de desarrollo del diámetro de copa, en arreglos cuadrados, rectangulares o triangulares de plantación y en función del espaciamiento.

Condiciones de las copas	Arreglos cuadrados	Arreglos rectangulares	Arreglos triangulares
Copas no se tocan:	$d < \text{espaciamiento "e"}$	Ancho rectángulo = espaciamiento "e"	$d < \text{espaciamiento "e"}$
Sombra sin traslape	$(\frac{\pi}{4})(\frac{d}{e})^2 \times 100$	$\frac{\pi}{4k} (\frac{d}{e})^2 \times 100$	$\frac{\sqrt{3}\pi}{6} (\frac{d}{e})^2 \times 100$
Sombra con traslape	0%	0%	0%
Sin sombra	$[1 - (\pi/4) (\frac{d}{e})^2] \times 100$	$(1 - \frac{\pi}{4k} (\frac{d}{e})^2) \times 100$	$(1 - \frac{\sqrt{3}\pi}{6} (\frac{d}{e})^2) \times 100$
Copas apenas se tocan	$d = \text{espaciamiento "e"}$	$d = \text{espaciamiento corto "e"}$	$d = \text{espaciamiento "e"}$
Sombra sin traslape	$(\pi/4) \times 100 = 78,5\%$	$\frac{\pi}{4k} \times 100$	$\frac{\sqrt{3}\pi}{6} = 91\%$
Sombra con traslape	0%	0%	0%
Sin sombra	$100 - 78,5 = 21,5\%$	$(1 - \frac{\pi}{4k}) \times 100$	$100 - 91 = 9\%$
Desaparece el espacio abierto.	$d = \sqrt{2}e$	Sólo si $k \leq \sqrt{3}$: Ahora $d = e\sqrt{1+k^2}$	$d = \frac{2e}{\sqrt{3}}$
Sombra sin traslape	$100 - 57 = 43\%$	$(2 - \frac{(1+k^2)}{2k} (\tan^{-1}(k) + \tan^{-1}(k^{-1}))) \times 100$	$100 - 21 = 79\%$
Sombra con traslape	$(\frac{\pi-2}{2}) \times 100 = 57\%$	$(\frac{(1+k^2)}{2k} (\tan^{-1}(k) + \tan^{-1}(k^{-1})) - 1) \times 100$	$\frac{2\pi\sqrt{3}-9}{9} \times 100 = 21\%$
Sin sombra	0%	0%	0%

Símbolos: d = diámetro de copa; e = espaciamiento. En arreglos rectangulares: e = ancho; l = largo; k = factor de proporcionalidad; es decir $l = k \cdot e$. En el caso rectangular, si el factor k es mayor que la raíz cuadrada de tres, entonces si la copa circunscribe al rectángulo tributario (el diámetro de la copa debe ser igual a la diagonal del mismo) ocurriría que la copa invade más allá del tronco del árbol vecino más cercano, situación que consideramos irreal. Esto explica la condición impuesta.