

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSGRADO

COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLOGICAS (VELOCIDAD DEL
VIENTO Y TEMPERATURA DEL AIRE) EN EL SISTEMA *Coffea arabica*-
Erythrina poeppigiana.

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico
del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales Renovables del Centro Agronómico Tropical de
Investigación y Enseñanza para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

por

JORGE ANTONIO RODRIGUEZ RUBI

Turrialba, Costa Rica
1992

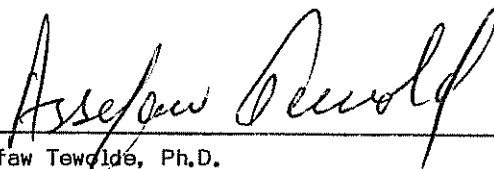
Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:



Ing. Bruno Rapidel
Profesor Consejero



Assefaw Teweide, Ph.D.
Jefe, Area de Posgrado

Ramón Lastra Rodríguez, Ph.D.
Director, Programa de Enseñanza



Jorge Rodríguez Rubí
Candidato

DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo a mi hijo Jossue, del cual estuve separado en su primer año de vida para poder concluir este trabajo.

A mi esposa Elissena, que fue capaz de sacrificar sus aspiraciones profesionales acompañándome y dándome su alegría durante todo un año.

A mis padres:

Salvador Rodríguez W. Y Blanca Rubí M.

Quienes sufren mis penas, gozan de mis alegrías y que a base de sus sacrificios proporcionaron mi educación profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi comité asesor:

BRUNO RAPIDEL
FRANCISCO JIMENEZ Y
HERNAN SOLIS

quienes además de su calidad técnica me demostraron amistad interés por mi trabajo y por mi persona.

A el **NORAD** en Nicaragua, el cual brindó su apoyo, en los momentos mas apremiantes a todos los que fuimos becados por ellos en **CATIE**, durante los años 1990 a 1992.

A **PEDRO FERREIRA** por sus acertados comentarios y consejos finales acerca el trabajo de tesis.

A mis amigos, que me brindaron su presencia y apoyo en los momentos más difíciles, ellos son:

Agustin Ruíz, Ariel Espinoza, Arnulfo Monzón, Denis Hernández, Elida Méndez, Georgina Orozco, Gustavo Arana, Gustavo Arguello, Gustavo Fallas, Manuel Márquez y su esposa Dóris Aleman, Maria Engracia, Mirna Barrios, Pedro Evo, Rosa Maria V, Suichi Okumoto, Suyen Gonzalez y mis demás amigos y compañeros de estudio.

CONTENIDO

	Página.
RESUMEN.....	viii
SUMMARY.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE ANEXOS.....	xiii
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	5
2.1 Modelización de variables meteorológicas en coberturas vegetales homogéneas.....	5
2.2 Perfiles de velocidad del viento y temperatura del aire.....	9
2.2.1 Perfiles de temperatura arriba de superficies naturales.....	12
2.2.2 Perfiles de temperatura entre el dosel de las plantas.....	16
2.2.3 Perfiles de viento en superficies naturales.....	18
2.3 Algunos estudios relacionados.....	20
3. MATERIALES Y METODOS.....	22
3.1 Descripción de la zona de estudio.....	22
3.1.1 Localización.....	22
3.1.2 Clima.....	22
3.1.3 Material biológico.....	23
3.2 Equipo utilizado.....	25
3.2.1 Calibración y construcción de termocuplas..	26
3.2.1.1 Principio de funcionamiento.....	26

3.2.1.2	Fuentes de error en las termocuplas.....	27
3.2.1.3	Magnitud de errores reportados....	29
3.2.1.4	Calibración de termocuplas.....	29
3.3	Plan de mediciones.....	33
3.3.1	Problemática.....	33
3.3.1.1	Posición de Termocuplas en la torre y el mástil móvil.....	33
3.3.1.2	Posición de anemómetros en la torre de referencia y en el mástil móvil.....	34
3.3.1.3	Movimiento del mástil en la parcela experimental.....	35
3.4	Análisis de datos en los diferentes grupos de mediciones.....	38
3.4.1	Grupo uno y dos.....	39
3.4.1.1	Temperatura del aire.....	39
3.4.1.2	Velocidad del viento.....	40
3.4.2	Grupo tres y cuatro.....	41
3.4.2.1	Temperatura del aire.....	41
3.4.2.2	Velocidad del viento.....	43
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	44
4.1	Análisis de los resultados de velocidad del viento.....	44
4.1.1	Descripción de la velocidad del viento en la parcela experimental.....	44
4.1.2	Análisis de la variación horizontal de la velocidad del viento.....	47
4.1.2.1	Estimación de velocidades del viento en torre de referencia....	47

4.1.2.2	Velocidades obtenidas en los grupos de mediciones.....	48
4.1.2.3	Comparación de velocidades del viento en la torre y el mástil mediante ecuaciones de regresión.	51
4.1.2.3.1	Grupo uno de mediciones.....	51
4.1.2.3.2	Grupo dos de mediciones.....	53
4.2	Análisis de los resultados de temperatura del aire.....	57
4.2.1	Descripción de perfiles de temperatura en la parcela experimental.....	57
4.2.2	Análisis de variabilidad horizontal de la temperatura del aire en diferentes estados de crecimiento del poró.....	62
4.2.3	Posibilidad de modelización de las variaciones de temperatura del viento en el sistema en estudio.....	67
5.	CONCLUSIONES.....	72
6.	LITERATURA CONSULTADA	73
7.	ANEXOS.....	76

RODRIGUEZ J. 1992. Comportamiento de las variables meteorológicas (velocidad del viento y temperatura del aire) en el sistema *Erythrina poeppigiana-coffee arabica*.

Palabras claves: Temperatura, Velocidad del viento, Sistema Agroforestal, Micrometeorología, Balance hídrico.

RESUMEN

Se condujo un experimento de junio a agosto de 1992, en una finca cafetalera de Turrialba, Costa Rica, ubicada a 9° 55' latitud norte y 82° 39' longitud oeste, con el fin de evaluar el comportamiento de variables meteorológicas en un sistema agroforestal de café-poró. Las variables consideradas fueron velocidad del viento y temperatura del aire.

Para la toma de datos se utilizaron termocuplas de tipo cobre constantan y anemómetros de tres copas. Los datos fueron almacenados en una central computarizada marca Campbell.

Los sensores fueron colocados sobre una torre fija de 15 m de altura y un mástil móvil de 9 m de alto. El mástil fue colocado en diferentes posiciones dentro de una malla elemental, delimitada por cuatro árboles de poró, para cubrir la tres dimensiones del sistema.

Se encontró además de las diferencias de temperatura del aire medidas a diferentes alturas, diferencias de temperatura del aire a nivel horizontal, éstas fueron provocadas por la influencia del follaje del poró, el cual determina las diferencias a nivel horizontal en el sistema y a nivel vertical.

Las bajas velocidades del viento, características de la zona y la poca sensibilidad de los anemómetros a velocidades del viento inferiores a 0.5 m.s⁻¹, posiblemente no permitieron que se pusieran en evidencia las variaciones horizontales de la velocidad del viento dentro del sistema estudiado.

De forma general se puede afirmar que las variaciones de temperatura en la parcela fueron fácilmente explicadas por las leyes de transferencia de calor, y que el viento que llega a la parcela se reparte de manera relativamente homogénea dentro de la malla elemental en las condiciones del presente estudio.

RODRIGUEZ, J. 1982. Behavior of the meteorological variables (wind speed and air temperature) in an *Poro poeppigiana-Coffea arabica* system.

Key words: Temperature, wind speed, agroforestry system, micrometeorology, hidric balance.

SUMMARY.

The experiment was conducted to evaluate the behavior of meteorological variables in a *Coffea-Erythrina* system, in Turrialba, Costa Rica, located at 9^o, 55' North latitude and 82^o 39' West longitude. The studied variables were wind speed and air temperature.

To collect data, copper constantan thermocouples and anemometers of three cups were used. The data were recorded in a Campbell computerized system.

The sensors were placed on a fixed 15 m tower with a movable 9 m mast. The mast was placed on different positions inside the elemental cell, bordered by 4 poro trees, to cover the three dimensions of the system.

Likewise it was found that the temperature differences of the air measured at different height, and the temperature differences of the air on a horizontal plane, were caused by the foliage influence of poro trees, which determine the differences at the horizontal and vertical levels in the system .

The low wind speed of the area and the anemometers' insensibility to speed lower than 0.5 m.s⁻¹. might not have allowed the manifestation of the horizontal variations of the wind speed in the system studied.

In a general way, we can ascertain that the temperature variations in the plot were easily explained by thermo transference laws, and that the wind that reaches the plot is spread through the elemental cell in a relatively homogeneous way in the present study conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura No.		Página.
1	Perfiles típicos de temperatura (T), humedad del aire (e) y concentración de CO ₂ (C) dentro de una cobertura vegetal (adaptado de Jiménez y Lhomme, 1990).....	11
2	Perfiles horarios de temperatura sobre una cobertura de pasto (adaptado de Rosemberg, 1983)..	13
3	Perfiles medios horarios de temperatura arriba de un cultivo de soya (adaptado de Rosemberg, 1983).....	15
4	Perfiles medios horarios de temperatura arriba y dentro, de un cultivo de soya (adaptado de Rosemberg, 1983).....	17
5	Perfil de la velocidad del viento dentro de la cobertura vegetal (adaptado de Jiménez y Lhomme, 1990).....	19
6	Disposición de la plantación en la parcela experimental.....	24
7	Esquema de una termocupla.....	27
8	Posiciones del mástil en la parcela experimental..	37
9	Evolución de velocidades del viento en el primer grupo de mediciones.....	45
10	Evolución diaria de la velocidad del viento en el grupo dos de mediciones.....	46
11	Velocidades del viento estimadas en el plano horizontal a 3.5 y 6.5 m de altura en el grupo uno y dos de mediciones.....	55
12	Perfiles de temperatura en un día despejado y con suficiente desarrollo de la vegetación.....	58
13	Perfiles de temperatura en un día lluvioso y con suficiente desarrollo de la vegetación.....	59

14	Perfiles de temperatura después de una poda total del poró.....	61
15	Perfiles de temperatura para diferentes posiciones del dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el primer grupo de mediciones.....	63
16	Perfiles de temperatura para diferentes posiciones del dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el segundo grupo de mediciones.....	64
17	Perfiles de temperatura para diferentes posiciones del dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el tercer grupo de mediciones.....	65
18	Perfiles de temperatura para diferentes posiciones del dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el cuarto grupo de mediciones.....	66
19	Cartografía de perfiles medidos en el tercer grupo de mediciones.....	68
19	Cartografía de perfiles medidos en el cuarto grupo de mediciones.....	70

LISTA DE CUADROS

Cuadro No.		Página
1	Velocidades del viento obtenidas en diferentes alturas en el mástil y torre de referencia en el grupo uno de mediciones.....	49
2	Velocidades del viento obtenidas en diferentes alturas en el mástil y torre de referencia en el grupo dos de mediciones.....	50
3	Parámetros estimados de regresiones entre velocidades del viento a la misma altura en el grupo uno de mediciones.....	52
4	Parámetros estimados de regresiones entre velocidades del viento a la misma altura en el grupo dos de mediciones.....	53

LISTA DE ANEXOS

ANEXO No.	Página
1. Resultados completos del modelo ajustado.....	77

1. INTRODUCCION

En las regiones tropicales americanas el uso de sistemas agroforestales es una de las opciones más atinadas para la solución de los problemas de degradación de los suelos y de baja productividad (Meza y Sánchez, 1990). Ellos funcionan como un sistema óptimo de producción sostenible, cuyo objeto es optimizar la producción por unidad de superficie, respetando el principio de agricultura sostenible (Mendieta, 1984).

En distintas regiones del mundo existen sistemas agroforestales utilizados, creados y adaptados a diferentes características ambientales. A pesar de esto todavía muchos permanecen como iniciativas, en fases de progreso, en evaluación de sus componentes (interacciones) o en identificación y entendimiento de prácticas y técnicas para su desarrollo.

Los problemas científicos relacionados con los aspectos climáticos del funcionamiento de los sistemas agroforestales (exceso o deficiencia de agua, radiación, competencia por la luz o por el agua, optimización de los arreglos espaciales, etc.) que plantea la instalación de sistemas agroforestales solamente pueden encontrar solución a través de la experimentación, la cual es cara, y proporciona resultados parciales y a largo plazo.

Los modelos informáticos de balance hídrico permiten razonar en términos sintéticos los problemas hídricos de las plantas,

simulando los intercambios de agua y energía entre las plantas, suelo y la atmósfera (Maraux y Rapidel,1990). Disponer de esta herramienta para sistemas agroforestales permitiría acelerar los procesos de investigación y mejorar la transferencia y manejo de los sistemas agroforestales.

Los modelos de simulación de balance hídrico existentes en la actualidad fueron creados para analizar los procesos de intercambio de agua y energía sobre coberturas homogéneas, como son los cultivos anuales. No existe actualmente reportado en la literatura científica ningún modelo de balance hídrico que tome en cuenta la heterogeneidad de los sistemas agroforestales (*Maraux,1992).

En vista de esto, el Programa de Agrometeorología pretende elaborar un modelo que permita evaluar el balance hídrico del sistema agroforestal Café-Poró a partir de parámetros meteorológicos, edáficos y de características propias de los cultivos.

Para la elaboración de este modelo computarizado de balance hídrico para sistemas agroforestales (MBHSAF), la metodología general cuenta con dos partes principales que son: la determinación de la demanda climática sobre la cobertura vegetal por un lado (parte aérea) y la competencia entre árboles y

* Comunicación personal, líder del Proyecto de Agrometeorología del CATIE.

cultivos para la satisfacción de las necesidades hídricas por otro lado (parte subterránea).

Los cálculos de la demanda de agua por la cubierta vegetal estarán basados en ecuaciones tradicionales de evapotranspiración. Estas fórmulas incluyen factores radiactivos, atmosféricos y biológicos. De acuerdo a estos factores (indispensables para la estimación del consumo de agua del sistema agroforestal) la modelización requiere de tres estudios separados que son:

- 1- La repartición de la radiación disponible por estrato.
- 2- La modelización de las resistencias estomáticas.
- 3- La partición entre el calor latente y el calor sensible en cada estrato que permite determinar la evaporación de cada estrato.

Para determinar la evapotranspiración de una cobertura vegetal homogénea se relaciona la evapotranspiración global de una cobertura vegetal con los flujos elementales a nivel de las hojas. Se han hecho también estudios de mediciones de la partición de energía sobre coberturas relativamente heterogéneas, como son los bosques (Shuttleworth *et al.*, 1984), sin embargo, aún aquí se considera homogeneidad horizontal de la cobertura. Esto no es válido hacerlo para coberturas heterogéneas como los

sistemas agroforestales, debido a diferencias que presenta la vegetación tanto con la altura como en el plano horizontal.

Entonces para poder determinar los flujos de calor latente y calor sensible dentro del sistema agroforestal es necesario conocer cual es el comportamiento de todos los factores que determinan estos flujos.

Es por esta razón precisamente, que se quiere conocer si existe variación de la velocidad del viento, humedad relativa y temperatura en el plano horizontal, y si existe esa variación evaluar la posibilidad de modelizarla.

Las mediciones se realizaron sobre el sistema agroforestal café-poró. Este sistema de cultivo se encuentra altamente difundido en Costa Rica, con buena aceptación de parte de los agricultores (CATIE, 1986).

El presente trabajo se realizó con los objetivos de: determinar el patrón de conducta espacial dentro del sistema agroforestal café-poró, de las variables meteorológicas velocidad del viento y temperatura del aire y evaluar la posibilidad de modelización del comportamiento horizontal de estas variables.

Hay que señalar que no se evaluó el comportamiento de la humedad relativa del aire en vista de los problemas instrumentales de calibración de termocuplas.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Modelización de variables meteorológicas en coberturas vegetales homogéneas.

Para realizar la modelización del microclima vegetal generalmente se supone que la cubierta vegetal es homogénea horizontalmente, y se divide en una sucesión de capas horizontales, cada una caracterizada por un espesor δz_i y un índice parcial de área foliar δL_i .

Para la capa i se pueden escribir las siguientes tres ecuaciones de conservación (Jiménez y Lhomme, 1990).

- La conservación horizontal de la energía dentro de una capa, suponiendo un régimen momentáneamente estacionario:

$$\delta R_{n,i} = \delta H_i + \delta H \lambda E_i$$

Donde $\delta R_{n,i}$ representa la radiación neta absorbida por la capa i , δH_i y $\delta H \lambda E_i$ los flujos parciales de calor sensible y latente transferidos entre las hojas de la capa i . Si el flujo es positivo la capa representa una fuente de la magnitud considerada (vapor o calor) y si el flujo es negativo representa un sumidero de la entidad correspondiente.

- La conservación vertical del calor sensible entre capas.

$$H_i = H_{i+1} + \delta H_i$$

Siendo H_i el flujo de calor sensible que intercambia la capa i con la capa superior, H_{i+1} el flujo de calor intercambiado con la capa inferior y δH_i la contribución propia de la capa i .

- La conservación vertical de calor latente entre capas.

$$\lambda E_i = \lambda E_{i+1} + \delta \lambda E_i$$

Siendo λE_i el flujo de calor latente intercambiado con la capa superior λE_{i+1} con la capa inferior y $\delta \lambda E_i$ la contribución propia de la capa i .

En estas ecuaciones los flujos convectivos son de dos tipos: los flujos horizontales (δH_i , $\delta \lambda E_i$) que representan transferencias entre las hojas de una capa y el aire circundante, y los flujos verticales (H_i , λE_i) que son transferencias entre dos niveles en el aire dentro de la cubierta. Si T_{s1} , T_{a1} y e_{s1} representan respectivamente la temperatura media de las hojas, la temperatura media del aire y la presión real de vapor de agua en la capa i , y suponiendo que el vapor de agua en la capa i y el vapor de agua dentro de las cavidades estomáticas está a saturación a la temperatura T_{s1} de las hojas, los flujos entre las hojas y el aire, por unidad de área foliar, se escriben de la siguiente manera:

$$\delta H_i = \rho C_p (T_{s1} - T_{a1}) / r_{b1}$$

$$\delta \lambda E_i = (\rho C_p / \tau) [e^*(T_{s1}) - e_{a1}] / (r_{s1} + r_{b1})$$

Siendo $e^*(T)$ la presión de vapor saturante del agua a la temperatura T , r_b la resistencia de capa límite, r_s la resistencia estomática de las hojas, ρC_p es la capacidad calórica del aire, ρ la masa volumétrica del aire y C_p el calor específico del aire a presión constante. En cuanto a los flujos verticales se detallan a continuación:

$$H_i = \rho C_p (T_{a1} - T_{a1-1}) / r_{a1}$$

$$\lambda E_i = (\rho C_p / \tau) (e_{a1} - e_{a1-1}) / r_{a1}$$

Siendo r_{a1} la resistencia aerodinámica que encuentra los flujos verticales para pasar de la capa i a la capa $i-1$.

En la modelización clásica del microclima vegetal los perfiles de radiación neta, de velocidad del viento, difusividad turbulenta y de resistencia estomática son considerados como conocidos y constituyen entradas al modelo, lo que significa que la radiación neta en cada capa y todo el sistema de resistencias son conocidos. Las incógnitas que se intenta determinar son los perfiles de temperatura y humedad del aire del perfil y el perfil de temperatura de las hojas, es decir un valor de cada magnitud para cada capa (Jiménez y Lhomme, 1990).

Esta manera de interpretar y simular los perfiles del dosel vegetal es válida únicamente para coberturas horizontales y homogéneas de vegetación en las cuales el único eje de

variabilidad es el eje vertical. En pequeñas parcelas, los microclimas pueden ser determinados también por la tasa a la cual los flujos horizontales cambian con la distancia desde el borde de ataque de la parcela, lo que se llama advección (Monteith, 1973).

La mayoría de los modelos para analizar los intercambios del sistema suelo, planta y atmósfera, asumen que las condiciones son horizontalmente homogéneas en el dosel (Graser *et al.*, 1987).

Gourdiaan, (1989), describe tres modelos diferentes para analizar los intercambios de agua y energía entre el cultivo, el suelo y la atmósfera. Una primera aproximación es llamada modelo de hoja grande, donde la superficie del follaje es caracterizada por una resistencia de un solo cultivo y por la resistencia de la capa atmosférica. Una segunda aproximación con su máxima mejoría, es el modelo de dosel de invernadero, el cual tiene estratificación con respecto a la radiación y la velocidad del viento, pero no con respecto a la temperatura y humedad del aire. En la tercera aproximación, se incluyen también los gradientes en las propiedades del aire dentro del dosel.

Este mismo autor encontró que para el cálculo de los flujos totales, el modelo del dosel de invernadero era suficiente. En modelos complicados, la inestabilidad numérica permanece como un problema asociado, probablemente por la multitud de las retroalimentaciones.

En sistemas agroforestales no se pueden aplicar estos modelos tradicionales de balance de agua y energía, debido a la heterogeneidad que presentan tanto a nivel vertical como en el plano horizontal.

Algunos estudios recientes han mostrado que las suposiciones de que las condiciones son horizontalmente uniformes en el dosel y que las diferencias en concentración relativamente pequeñas con respecto a la escala de turbulencia, no son válidas bajo circunstancias particulares (Graser, *et al*, 1987).

Este mismo autor evaluó el efecto de cambiar el espaciamiento entre las hileras de sorgo sobre los patrones de temperatura del aire. En este ensayo encontró que los gradientes de temperatura horizontal fueron mayores y más persistentes en el campo con espaciamiento entre hileras de 1.52 m, que en el espaciamiento de 0.76 m. Esto sugiere una penetración de ráfagas de aire sobre el dosel. Los patrones de temperatura sugieren una circulación entre líneas anchas.

2.2 Perfiles de velocidad del viento y temperatura del aire.

Se define el perfil de una determinada entidad como el cambio de potencial con la altura arriba o dentro del dosel del cultivo (Monteith, 1973).

Con instrumentación suficientemente precisa, pueden ser medidos perfiles de velocidad del viento, temperatura y concentraciones de gases.

En la Figura 1 se muestran algunos perfiles idealizados representativos de un cultivo de cereal en crecimiento, de 1 m de altura con la mayoría del follaje verde y ubicado de la mitad de la altura hacia arriba. La forma de los perfiles encima del dosel está determinada parcialmente por turbulencias, las cuales son producidas por el arrastre de los elementos del cultivo por el viento que está soplando sobre éste y parcialmente por los flujos del cultivo (Monteith, 1973).

Los mismos principios son aplicados a capas límites turbulentas, sobre los cultivos, pero las difusiones están asociadas con las turbulencias. El cambio del tamaño de la turbulencia con la altura y la dependencia de la velocidad del viento de mezclas turbulentas causa la forma de los perfiles, los cuales son influenciados por ambos: la velocidad del viento y las propiedades de la superficie que generan turbulencia.

Los perfiles de temperatura y humedad del aire en el dosel son una consecuencia directa del balance de energía del sistema.

La pendiente del perfil indica la dirección del flujo a cada nivel. Cuando un cultivo es libremente abastecido con agua, tal

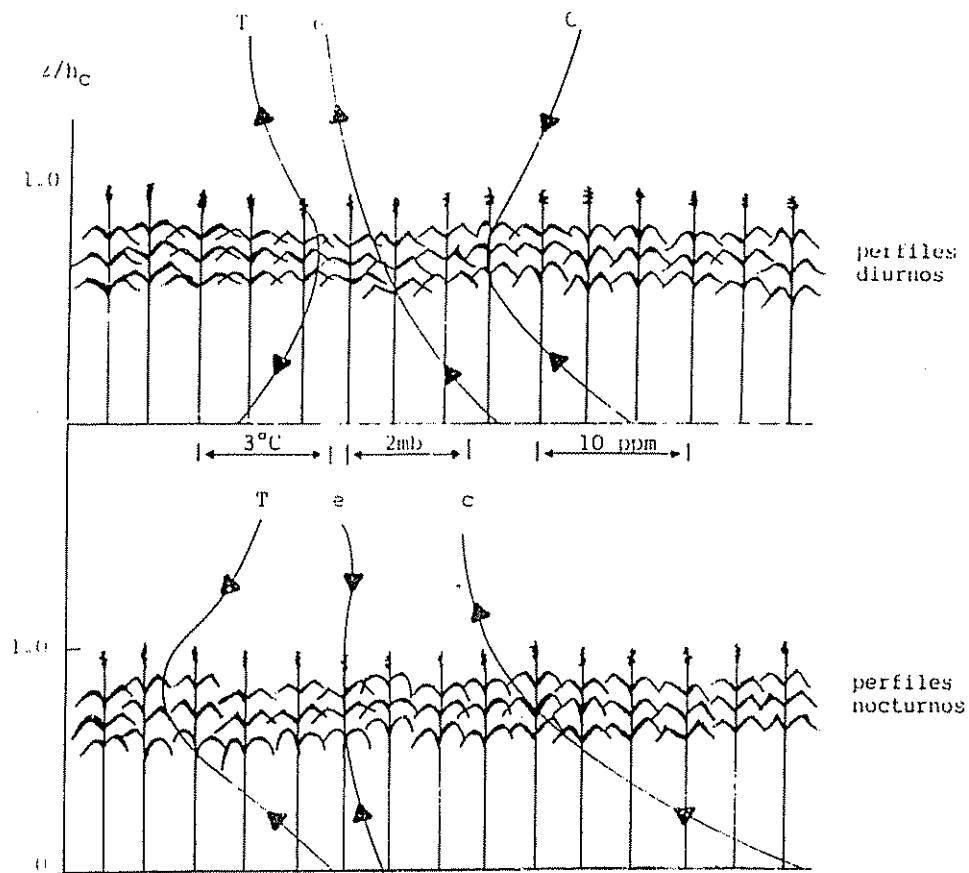


Figura 1. Perfiles típicos de temperatura del aire (T), humedad del aire (e) y concentración de CO₂ (C) dentro de una cobertura vegetal (adaptado de Jiménez y Lhomme, 1990).

que, la resistencia estomática de las hojas superiores es pequeña (1 a 3 s.cm^{-1}), hay frecuentemente un máximo de temperatura cerca del tope del follaje durante el día (asociado con un flujo de calor sensible hacia arriba). Cuando el máximo suministro de agua es restringido y la resistencia estomática es grande, el máximo de temperatura persiste aún en el día y está más bajo en el dosel, alcanzando algunas veces la superficie del suelo. En una noche clara, hay un mínimo de temperatura cerca del tope del dosel, este mínimo tiende a desaparecer si el cielo llega a nublarse. Durante el día la presión de vapor usualmente disminuye desde la superficie del suelo hacia arriba. Hay una disminución mucho más pequeña durante la noche, asociada con una presión de vapor mínima cerca del tope del dosel cuando el rocío se está formando (Jiménez y Lhomme, 1990).

2.2.1 Perfiles de temperatura arriba de superficies naturales.

Durante la noche la temperatura del suelo y la superficie de los cultivos disminuye más rápidamente que la del aire. El aire en contacto con la superficie pierde energía hacia la superficie comenzando a enfriarse violentamente en el proceso. Sin embargo, se desarrolla una inversión de temperatura y la atmósfera bajo ésta se encuentra termalmente estable (Rosemberg, *et al.*, 1983).

En la figura 2, se observa la existencia de inversión de temperatura. Las leyes de inversión pueden ser locales y

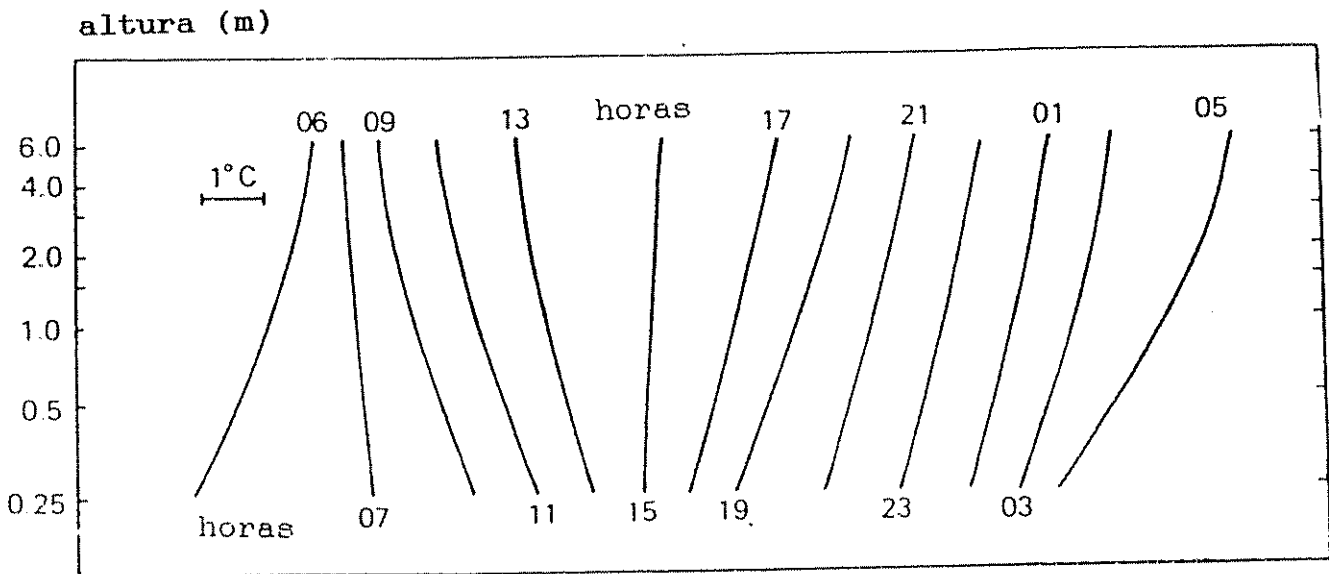


Figura 2. Perfiles horarios de temperatura sobre una cobertura de pasto (adaptado de Rosenberg, 1983).

alcanzar solo unos pocos metros o pueden ser a gran escala y dominar el clima en vastas regiones por considerables períodos de tiempo. Durante el día la temperatura decrece con la altura, y son normales las condiciones inestables de la atmósfera. Las inversiones de temperatura pueden desarrollarse durante el día cuando la evaporación rápida enfría la superficie del suelo o del dosel del cultivo y si se encuentra pasando aire fresco sobre el campo. También se pueden desarrollar inversiones de la temperatura durante el día cuando el rápido enfriamiento de la evaporación hace que la superficie del suelo o del dosel del cultivo se vuelvan más frías respecto al aire que pasa sobre el campo (Rosemberg, *et al*, 1983).

En la figura 3, se observa que durante la mayoría de las horas del día después de las 10:00 horas, los perfiles de temperatura fueron invertidos. Este autor explica que esto ocurrió porque existe aire seco y tibio que está pasando sobre el cultivo de soya, el cual está transpirando rápidamente y supliendo energía para la transpiración. Este efecto de consumo más que de generación de calor sensible se refiere generalmente como evidencia de convección de calor sensible.

Es importante darse cuenta que la atmósfera está comúnmente compuesta de un número de capas de estabilidad térmica diferente. Durante las horas del día la capa más baja inestable está usualmente afectada por la capa de inversión. La capa de

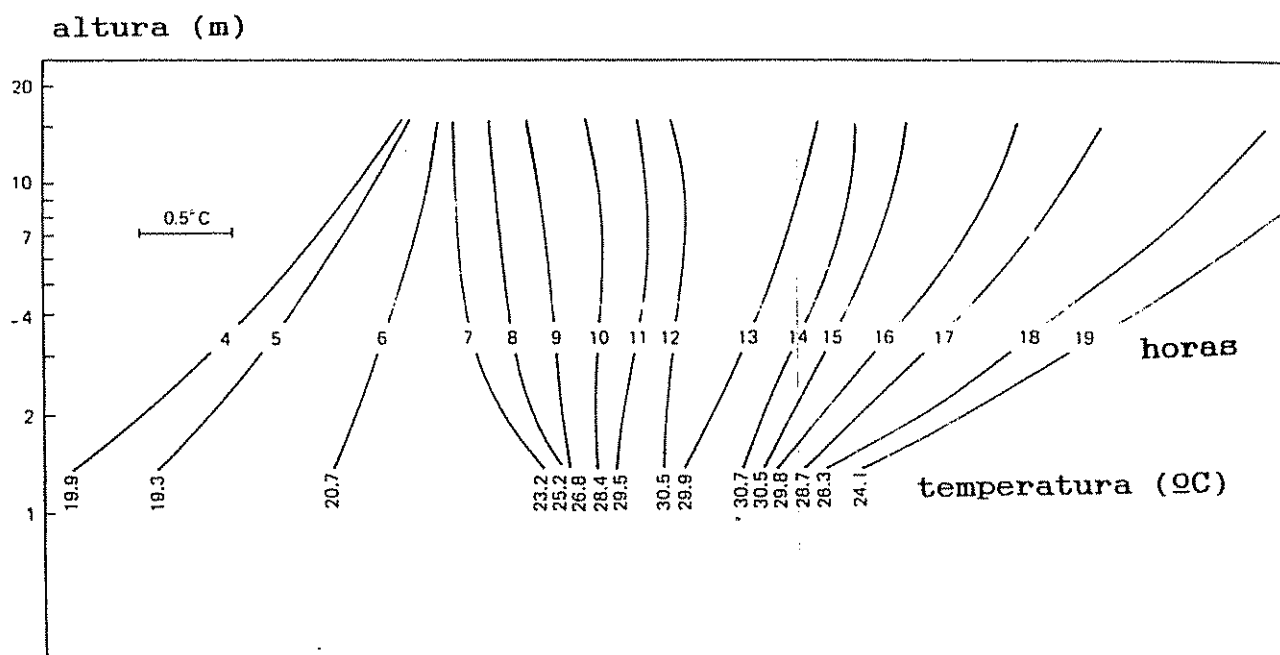


Figura 3. Perfiles médios horarios de temperatura arriba de un cultivo de soya (adaptado de Rosemberg, 1983).

inversión impele el movimiento vertical y el calor y el transporte de vapor está limitado a la capa inferior. (Oke, 1978)

2.2.2. Perfiles de temperatura entre el dosel de las plantas.

Los perfiles de temperaturas medidos entre el dosel de los cultivos son bien diferentes de los medidos por encima de este.

En la figura 4, son mostrados algunos ejemplos de perfiles de temperatura medidos sobre el transcurso del día en un campo con suficiente humedad sembrado con de soya.

Note que la pendiente de perfil indica los flujos de calor sensible a cada nivel. A menudo durante las horas de día hay una temperatura máxima cerca de la media a la parte alta del dosel. Las máximas temperaturas ocurren cerca del nivel de máxima concentración de área foliar, donde es absorbida la mayor parte de la radiación. Arriba de este nivel el perfil es generalmente errático. Abajo de este nivel hay una inversión de temperatura porque el dosel está más caliente que la superficie cerca del suelo.

Durante la noche, los perfiles de temperatura en los niveles del dosel son casi isotérmicos ya que el dosel atrapa las longitudes de onda de la radiación saliente. Los perfiles de temperatura están invertidos en la parte superior del fuste debido a la radiación de onda larga transmitida al cielo.

altura (m)

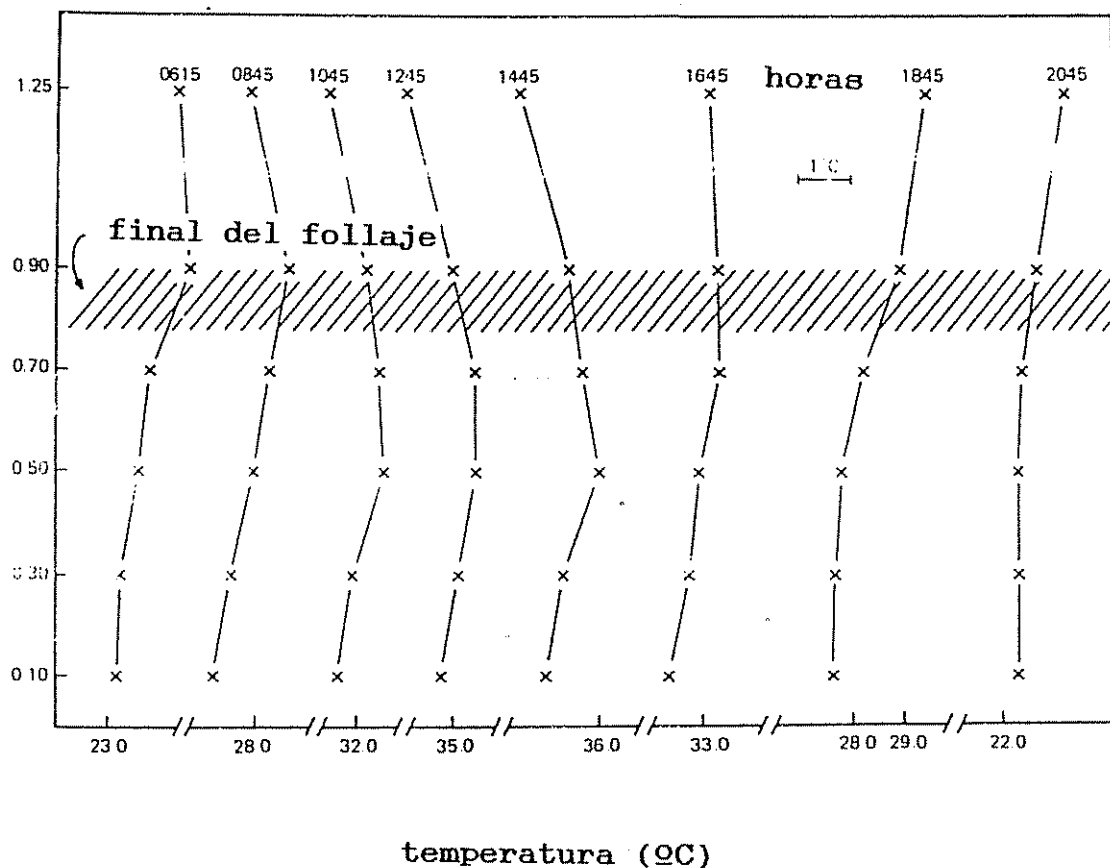


Figura 4. Perfiles medios horarios de temperatura arriba y dentro de un cultivo de soya (adaptado de Rosenberg, 1983)

Los perfiles descritos anteriormente ayudan a ilustrar el fenómeno de la transferencia de calor dentro del fuste del cultivo de manera muy general. Las situaciones reales son complicadas por muchos factores. A medida que el día progresa, por ejemplo, las resistencias estomáticas varían y las fuentes y sumideros de calor sensible y latente sufren considerables cambios (Rosemberg, *et al*, 1980).

2.2.3. Perfiles de viento en superficies naturales.

Existe mucha dificultad en describir con exactitud perfiles de promedios de velocidad del viento dentro del dosel de los cultivos. Las relaciones de velocidad del viento entre las coberturas son aún más difíciles de establecer. Un buen ejemplo de la complejidad de la estructura del viento es encontrado en la figura 5.

Sobre el dosel vegetal, la velocidad del viento es una función logarítmica de la altura. Dentro del dosel, la velocidad del viento disminuye, en forma aproximadamente exponencial desde el tope de la cubierta hasta la superficie del suelo (Jiménez y Lhomme. 1990).

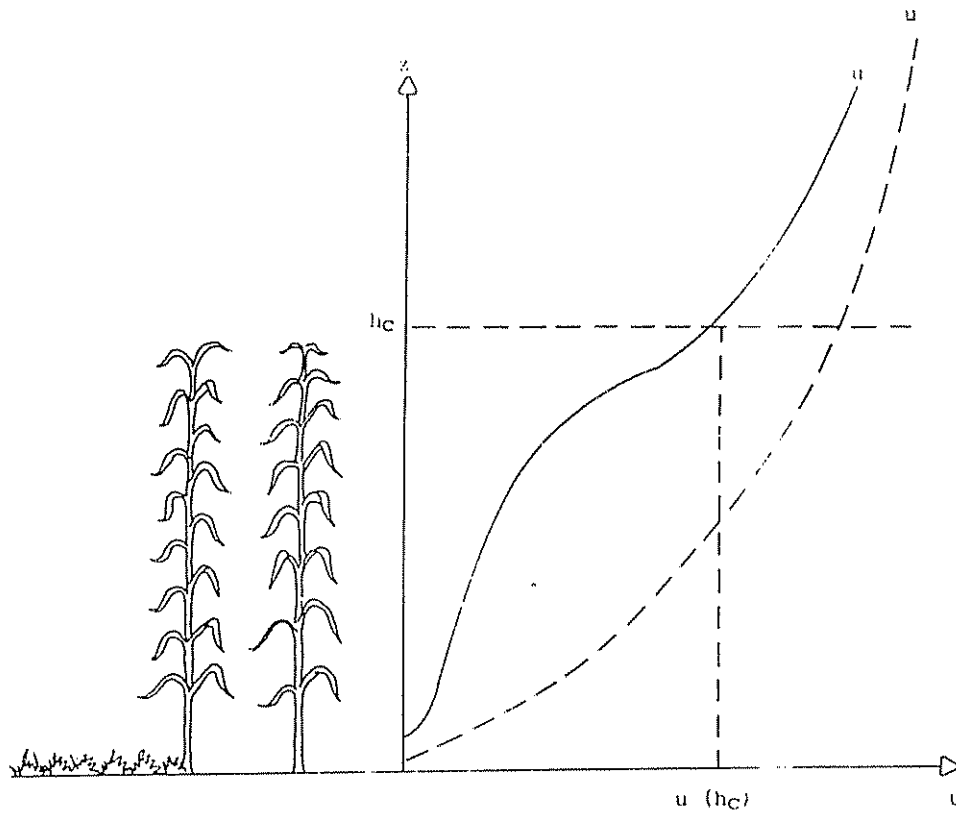


Figura 5. Perfil de la velocidad del viento dentro de la cobertura vegetal (adaptado de Jiménez y Lhomme, 1990).

2.3. Algunos estudios relacionados.

En este capítulo se presentan algunos estudios relacionados con las mediciones de las variables meteorológicas: velocidad del viento y temperatura del aire en coberturas naturales.

Hasker Jr., *et al*, (1974), estudiaron las variaciones verticales de la temperatura del aire en una plantación de pino. Observaron que en un día claro ocurrió un gradiente inestable de temperatura sobre los árboles, mientras una fuerte inversión de temperatura (8 °C) se desarrolló bajo las capas. Durante la noche, la región bajo las capas se volvió débil e inestable, pero la capa atmosférica sobre los árboles era entonces estable. En un día lluvioso, la fuerza de inversión de la temperatura diaria fue menor de 1 °C. La posición de las temperaturas máximas en la parte alta de los árboles responde a la elevación solar, descendiendo eventualmente, unos 2 metros a la región de máxima densidad foliar, cuando los rayos solares penetran en las copas de los árboles.

Weiss and Allen Jr., (1976). estudiaron los flujos verticales y horizontales sobre hileras de un viñedo de 4 ha. No se encontró una zona de flujos constantes sobre el viñedo, dentro de las alturas medidas de 227 a 641 cm. Los perfiles semilogarítmicos de velocidad del viento obtenidos sobre el viñedo, se ajustaron a dos líneas rectas, representando la zona interior y exterior dentro de la capa.

Munro y Oke, (1973). hicieron un estudio de estimación de parámetros de perfil del viento para cultivos altos y densos. Varios de los parámetros de perfiles de viento, rugosidad aerodinámica de la superficie (Z_0) y altura de desplazamiento del plano cero (d), calculados de las mediciones en un campo de trigo se compararon con las derivadas de un número de fórmulas basadas en estudios previos. Los parámetros no mostraron diferencias estadísticas con velocidades del viento entre 2 y 6.5 m.s^{-1} .

Tuller, (1973). estudió el efecto de las superficies verticales de la vegetación sobre el microclima adyacente. Investigó las diferencias en el balance de energía del microclima en las proximidades del borde del bosque, orientado en las cuatro direcciones cardinales. La exposición a la radiación solar directa fue el factor más importante en la determinación de las diferencias climáticas. La reflexión desde el borde descubierto del bosque tuvo más peso que la reducción de la radiación difusa del cielo. Se observó mayor emisión de ondas largas cerca del borde del bosque.

3.MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción de la zona de estudio.

3.1.1 Localización.

El estudio fue conducido en Turrialba, Costa Rica de junio a agosto de 1992. Se desarrolló en una finca privada dedicada a la producción de café, situada en la comunidad de Azul y llamada La Julia.

Las coordenadas geográficas del lugar son 9º 55' de latitud norte y 82º 39' longitud oeste; la elevación es de 620 msnm. De acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Holdrige, la zona corresponde a la formación ecológica Bosque Muy Húmedo Premontano (Holdrige, L.R., 1982).

3.1.2. Clima.

La zona no presenta una época seca definida. Solamente hay una disminución de las lluvias entre febrero y abril. La precipitación media anual es de 2640 mm, con un promedio de 21 días con lluvia al mes. La temperatura media es de 21.6 °C. con una máxima media de 26.5 °C y una mínima media de 18.0 °C. La humedad relativa promedio es de 87 %. La radiación media es de 17

$\text{Kj.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$; la velocidad media del viento es de 1 m.s^{-1} y la evapotranspiración potencial media (Penman) es de 3.0 mm.día^{-1} .

3.1.3 Material biológico.

El sistema bajo estudio fue una asociación de café (*Coffea arabica*) con poró gigante (*Erithrina poeppigiana*), sembrado en un área plana y lo suficientemente extensa (aproximadamente 20 ha.) para eliminar los efectos de borde.

El café está sembrado en hileras a una distancia promedio de 1.8 m entre hileras. El poró está sembrado dentro de las hileras del café, con un espaciamiento de 7 m entre árboles, cada tres hileras de cafetos, o sea a una distancia promedio de 5.4 m entre hileras de poró. Los árboles se encuentran perfectamente alineados sobre el surco y alineados con una inclinación aproximada de 20 grados con respecto a la perpendicular a los surcos (Ver figura 6)

El poró fue manejado mediante podas totales en agosto y febrero y una poda parcial dejando dos ramas grandes en mayo. Los datos fueron tomados en cuatro momentos diferentes del crecimiento del poró, entre podas.

El sistema de renovación del café es manejado por ciclos de poda de 2 y 3 años.

Las mediciones se realizaron sobre una malla elemental del sistema café-poró. Esta malla consistió en el área delimitada por cuatro árboles de poró (A, B, C y D), y dentro de la cual se encuentran tres hileras de cafetos (ver figura 6).

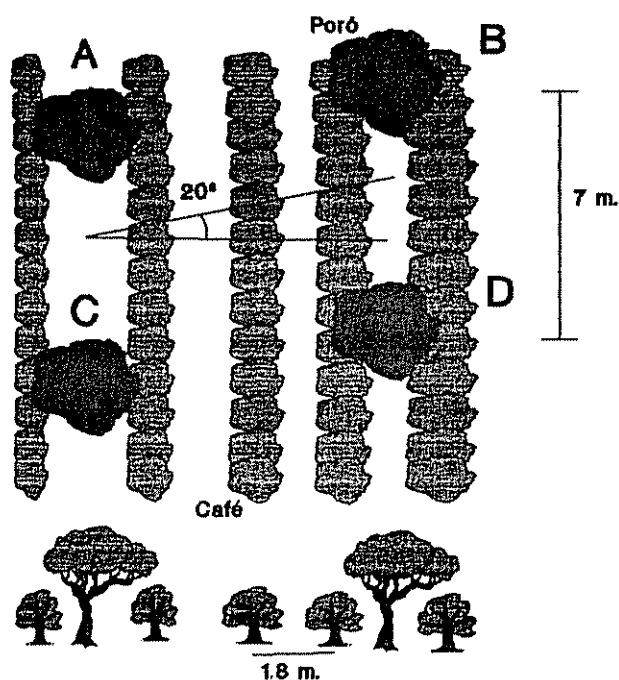


Figura 6. Disposición de la plantación en la parcela experimental.

3.2 Equipo utilizado.

Para la medición de velocidad del viento se utilizó anemómetros de tres copas, marca Met-one, modelo 014 A, calibrados para hacer mediciones entre 0 y 45 m.s^{-1} . El umbral de arranque es de 0.447 m.s^{-1} y tienen una exactitud de 1.5 % o 0.11 m.s^{-1} .

La medición de temperatura del aire se realizó mediante termocuplas de tipo "T" (cobre-constantan). Fueron construidas y calibradas para este experimento (ver próximo sub-capítulo).

Los sensores de temperatura del aire y de velocidad del viento fueron colocados en una torre fija de referencia, que mide 15 m de altura, situada al centro de la parcela experimental y en un mástil móvil de 9 m de alto.

La recolección y almacenamiento de datos se realizó sobre un sistema de adquisición de datos marca Campbell, modelo 21X. Este sistema tiene la capacidad de recibir y almacenar información de solamente cuatro anemómetros. Para poder leer simultáneamente y almacenar las lecturas de un número relativamente grande de termocuplas se utilizó un multiplexor modelo AM 32, con capacidad de leer sobre 64 canales.

3.2.1. Calibración y construcción de termocuplas.

3.2.1.1. Principio de funcionamiento

La termocupla es un útil y versátil instrumento para realizar mediciones de temperatura. Estas consisten en la unión entre diferentes metales, tales como cobre-constantan, los cuales generan una fuerza electromotriz (emf) proporcional a la temperatura del ambiente donde se encuentren (Rosemberg *et al* 1983).

Rosemberg *et al* (1983) opinan que los metales de cobre y constantan son los más convenientes para efectuar mediciones de temperatura del aire en micrometeorología.

Las termocuplas son fuertes, simples, de fácil construcción y de bajo costo. Además, pueden tener una amplia variedad de formas y medir en un amplio ámbito de temperaturas (Unwin, 1980).

En la Figura 7. Se presenta un esquema de una termocupla. El voltaje medido entre las dos guías de cobre es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión de los dos metales en A1 y A2.

La técnica tradicional del uso de termocuplas involucra mantener una de las dos uniones (A1 o A2), llamada unión de

referencia, en baños de hielo, la cual se asume que permanece a 0 °C..

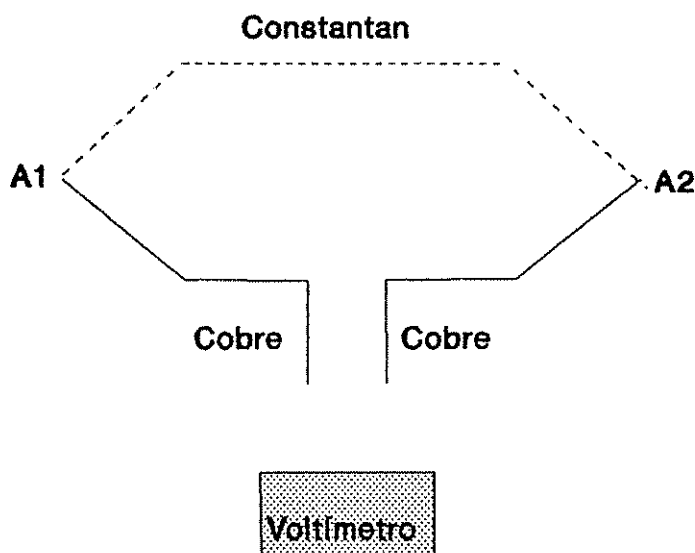


Figura 7. Esquema de una termocupla.

3.2.1.2 Fuentes de error en las termocuplas.

Entre las lecturas de temperatura observadas sobre dos termocuplas se puede encontrar, además de las diferencias de temperatura del aire que rodea la unión del captor, errores que provocan variaciones en las temperaturas medidas. A continuación se presentan una serie de desventajas y fuentes de error de termocuplas reportados en la literatura.

Unwin, (1980) opina que una desventaja de las termocuplas es que la relación entre el voltaje producido por la termocupla y la temperatura medida no es totalmente lineal. Además el bajo voltaje que producen las termocuplas (40 μV por $^{\circ}\text{C}$), necesita de un equipo de mucha precisión para medirlo.

Hewlett Packard (1980), reportan las siguientes posibles fuentes de error:

- Aumentos repentinos de gradientes de temperatura debidos a factores tales como luz solar, motores calientes, etc.
- Dependencia de la temperatura del medidor de voltaje.
- Cambios transitorios de temperatura
- Cambios en el voltaje de la batería
- Impurezas de los alambres. Una termocupla estándar de alambre puede variar aproximadamente $\pm 1\%$ de un carrete de alambre a otro.

Wescor, Inc (1980), apunta que por cada grado de diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura medida, se incrementa un error de 0.01 $^{\circ}\text{C}$. Esto se debe a que la diferencia del voltaje no varía linealmente en función de la temperatura.

Moffat, (s.f.). Explica que el voltaje de la termocupla puede ser generado en determinadas circunstancias por la sección de alambre que contiene el gradiente de temperatura y no necesariamente por la unión de los metales.

Generalmente los alambres de las termocuplas no son manufacturados perfectamente, incluso pueden cambiar su resistencia con el tiempo (Hewlett, s.f.).

La inclusión de otros metales como las soldaduras entre los alambres que conforman la termocupla puede generar cambios en el voltaje producido por la unión (Unwin, 1980).

3.2.1.3 Magnitud de errores reportados.

Wescor, Inc., (s.f) reporta que para termocuplas de tipo T cobre constantan los errores se encuentran entre ± 0.25 C en el ámbito de mediciones entre 15 y 35 $^{\circ}$ C. Unwin, (1980) reporta errores de ± 0.1 a ± 0.25 $^{\circ}$ C. Rosenberg, (1983), Graser (1986) y Hosker (1974), reportaron errores de ± 0.2 $^{\circ}$ C. Palmer, (1967) trabajó con termocuplas con ± 1.0 $^{\circ}$ C de exactitud.

3.2.1.4. Calibración de termocuplas.

Las termocuplas se construyeron con alambre de cobre y constantan, usando soldadura de estaño para la unión de los alambres. Se construyó una estructura para proteger el sensor de la radiación solar directa y provisto de un ventilador que realiza una succión forzada del aire (a una velocidad de 3 m.s^{-1}). Esto se hizo para que la superficie de la unión receptora no se calentara más que el aire circundante, y por ende las

mediciones de temperatura efectuadas correspondan con la temperatura del aire a su alrededor.

Inicialmente se encontraron diferencias máximas entre una termocupla y otra de más de 1 °C. Las fuentes de error que provocaban estas diferencias fueron diversas por lo que fue muy difícil minimizar el efecto de estas fuentes de variación.

Las termocuplas se construyeron haciendo las uniones con soldadura de estaño. Las diferencias entre estas soldaduras provocan grandes diferencias de hasta ± 1 °C entre una termocupla y otra. Esto se explica debido a las diferencias de masa de soldadura lo que provocaba diferente inercia térmica entre una unión y otra. Las termocuplas con mayor masa de soldadura se calentaron más lentamente, así mismo, se enfriaban más lentamente que las termocuplas con menor cantidad de estaño. También, al parecer, el área de contacto entre los alambres de cobre y constantan tiene influencia en las diferencias de temperatura. Sin embargo, esto no se pudo determinar con exactitud debido a la incapacidad de poder efectuar uniones entre los alambres, estrictamente controladas.

Durante las noches, los valores de temperatura obtenidos con las diferentes termocuplas fueron muy similares, con diferencias máximas entre 0.03 y 0.05 grados Celsius. Durante el día se observaron las máximas diferencias entre una termocupla y otra, debido a que las variaciones de temperatura eran

considerablemente más fuertes que durante la noche, manifestándose más la inercia térmica de las termocuplas (hasta 3 °C en una hora). Esto quiere decir que las termocuplas con mayor cantidad de soldadura variaban su temperatura más lentamente que las que tenían poca cantidad de soldadura, y cuando las variaciones de temperatura en el ambiente fueron más rápidas, se manifestaron mayores variaciones de temperaturas entre la termocupla con más cantidad de soldadura (más inerte) y la termocupla con menor cantidad de soldadura (con menor inercia térmica).

El primer intento de solucionar este problema fue reconstruir las termocuplas que presentaban mayores diferencias y buscando que fueran similares a las demás. Este trabajo resultó tedioso y consumió mucho tiempo y no solucionaba totalmente el problema de las grandes diferencias.

Se descartó que el lugar de conexión en el equipo almacenador de la información (Datalogger y multiplexor) provocara diferencias. Para ello se probó con varias salidas de una misma termocupla a diferentes canales de lectura, no encontrándose diferencia entre los valores almacenados.

Se encontró que el calentamiento del alambre, aunque estuviera lejos de la unión receptora, provocaba diferencias en los valores de temperatura almacenados. Esto sugiere una conducción de calor a través del alambre. Esta diferencia se

manifestó en mayor medida cuando la radiación de onda corta era mayor. Para minimizar este problema se protegió todo el alambre con un tubo de 3.25 cm. de diámetro aislante térmico y posteriormente se forró con cinta adhesiva blanca para que reflejara lo más posible la radiación solar directa.

La unión de cobre constantan además de la protección inicial contra la radiación solar directa, fue protegida con material aislante para que minimizara la conducción de calor desde la superficie del captor.

Finalmente se logró reducir los errores máximos de una termocupla a otra hasta 0.3 °C, lo que parece correcto de acuerdo a las referencias bibliográficas.

Las termocuplas fueron utilizadas en el experimento con el conocimiento de ciertas características, como los errores máximos de 0.3 °C. Las variaciones de temperatura entre una termocupla y otra se manifestó más en horas calientes del día, con variaciones más bruscas de temperatura. Las diferencias encontradas no fueron aleatorias, sino que, presentaron cierta constancia. Sin embargo, no se pudo ajustar el error encontrado a ninguna fuente de variación.

3.3 Plan de mediciones.

3.3.1. Problemática

Para alcanzar los objetivos de estudiar el comportamiento de las variables meteorológicas: velocidad del viento y temperatura del aire, haciendo énfasis en sus variaciones en el plano horizontal (variaciones supuestamente originadas por la heterogeneidad que presenta la cobertura del poró), la principal limitante encontrada es el número de sensores disponibles para esta investigación.

Por esta razón se tuvo que pensar en la forma de ubicar y distribuir el material disponible.

3.3.1.1 Posición de las termocuplas en la torre y el mástil móvil.

Se construyeron 16 termocuplas, las cuales fueron colocadas ocho en el mástil móvil y ocho en en la torre de referencia. Las termocuplas fueron colocadas a las mismas alturas en el mástil y en la torre. El primer par de termocuplas (una en la torre y otra en el mástil) se colocó a 1.5 m de altura, lo cual correspondía, aprximadamente, con la altura de la cobertura del cafeto (considerada homogénea). Las otras termocuplas se colocaron a intervalos de un metro, hasta quedar el último par de termocuplas

a una altura de 8.5 m. Esta altura sobrepasa el crecimiento máximo alcanzado por el poró en este estudio (6.5 m). De esta forma se pudo medir los perfiles de temperatura desde el tope de la cobertura del cafeto hasta aproximadamente 2 m sobre la cobertura del poró.

3.3.1.2. Posición de anemómetros en la torre de referencia y en el mástil móvil.

Para la medición de la velocidad del viento, se contó solamente con tres anemómetros. Se colocó uno a los 15 m. de altura en la torre de referencia y los otros dos fueron colocados en el mástil móvil a 3.5 y 6.5 m de altura.

La altura de 6.5 m corresponde aproximadamente, con la altura alcanzada por la copa de los árboles de poró. Esto se hizo con la intención de observar las modificaciones de la velocidad del viento a ese nivel, en donde generalmente se observa un cambio de forma de los perfiles por influencia de la cobertura.

La colocación del anemómetro a los 3.5 m fue para observar el comportamiento de la velocidad del viento en un nivel intermedio entre la parte superior de la cobertura del poró y la parte superior de la cobertura del cafeto.

El anemómetro a los 15 m de altura se utilizó como referencia y permitió ajustar ecuaciones de regresión de

velocidades del viento a las alturas de 3.5 y 6.5 m en función de las velocidades medidas a los 15 m de altura. Para ajustar estas ecuaciones se colocaba el mástil a la par de la torre de referencia, quedando los anemómetros en la línea vertical de la torre de referencia. Posteriormente se tomaron datos suficientes para obtener un amplio ámbito de velocidades del viento. Las estimaciones de velocidad del viento en la torre de referencia a las alturas de 3.5 y 6.5 m se hicieron con el objetivo de compararlas con las que se medían con los anemómetros colocados en el mástil móvil.

3.3.1.3. Movimiento del mástil en la parcela experimental

Para realizar comparaciones de los perfiles de viento y temperatura en distintos puntos de la malla elemental el mástil debió ser movido continuamente a varias posiciones.

El objetivo de medir en diferentes posiciones de la malla elemental es observar la influencia de la vegetación, más precisamente la del poró, sobre las variables meteorológicas medidas. Para minimizar el efecto del rápido crecimiento de el follaje del poró se dividieron las mediciones en grupos, los cuales correspondieron a diferentes momentos de desarrollo del follaje del poró.

Hay que señalar que inicialmente se pretendía elaborar mediciones continuas durante todo el período que transcurre entre

poda y poda, pero debido a desperfectos del equipo de medición y otras circunstancias que escaparon al control de la investigación, se trabajó sobre cuatro grupos de mediciones. Se consideran el conjunto de perfiles medidos en distintos puntos, suponiendo que en el transcurso de esas mediciones, no hubo desarrollo significativo de la vegetación bajo estudio.

Primer grupo de mediciones: fue realizado del 12 al 23 de junio de 1992. El inicio de este grupo de mediciones (12 de junio) correspondió con los 28 días después de la poda parcial del poró. La altura promedio de la copa de los árboles de poró en la parcela fue de 4.3 m y un diámetro promedio de 3.24 m. El mástil fue movido a cuatro diferentes posiciones durante este período, como se puede apreciar en la Figura 8. Cada punto está referenciado por una pareja de números, donde el primero significa el grupo de medición y el segundo representa el número que se le asignó a la posición del mástil dentro de ese grupo de medición. Así se puede observar que para el grupo de mediciones uno el mástil fue colocado en cuatro diferentes posiciones (1,1),(1,2),(1,3) y (1,4).

Segundo grupo de mediciones: se realizó entre el 24 y 29 de julio. El inicio de este período de medición correspondió a los 70 días después de la poda total del poró. La altura promedio de la copa del poró alcanzó 5.7 m y el diámetro promedio fue de 4.30 m.

El mástil fue colocado en cuatro posiciones diferentes durante este período, en los puntos (2,1),(2,2),(2,3) y (2,4) mostrados en la Figura 8.

El tercer grupo de mediciones se realizó el 6 de agosto de 1992. Para esta fecha habían transcurrido 82 días después de la poda del poró. La altura promedio de la vegetación fue de 6.3 m. y el diámetro promedio de la copa fue de 4.75 m.

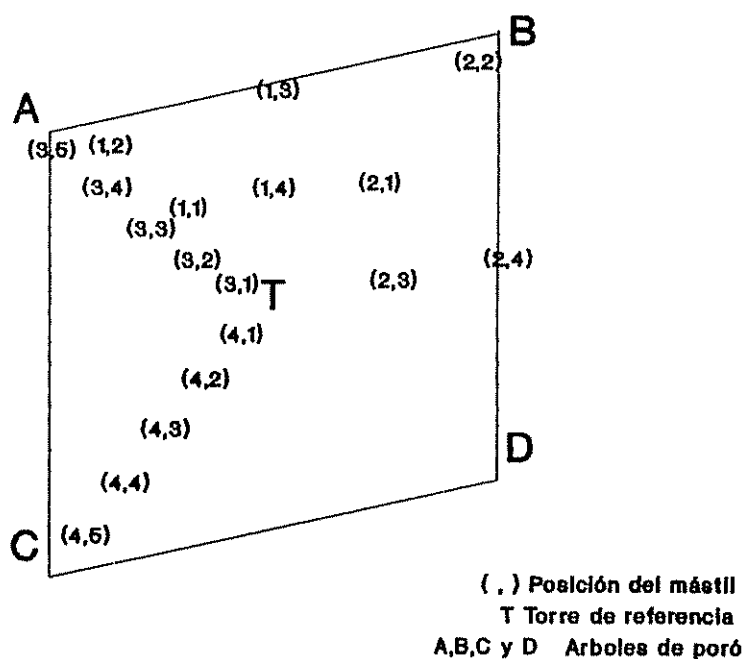


Figura 8. Posiciones del mástil en la parcela experimental.

El mástil fue cambiado de posición con mucho más frecuencia que en los dos grupos anteriores. En los grupos anteriores el mástil permaneció de uno a dos días en cada posición. En este tercer grupo de mediciones el mástil fue cambiado de posición con

intervalos de 10 a 15 minutos. El objetivo de mover el mástil en períodos cortos es obtener una serie de mediciones en puntos diferentes sobre la malla elemental bajo condiciones atmosféricas bastantes similares.

El mástil se colocó en cinco diferentes posiciones en este tercer grupo de mediciones. Las posiciones están identificadas en la Figura 8, mediante los puntos (3,1),(3,2),(3,3),(3,4) y (3,5).

El cuarto grupo de mediciones se realizó el 24 de agosto de 1992. Para esta fecha habían transcurrido 14 días desde una poda total del follaje del poró efectuada, el 10 de agosto. El poró para esta fecha solamente estaba con los troncos de apróximadamente 1.5 m de altura y unos pocos rebrotes.

Las posiciones del mástil para este cuarto grupo de mediciones son presentadas en la Figura 8, y están representadas por los puntos (4,1),(4,2),(4,3),(4,4) y (4,5).

3.4 Análisis de datos en los diferentes grupos de mediciones.

En vista de que las posiciones y el tiempo de permanencia del mástil móvil en los grupos de mediciones uno y dos son diferentes a los del grupo tres y cuatro, los datos obtenidos presentan diferentes posibilidades para ser analizados.

A continuación se presenta la forma en que fueron analizados los datos de velocidad del viento y temperatura del aire en los diferentes grupos de mediciones.

3.4.1. Grupo uno y dos.

3.4.1.1. Temperatura del aire.

En primera instancia se pretendió probar si existe diferencia entre los perfiles medidos dentro del sistema agroforestal a medida que estos se midan más cerca o más lejos de los árboles de poró. Esta diferencia podrá ser más o menos evidente en dependencia de las condiciones predominantes al momento de hacer las mediciones (hora del día, nubosidad, velocidad del viento, condiciones de humedad, etc) y a la influencia que ejercen los árboles.

Mantener el mástil en una posición durante un día o dos permite tener mediciones continuas (mediciones cada 30 minutos) sobre un período de tiempo suficientemente largo en donde se obtuvo datos en diferentes estados del tiempo.

Debido a la naturaleza del equipo de medición, solamente se pudieron efectuar mediciones simultáneas de dos perfiles (uno en la torre y otro en el mástil). La realización de comparaciones entre más de dos puntos estuvo en dependencia del establecimiento de condiciones similares sobre la torre de referencia. Por

ejemplo si A es el punto de referencia y B y C son otros puntos medidos en la malla elemental, se establecieron comparaciones entre A, B y C, cuando las condiciones en la torre de referencia (punto A) fueron similares al momento de medirse los perfiles en los puntos B y C.

Para establecer la similitud en el punto de referencia, se confrontaron los diferentes perfiles de temperaturas en el punto de referencia mediante gráficas y se escogió los perfiles más semejantes. Además, se tomó en cuenta también otros parámetros como brillo solar y velocidad del viento (medida a 15 m de altura) al momento de ser medidos estos perfiles. Sin embargo, estos parámetros no fueron determinantes para la selección.

Finalmente, se obtuvieron perfiles medidos en las diferentes posiciones del mástil y que tuvieron condiciones similares en la torre de referencia al momento de ser medidos. Sobre estos perfiles se realizó análisis de la variación horizontal de la temperatura a cada altura, mediante el uso de estadística descriptiva como medias y coeficientes de variación.

Todo el análisis anterior se fundamenta en poder hacer comparaciones simultáneas de perfiles medidos en cada una de las posiciones del mástil móvil.

3.4.1.2. Velocidad del viento.

Para poder evaluar las diferencias de velocidad del viento en el plano horizontal (diferencias a una misma altura entre el

mástil y la torre de referencia), se efectuaron comparaciones entre los valores de velocidad del viento estimados en la torre central (a 3.5 y 6.5 m de altura) a partir del anemómetro de referencia, situado a 15 m de altura sobre la torre, y los medidos en cada una de las posiciones del mástil móvil.

Se efectuaron comparaciones individuales entre parejas de datos, donde el primer grupo de datos corresponde a las mediciones de velocidad del viento a una cierta altura del mástil móvil en una determinada posición, y el segundo grupo de datos los medidos en la torre de referencia, a la misma altura que los del mástil móvil.

Para evaluar la relación que existe entre estas parejas de grupos de datos se efectuaron análisis de regresión, teniendo especial interés la pendiente de la ecuación de ajuste, la cual da una idea de la similitud del grupo de datos y/o el tipo de relación existente entre ellos.

3.4.2..Grupo tres y cuatro.

3.4.2.1. Temperatura del aire.

Como se dijo anteriormente, el grupo tres y cuatro de mediciones se realizó midiendo perfiles en el mástil, moviendo éste desde la torre hacia el árbol en cinco diferentes posiciones

en línea recta y a intervalos constantes de tiempo y de distancia.

En los datos medidos de esta forma prácticamente se elimina el error originado por las termocuplas cuando se comparan las temperaturas a una misma altura y a diferentes distancias horizontales, porque prácticamente se está comparando valores medidos por la misma termocupla. También el efecto del crecimiento del poró es eliminado debido a que el grupo de mediciones se realizó en un período de 2 a 3 horas. Sin embargo, a pesar de efectuarse el grupo de mediciones en un período relativamente corto como el apuntado anteriormente, las condiciones del estado del tiempo varían al transcurrir el tiempo y al medir en una posición y otra del mástil.

Para poder hacer comparaciones y ver el efecto del árbol de poró sobre los valores medidos de temperatura a medida que se efectúan mediciones más cercanas a éste, se efectuaron correcciones de las variaciones de temperatura del mástil con las variaciones ocurridas en la torre de referencia. Estas correcciones no son del todo correctas debido a que la magnitud de las variaciones en los valores de temperatura no necesariamente tienen que ser homogéneas en el espacio tridimensional estudiado. Sin embargo, estas correcciones se consideran válidas ya que las variaciones en el calentamiento del aire por la radiación solar son mucho más rápidas que las variaciones ocasionadas por la emisión de calor de la superficie

de las hojas de los árboles y transmitidas al aire circundante por convección.

Estos datos fueron analizados mediante gráficas de los perfiles corregidos y estadísticas descriptivas como medias y coeficientes de variación de los valores de temperatura a una misma altura. Esto se hizo con el fin de observar las variaciones horizontales de esta variable.

3.4.2.2. Velocidad del viento

Los datos de velocidad del viento obtenidos en el tercer y cuarto grupo de mediciones no pudieron ser evaluados debido a que no existían suficientes datos. Efectivamente se contó con solamente un dato de velocidad del viento por altura, para cada posición del mástil móvil, lo cual se consideró insuficiente.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis de los resultados de velocidad del viento.

Como se mencionó en la metodología, solamente se pudieron obtener datos de velocidad del viento de los grupos uno y dos de mediciones.

A continuación se presenta una breve descripción del comportamiento de la velocidad del viento medida a diferentes alturas en la parcela experimental. Posteriormente se presenta el análisis de las variaciones horizontales de la velocidad del viento en la parcela experimental.

4.1.1. Descripción de la velocidad del viento en la parcela experimental.

Se promediaron los valores de la velocidad del viento sobre un paso de tiempo de 30 minutos a cada altura en la torre de referencia (3.5, 6.5 y 15 m) durante el primer grupo de mediciones que corresponde del 9 al 23 de junio de 1992. De igual forma se procedió con los datos tomados en el segundo grupo de mediciones, realizado del 24 al 29 de julio de 1992.

Obsérvese en la Figura 9, cómo la velocidad del viento medida a los 15 m de altura es siempre mayor que la medida a los

6.5 m y ésta a su vez es mayor que la registrada a 3.5 m de altura. También se puede observar como la diferencia de la velocidad del viento entre las diferentes alturas se pone más claramente de manifiesto cuanto mayores son las velocidades alcanzadas.

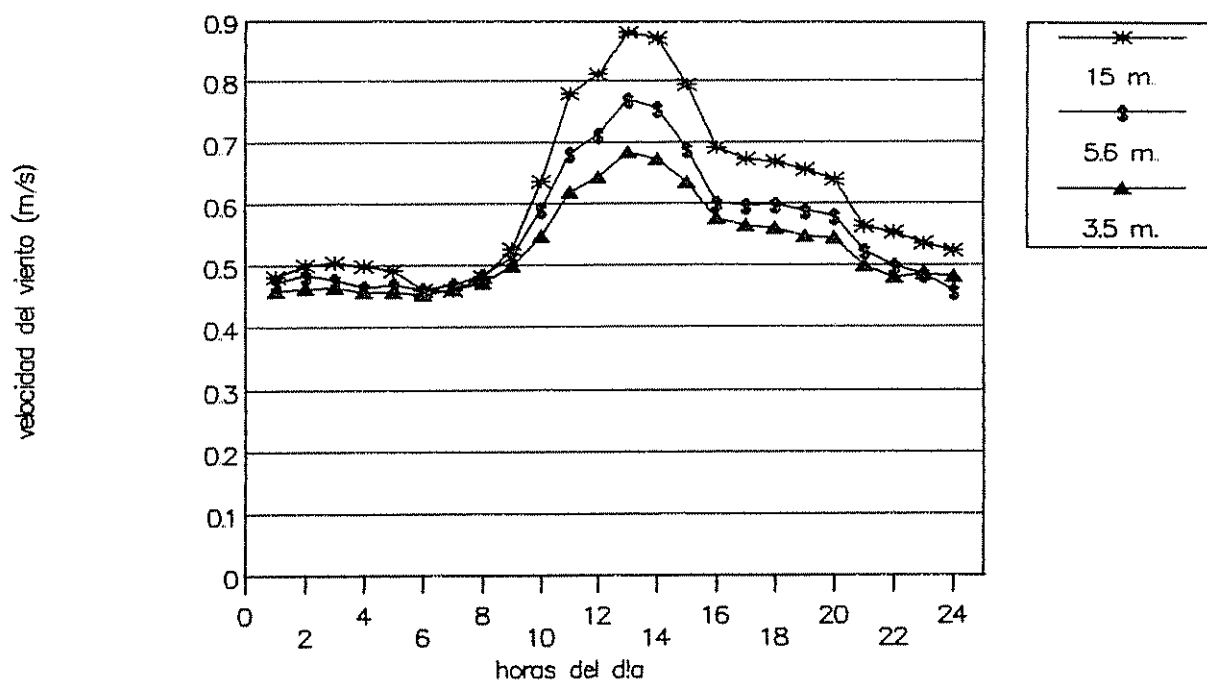


Figura 9. Evolución de velocidades del viento en el primer grupo de mediciones.

Durante el día, aproximadamente de las 8 de la mañana a las 8 de la noche se alcanzan las mayores velocidades, siendo las velocidades de las horas de la madrugada relativamente estables y bajas. Hay que señalar que el sensor de velocidad del viento utilizado mide un mínimo de velocidad de 0.447 m/s y es por esa

razón que los valores mínimos de velocidad del viento son cercanos a este valor.

En la Figura 10, se observan los promedios horarios a cada altura de medición la torre de referencia durante el segundo grupo de mediciones.

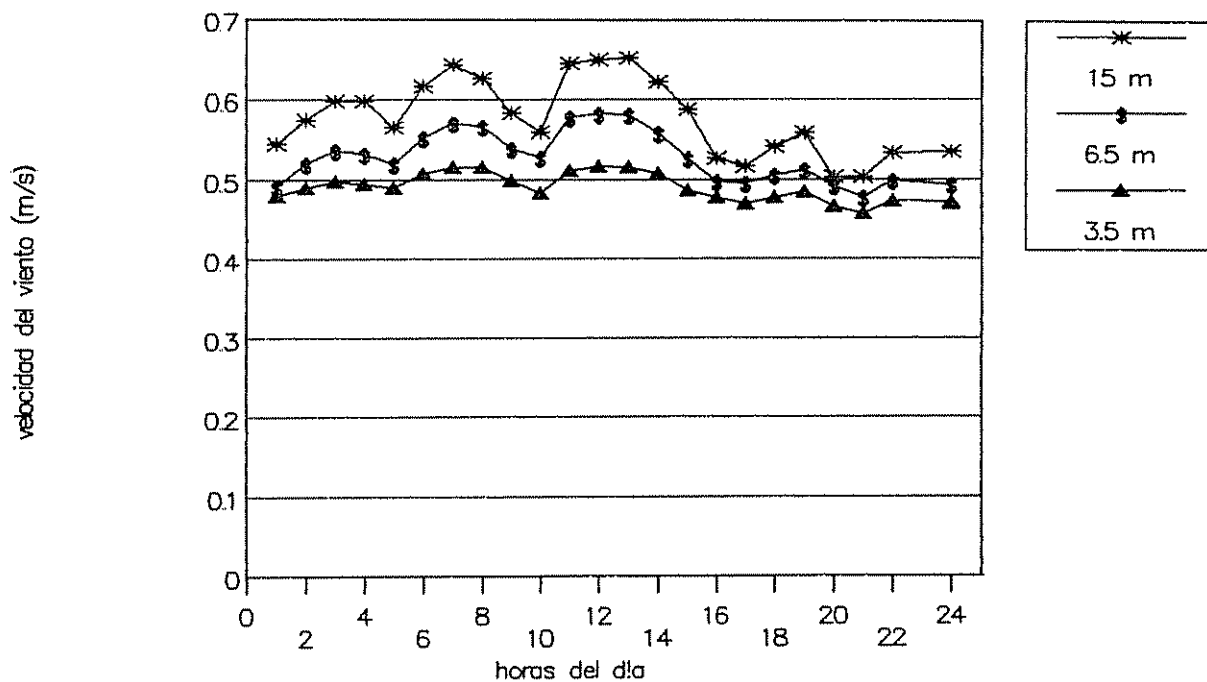


Figura 10. Evolución diaria de la velocidad del viento en el segundo grupo de mediciones.

Durante este segundo período las velocidades registradas son muy bajas, siendo menores de 0.65 m/s. Siempre se observa la tendencia de que a mayor altura se registran mayores velocidades. No es muy evidente que durante el día las velocidades alcanzadas sean mayores que las registradas en la noche. Más bien se observa

fluctuaciones en las velocidades registradas desde el inicio de la media noche hasta el final de la tarde. Luego sí se observa una disminución apreciable de las velocidades obtenidas.

4.1.2. Análisis de la variación horizontal de la velocidad del viento

Para analizar la variación horizontal de la velocidad del viento en la parcela estudiada, interesa comparar a una misma altura las diferencias en las velocidades alcanzadas en una posición determinada del mástil (cada posición del mástil representa una variación en el plano horizontal de la parcela, ver posiciones del mástil en Figura 8).

4.1.2.1. Estimación de velocidades del viento en torre de referencia.

Para evaluar las diferencias entre las velocidades del viento en diferentes posiciones se realizaron regresiones entre las velocidades estimadas en la torre de referencia y las medidas en cada una de las posiciones del mástil móvil.

Las ecuaciones de regresión que estiman las velocidades del viento a los 3.5 y 6.5 m. de altura sobre la torre de referencia son mostradas a continuación:

Para el primer grupo de mediciones

$$A2' = 0.126 + 0.735 A1 \quad r^2 = 0.97$$

$$A3' = 0.187 + 0.578 A1 \quad r^2 = 0.95$$

Para el segundo grupo de mediciones

$$A2' = 0.135 + 0.675 A1 \quad r^2 = 0.96$$

$$A3' = 0.265 + 0.393 A1 \quad r^2 = 0.94$$

Donde: A1 representa las velocidades del viento medidas a 15 m de altura en la torre de referencia, y A2', A3' representan las velocidades del viento estimadas a 6.5 m y a 3.5 m de altura en la torre de referencia, respectivamente.

Para la estimación de estas regresiones se dispuso de un gran número de puntos, tomando en cuenta velocidades en un amplio rango de valores.

Los valores de bajas velocidades del viento fueron los que se apartaban un poco de la recta de calibración.

4.1.2.2. Velocidades obtenidas en los grupos de mediciones

En el Cuadro 1, se presentan los promedios diurnos y nocturnos obtenidos a diferentes alturas en el mástil y en la torre de referencia.

Cuadro 1. Velocidades del viento en $m.s^{-1}$ obtenidas en diferentes alturas en el mástil y torre de referencia en el grupo uno de mediciones.

Posición del mástil			15 m	6.5 m	3.5 m
(1,1)	Día	T	0.724	0.654	0.610
		M	-	0.658	0.606
	Noche	T	0.566	0.532	0.507
		M	-	0.542	0.515
(1,2)	Día	T	0.631	0.566	0.532
		M	-	0.589	0.552
	Noche	T	0.508	0.487	0.463
		M	-	0.499	0.481
(1,3)	Día	T	0.712	0.643	0.589
		M	-	0.649	0.599
	Noche	T	0.589	0.527	0.509
		M	-	0.559	0.528
(1,4)	Día	T	0.710	0.643	0.589
		M	-	0.648	0.598
	Noche	T	0.540	0.495	0.488
		M	-	0.523	0.499

T = Torre de referencia

M = Mástil móvil

Como se puede apreciar en el Cuadro 1, las diferencias de velocidad del viento son evidentes entre las diferentes alturas y también entre la noche y el día.

Con respecto a las variaciones horizontales interesa observar las diferencias entre la torre (T) y el mástil (M). Aquí no se observan diferencias claras ni en el día ni durante la noche en ambas alturas comparadas (3.5 y 6.5 m).

Los datos de velocidad del viento obtenidos en el segundo grupo de mediciones realizado del 24 al 29 de julio se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Velocidades del viento obtenidas en diferentes alturas en el mástil y torre de referencia en el grupo dos de mediciones.

Posición del mástil			15 m	6.5 m	3.5 m
(2,1)	Día	T	0.722	0.631	0.548
		M	-	0.623	0.549
	Noche	T	0.654	0.583	0.524
		M	-	0.577	0.522
(2,2)	Día	T	0.485	0.469	0.451
		M	-	0.463	0.560
	Noche	T	0.541	0.500	0.472
		M	-	0.501	0.478
(2,3)	Día	T	0.598	0.542	0.501
		M	-	0.539	0.500
	Noche	T	0.470	0.449	0.449
		M	-	0.453	0.450
(2,4)	Día	T	0.733	0.599	0.554
		M	-	0.630	0.553
	Noche	T	-	-	-
		M	-	-	-

No son evidentes las diferencias entre las velocidades del viento medidas durante el día y las obtenidas durante la noche. Como se apuntó anteriormente, en la Figura 7, se observa la semejanza en el comportamiento de las velocidades del viento durante el día y la noche. Al igual que en el grupo de mediciones anterior, las velocidades del viento obtenidas en la torre no muestran diferencias claras con las medidas en el mástil. Las

diferencias más evidentes son las observadas entre los valores a los 15 m de altura y los valores de las alturas inferiores.

4.1.2.3. Comparación de velocidades del viento en la torre y el mástil mediante ecuaciones de regresión.

4.1.2.3.1. Grupo uno de mediciones.

En el Cuadro 3, se presentan los resultados resumidos de los análisis de regresión entre las velocidades obtenidas en la torre de referencia y las medias en el mástil móvil en cada una de las posiciones y a cada altura en el grupo uno de mediciones.

Se observa como de manera general las pendientes de las ecuaciones de regresión son en la mayoría de los casos muy cercanas a 1 y que el error estándar de éste parámetro es relativamente muy pequeño.

Cuadro 3 Parámetros estimados de regresiones entre velocidades del viento a la misma altura en el grupo 1 de mediciones.

Mástil punto		Pend	ES	Coef	ES	R ²
Torre vs (1,1)	6.5 m	1.00	0.01	0.01	0.02	0.98
Torre vs (1,1)	3.5 m	1.01	0.01	0.00	0.02	0.97
Torre vs (1,2)	6.5 m	0.95	0.05	0.04	0.03	0.96
Torre vs (1,2)	3.5 m	1.12	0.04	-0.04	0.02	0.95
Torre vs (1,3)	6.5 m	0.91	0.03	0.07	0.02	0.96
Torre vs (1,3)	3.5 m	1.08	0.03	-0.03	0.02	0.96
Torre vs (1,4)	6.5 m	0.95	0.03	0.04	0.02	0.96
Torre vs (1,4)	3.5 m	1.00	0.02	0.01	0.01	0.98

ES= Error estandar del parámetro estimado.

Los valores de pendiente muy próximos a 1 y los coeficientes cercanos a cero, sugieren que los valores de las velocidades medidas en el mástil y las estimadas en la torre son muy similares. Sin embargo hay que recordar que hay tres factores importantes que pueden limitar la confiabilidad de estos resultados. Uno de ellos es que las bajas velocidades observadas no permiten que se evidencie la influencia de la vegetación en la velocidad del viento. Además del error debido a esta comparación, se está acumulando el error de la estimación de los datos comparados, y por último, cabe destacar los posibles errores instrumentales a bajas velocidades del viento.

4.1.2.3.2 Grupo dos de mediciones.

En el Cuadro 4, se presentan los resultados resumidos de los análisis de regresión entre las velocidades obtenidas en la torre de referencia y las medidas en el mástil móvil en cada una de las posiciones y a cada altura en el segundo grupo de mediciones.

Cuadro 4. Parámetros estimados de regresiones entre velocidades del viento a la misma altura en el grupo 2 de mediciones.

Mástil punto		Pend	ES	Coef	ES	R ²
Torre vs (2,1)	6.5 m	0.95	0.02	0.02	0.01	0.99
Torre vs (2,1)	3.5 m	0.87	0.03	0.06	0.01	0.96
Torre vs (2,2)	6.5 m	0.82	0.10	0.09	0.02	0.66
Torre vs (2,2)	3.5 m	0.94	0.06	0.03	0.01	0.85
Torre vs (2,3)	6.5 m	0.99	0.04	0.00	0.01	0.97
Torre vs (2,3)	3.5 m	1.03	0.04	-0.02	0.01	0.97
Torre vs (2,4)	6.5 m	1.23	0.18	-0.12	0.04	0.85
Torre vs (2,4)	3.5 m	1.31	0.13	-0.18	0.01	0.92

ES = Error estándar del parámetro estimado.

Los valores de pendiente menor de 1.00 indican que la velocidad del viento en el mástil es menor que la medida en la torre de referencia, y que esta diferencia lógicamente se manifiesta más a medida que las velocidades del viento son mayores.

Los valores de la pendiente mayor de 1.00 indican que las velocidades del viento medidas en la torre fueron diferentes y menores que las medidas en el mástil.

Las consideraciones para el análisis de los datos en el primer grupo de mediciones también son válidas en este grupo.

Con los valores del punto 4 hay que señalar que fueron estimados con velocidades del viento muy bajas, lo que puede haber ocasionado problemas por ser en esas velocidades donde se presentaron problemas al estimar los valores de la torre de referencia y la mayor probabilidad de error instrumental.

Dolman, (1986), no encontró diferencia en la resistencia presentada por árboles totalmente sin hojas y con todo el follaje a velocidades relativamente bajas de 2 a 6 m.s⁻¹.

Los errores instrumentales son probablemente responsables en una gran parte de las diferencias observadas. A bajas velocidades del viento los efectos de la instrumentación pueden contribuir en errores cerca del orden del 200 % (Dolman, 1986).

En la Figura 11, se presentan las variaciones de la velocidad del viento en el plano horizontal en el grupo uno y dos de mediciones. Para cada grupo de mediciones se realizaron gráficas para las alturas de 3.5 y 6.5 m. Para realizar estos gráficos se utilizaron las ecuaciones presentadas en los Cuadros

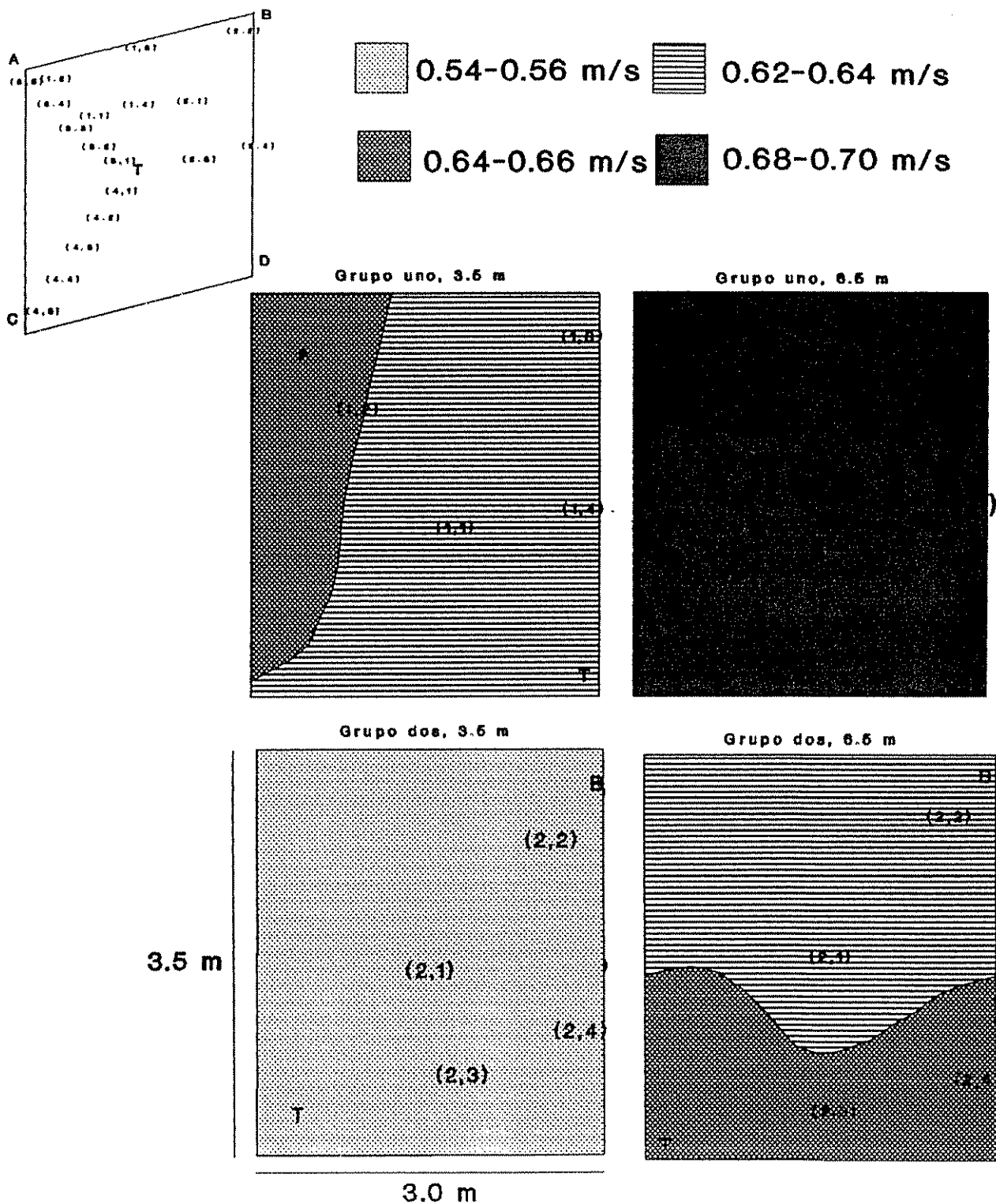


Figura 11. Velocidades del viento estimadas en el plano horizontal a 3.5 y 6.5 m de alto en el grupo uno y dos de mediciones.

3 y 4, tomando una velocidad de 0.75 m.s^{-1} en el punto de referencia sobre la torre a 15 m de altura.

La simbología utilizada en esta figura es correspondiente a la presentada anteriormente en la Figura 8.

De la Figura 11, se pueden mencionar dos aspectos fundamentales; el primero es que las velocidades del viento a 6.5 m de altura son mayores que las velocidades a 3.5 m en ambos grupos de mediciones, lo segundo que se puede observar es que prácticamente no existe diferencia importante de la velocidad del viento en el plano horizontal tanto a 3.5 como a 6.5 metros de altura en ambos grupos de mediciones.

4.2. Análisis de los resultados de temperatura del aire.

4.2.1. Descripción de perfiles de temperatura en la parcela experimental.

Se escogieron los perfiles medidos en la torre de referencia en tres fechas diferentes para intentar caracterizar la forma de los perfiles medidos en el centro de la malla elemental. Son las modificaciones de estos perfiles (los medidos en la torre de referencia) las que se intenta observar al cambiar de posición horizontal el mástil dentro de la parcela experimental.

En la Figura 12, se presentan perfiles horarios medidos el 14 de junio de 1992. La altura del cafeto alcanzó 1.5 m y la altura promedio del poró en la parcela experimental fue de 4.5 m. El día fue despejado, sin precipitaciones y con siete horas de brillo solar.

Durante las horas tempranas de la madrugada se observan la temperaturas más bajas. A estas horas la superficie de las hojas se encuentra más fría que la del aire, esto provoca una transmisión de calor del aire circundante hacia la superficie de las hojas, perdiendo entonces el aire calor y quedando el aire un poco más frío a este nivel. Esto explica la curvatura observada por los perfiles en horas de la madrugada, aproximadamente en la zona de máximo desarrollo del follaje del poró.

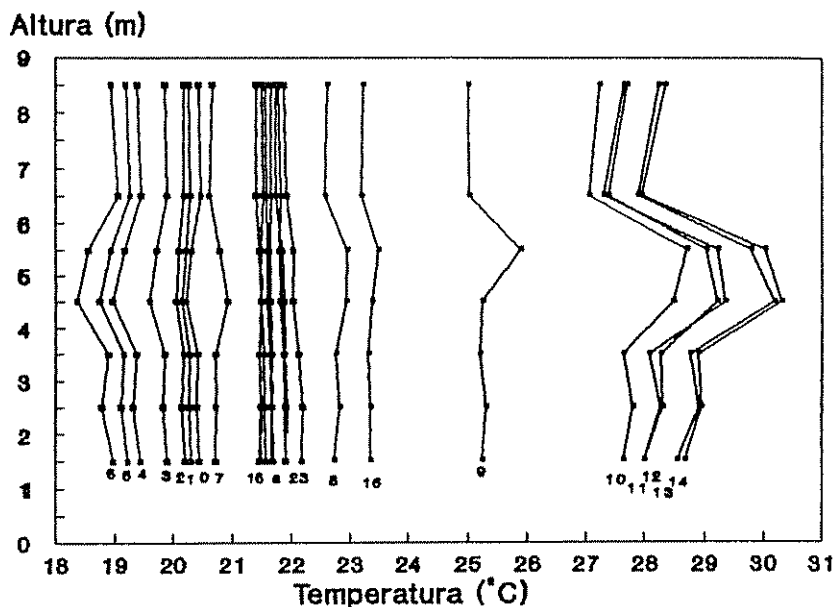


Figura 12. Perfiles de temperatura en un día despejado y con suficiente desarrollo de la vegetación.

Se observa como a las 7 am ocurre una inversión en el perfil de temperatura. Esto ocurre por que la superficie de las hojas son calentadas por la radiación solar y esta superficie caliente emite calor hacia el aire circundante, lo que provoca un aumento de temperatura del aire a este nivel (de los cuatro a 6 m). Durante las primeras horas de la mañana (de 7 a 10 am) ocurre un aumento violento de la temperatura, alcanzando temperaturas máximas en las primeras horas de la tarde (1 a 2 pm). A partir de este momento la temperatura del aire comienza a disminuir y la inversión de la forma del perfil comienza a manifestarse a las 4

de la tarde, pasando por un período más o menos estable hasta la media noche.

Estructuras similares a estos perfiles fueron reportadas para un día despejado por Geiger (1965) y Hosker Jr., *et al* (1974).

En la Figura 13, se presentan los perfiles obtenidos el 29 de julio. Este fue un día lluvioso (24 mm durante el día). El árbol de poró alcanzaba una altura promedio de 6.3 m, para esta fecha.

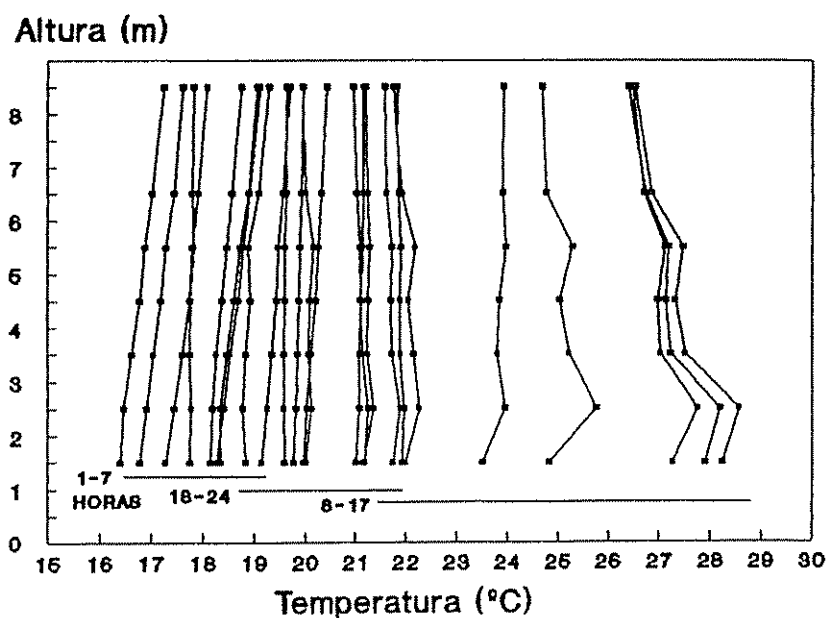


Figura 13. Perfiles de temperatura en un día lluvioso y con suficiente desarrollo de la vegetación.

A partir de las primeras horas de la madrugada, hasta las primeras horas de la mañana se observa como la temperatura del aire aumenta con la altura. A medida que transcurre el día este gradiente se invierte, disminuyendo la temperatura con la altura. Durante la mañana se observa el rápido aumento de la temperatura llegando a obtener las temperaturas máximas en horas de la tarde.

Durante la noche las temperaturas bajan y el cambio en la pendiente del perfil vuelve a manifestarse.

Se destaca que no se manifiesta influencia del follaje del poró en la forma del perfil. Esto se debe a que en días lluviosos y nublados la parte más caliente, que generalmente es la parte superior de la copa del poró, no está mucho más caliente que el aire que la rodea y por ende no existe convección de calor del follaje hacia el aire circundante que provoque una deformación en el perfil.

Hosker Jr., *et al* (1974), encontraron comportamientos similares en perfiles medidos en una plantación de pino durante un día lluvioso y con bastante nubosidad.

En la Figura 14, se muestran los perfiles observados durante un día despejado y sin lluvia. El follaje del poró fue cortado totalmente 10 días antes de esta fecha.

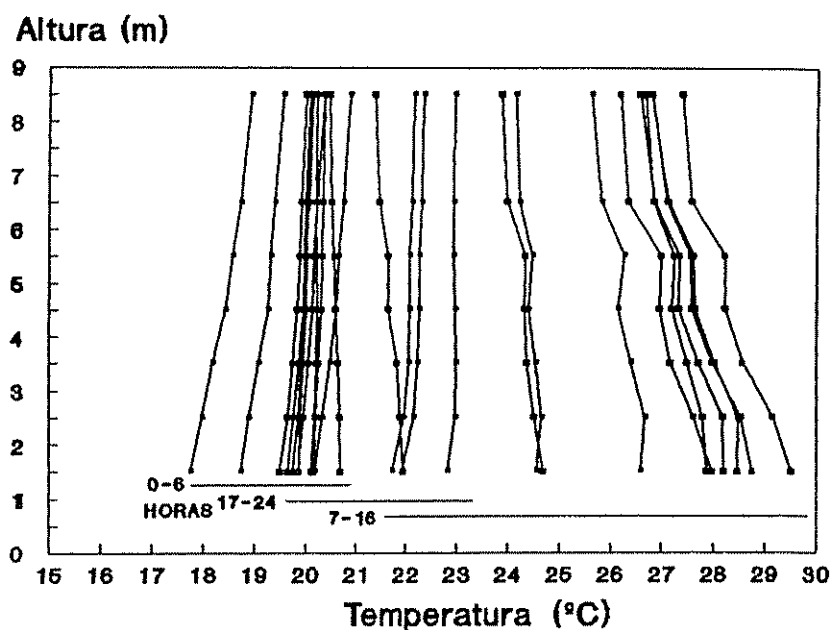


Figura 14. Perfiles de temperatura después de una poda total del poró.

Aquí se puede observar que las temperaturas mínimas ocurren durante la madrugada y temperaturas máximas durante horas tempranas de la tarde. Se observa claramente el cambio de pendiente en los perfiles. Durante las horas de la madrugada y durante la noche, la temperatura aumenta con la altura. Esto se debe a que la temperatura del follaje del cafeto se encuentra más fría que el aire circundante, provocando una transferencia de calor del aire a la cubierta vegetal, creando esto el gradiente observado. Durante el día ocurre lo contrario, el calor absorbido por la vegetación es transmitido al aire circundante, siendo la superficie vegetal la zona más caliente bajo estas condiciones.

Prácticamente aquí no existe follaje del poró y por ende no se manifiesta de su influencia sobre los perfiles de temperatura. El comportamiento de estos perfiles en esta fecha es similar a los perfiles típicos reportados sobre coberturas vegetales por otros autores, Monteith, J.L., (1973), Rosemberg N.J. (1983).

4.2.2. Análisis de variabilidad horizontal de la temperatura del aire en diferentes estados de crecimiento del poró.

En este capítulo se ilustran las diferencias de los perfiles obtenidos en diferentes posiciones del mástil móvil en cada uno de los grupos de mediciones realizados. Estos grupos de mediciones se realizaron en diferentes condiciones de desarrollo del follaje del poró (ver metodología).

Al establecer comparaciones por altura entre los perfiles obtenidos en cada una de las posiciones del mástil, se está intentando determinar el efecto de la heterogeneidad horizontal que presenta la cobertura del poró sobre la temperatura del aire.

Este análisis gráfico no permite concluir acerca de diferencias estadísticas entre los perfiles comparados, pero si proporciona una idea de la magnitud de las variaciones en los perfiles medidos en diferentes posiciones dentro de la malla elemental estudiada.

En los grupos uno y dos se midieron perfiles en la torre de referencia y en cuatro posiciones del mástil móvil. En el grupo 3 y 4 se efectuaron mediciones en la torre y en 5 diferentes posiciones del mástil (Figura 8).

Sobre el primer grupo de mediciones realizadas durante el 9 y 23 de junio, no se pudieron comparar los perfiles de la torre de referencia y las cuatro posiciones del mástil simultáneamente, por lo que se hicieron dos subgrupos de comparaciones. Los perfiles del primer grupo de mediciones son mostrados en la Figura 15.

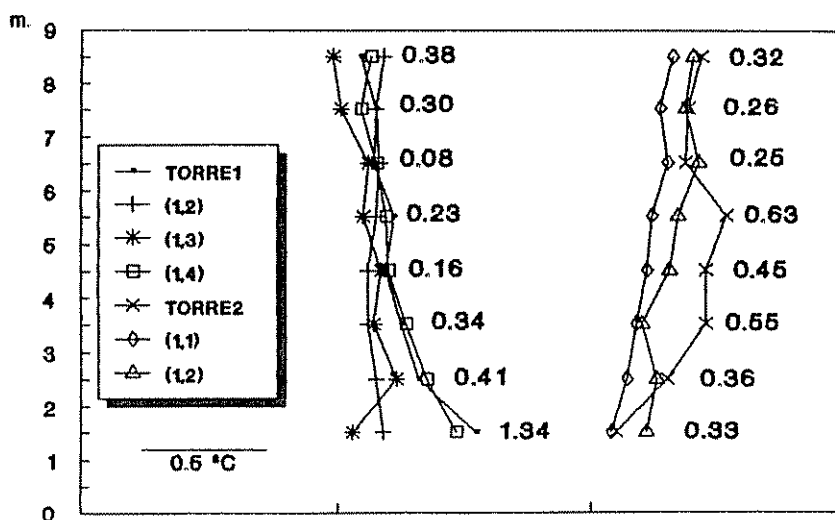


Figura 15. Perfiles de temperatura para diferentes posiciones dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el primer grupo de mediciones.

Los coeficientes de variación (expresados en porcentaje) reflejan la variación de la temperatura del aire a cada altura, de los perfiles medidos en diferentes posiciones del mástil.

Se encontró mucha dificultad para seleccionar perfiles comparables, ya que no fue fácil encontrar situaciones similares en la torre de referencia al momento de medir los perfiles del mástil en diferentes posiciones (para más aclaración ver Metodología).

De forma general se observa como las variaciones de temperatura son relativamente pequeñas: cerca de 0.25 °C las diferencias máximas. La Figura 16, muestra el grupo 2 de perfiles comparados.

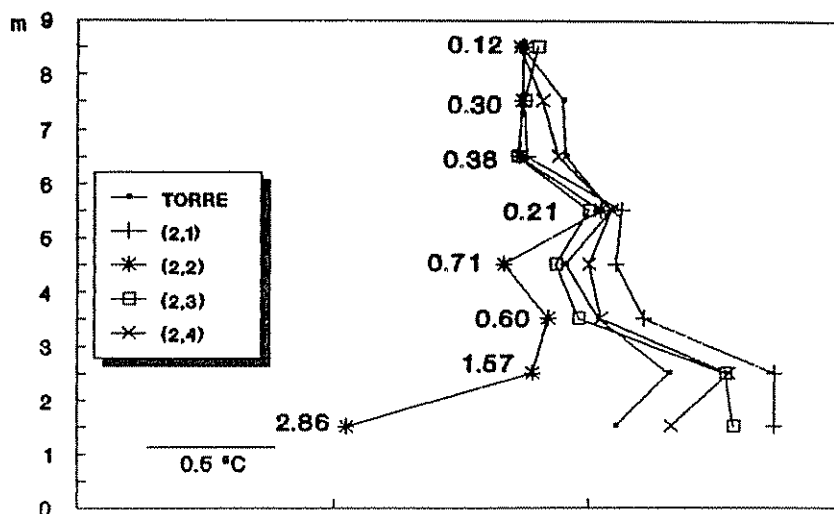


Figura 16. Perfiles de temperatura para diferentes posiciones dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el segundo grupo de mediciones.

Se destaca que las variaciones de temperatura son mayores de los 1.5 m hasta los 6.5 m de altura. El perfil 2,2 corresponde con la posición del mástil muy cerca del poró, por esta razón se observan temperaturas más bajas en los captorees afectados por la sombra del árbol (captorees por debajo de los 5 m de altura). Las diferencias de temperaturas entre los perfiles a 1.5 m de altura se debieron a la influencia del cafeto, ya que ciertos captorees quedaban bajo la sombra del follaje del cafeto. La altura del cafeto en las posiciones donde fue colocado el mástil para este grupo de mediciones fue superior a 1.6 m.

En la Figura 17, se muestran los perfiles del 6 de agosto.

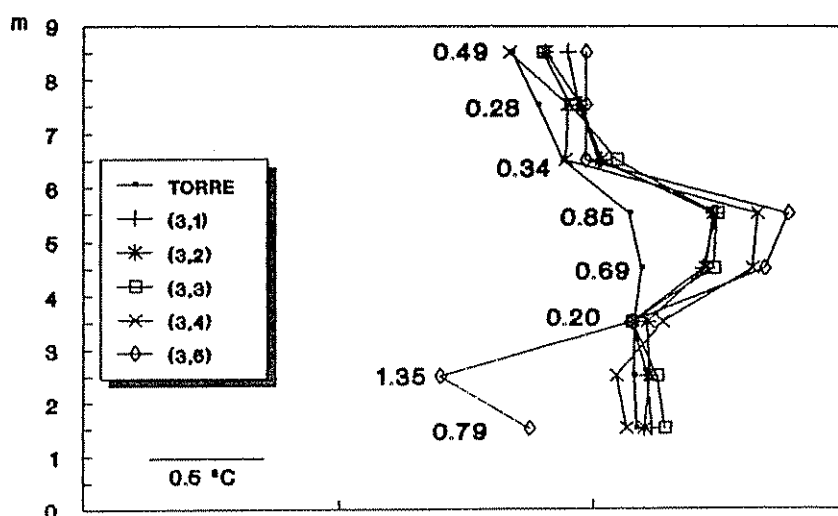


Figura 17. Perfiles de temperatura para diferentes posiciones dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el tercer grupo de mediciones.

Estos perfiles fueron medidos cuando el poró alcanzó su máximo crecimiento foliar debido a que 4 días después fue podado.

Se observan modificaciones evidentes de los perfiles entre los 4 y 6 m. de altura. También se observa como hay un perfil que evidentemente es más bajo que los demás, esto se debe a que éste fue medido precisamente sobre el poró y algunos captorees quedaban bajo la sombra. La altura del árbol de poró más próximo era de 6.3 m. , es por eso que el perfil se aproxima nuevamente a los medidos en las otras posiciones.

En la Figura 18, se presentan perfiles medidos el 24 de agosto, después de una poda total del poró.

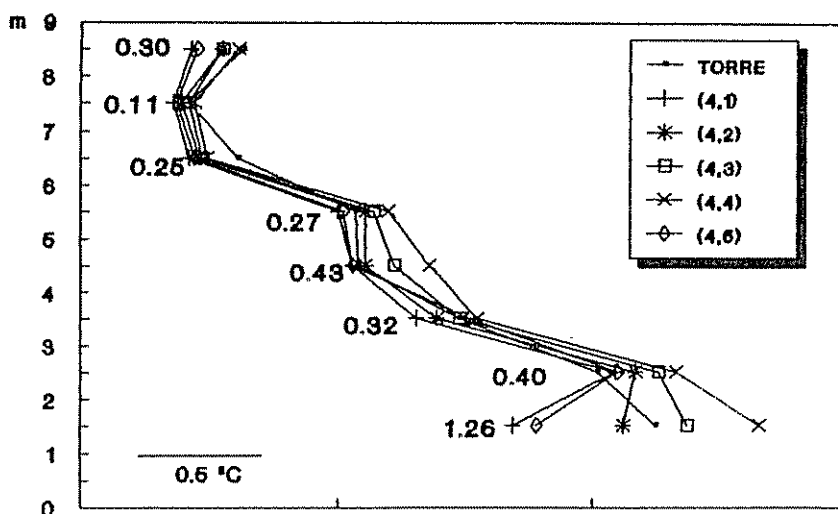


Figura 18. Perfiles de temperatura para diferentes posiciones dentro de la parcela y sus coeficientes de variación en el cuarto grupo de mediciones.

Se observa un fuerte gradiente de temperatura con respecto a la altura. Sin embargo, las variaciones horizontales de temperatura son relativamente pequeñas. Solamente a los 1.5 m. se observan variaciones relativamente altas. Esto se debe a la irregularidad de la cobertura del cafeto en donde fueron medidos estos perfiles.

4.2.3. Posibilidad de modelización de las variaciones de temperatura del aire en el sistema en estudio.

El grupo de perfiles uno y dos no permiten ser analizados convenientemente para explicar las variaciones horizontales de la temperatura del aire. Sin embargo, las mediciones del grupo de perfiles tres y cuatro ofrecen mediciones en una mayor variedad y continuidad de posiciones del mástil que permiten especular acerca de la forma como influye la cobertura heterogénea del café y poró sobre el comportamiento de la temperatura del aire.

En la Figura 19 se presenta una cartografía de los perfiles medidos en diferentes posiciones del mástil cuando el poró alcanzó su máximo crecimiento antes de ser podado. Estos perfiles fueron medidos el 6 de agosto.

Se observa una zona de mayor temperatura a medida que se aproxima a la zona de mayor absorción de radiación y desde luego mayor zona de emisión de calor del follaje del poró.

La zona que se observa de menor temperatura cerca del árbol corresponde a la influencia de la sombra del poró sobre los sensores de temperatura.

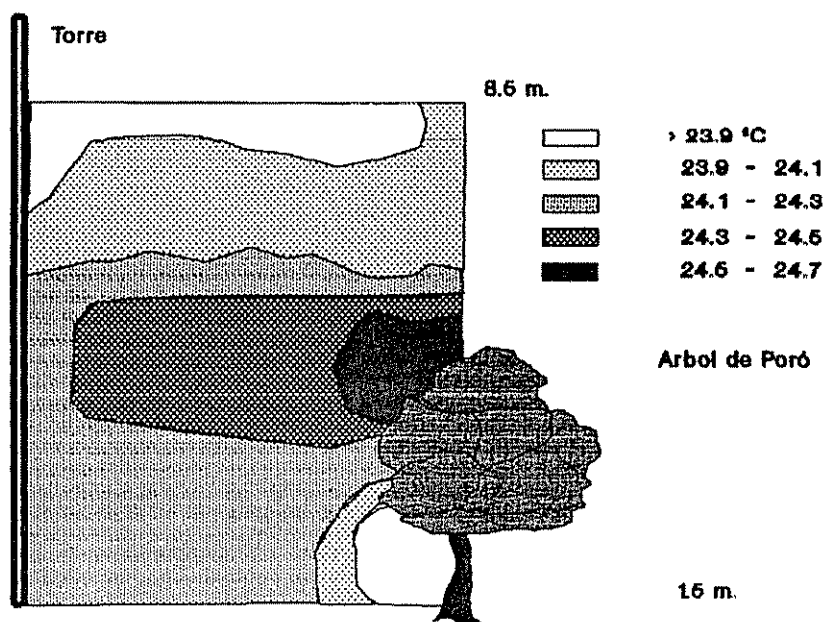


Figura 19. Cartografía de los perfiles de temperatura medidos en el tercer grupo de mediciones.

Por encima de los 6.5 m. no se observa influencia evidente del follaje del poró sobre la temperatura del aire, exceptuando la aparente corriente de aire caliente propiamente sobre la

cobertura del árbol sugerida por el aire cargado de humedad por el proceso de evapotranspiración.

De la parte media del follaje del árbol de poró, hasta aproximadamente 1 m por encima de la copa, se observan las máximas variaciones de temperatura en el plano horizontal.

Para esta zona de mayor influencia de la vegetación del poró, se ajustó un modelo de regresión múltiple que explica las diferencias horizontales de temperatura del aire a medida que se aproxima al follaje del poró. Las variables independientes utilizadas son la distancia horizontal del centro de la parcela hacia el árbol de poró y la distancia vertical en la zona de mayor influencia del follaje del poró (de 4.5 a 7.5 m de altura, para este caso). El modelo ajustado es el siguiente:

$$dT = 1.91 - 0.10X - 0.037X^2 - 0.836Y + 0.075Y^2 + 0.034XY$$

con coeficiente de correlación $R^2 = 0.95$ y coeficiente de variación $CV = 13.11 \%$.

donde: dT es la diferencia de temperatura medida entre la torre de referencia y el mástil móvil.

X es la distancia entre el centro de la parcela (torre de referencia) y el árbol de poró.

Y es la distancia vertical dentro del ámbito de 3.5 a 6.5 m.

En el Cuadro 1A se presentan los resultados completos de la ecuación.

En la Figura 20, se presenta una cartografía de los perfiles medidos en diferentes posiciones del mástil el 24 de agosto, 14 días después de efectuada la poda total del follaje del poró (10 de agosto).

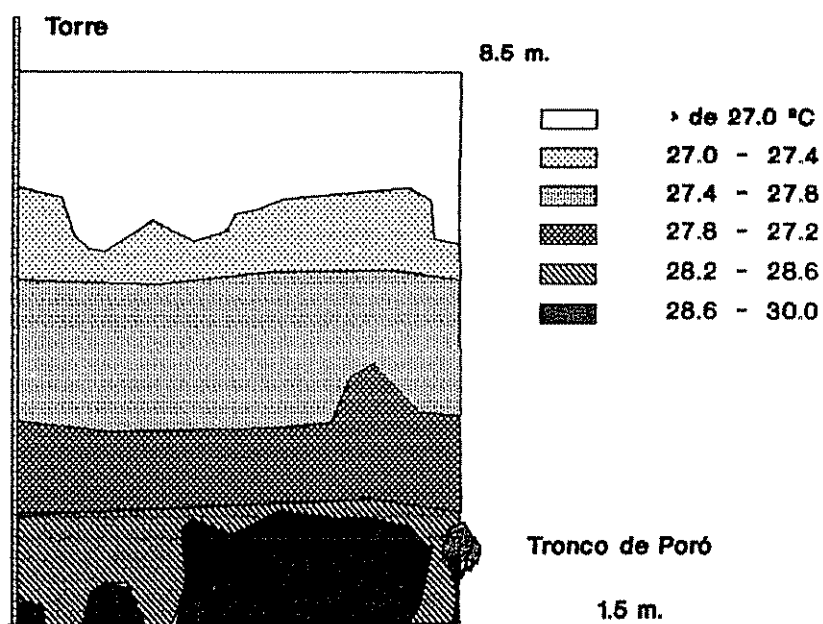


Figura 20. Cartografía de los perfiles de temperatura medidos en el cuarto grupo de mediciones.

De manera general se observa más homogeneidad de la temperatura horizontalmente. Asimismo se manifiesta en la parte inferior la variabilidad en la temperatura ocasionada por los arbustos de cafeto. Claramente se aprecia, como es lógico, que no existe influencia de la cobertura del poró en las temperaturas medidas en diferentes posiciones del mástil móvil.

Acerca del modelo ajustado hay que destacar que no se pretende dar una total explicación al fenómeno de las variaciones de temperatura dentro del sistema estudiado. Para lograr esto se debe disponer de mayor número de mediciones, las cuales tienen que integrar otras fuentes de variación, como son: diferentes horas del día, condiciones de radiación, humedad, desarrollo de la vegetación, etc.

5. CONCLUSIONES

Se observó que los valores de velocidad del viento obtenidos a 6.5 m de altura fueron siempre mayores a los encontrados a a 3.5 m de altura.

No se pudo determinar la presencia de variaciones de la velocidad del viento a nivel horizontal, debido posiblemente a las bajas velocidades presentadas durante el estudio, pero que son típicas en la zona.

Se encontró diferencias de temperatura del aire a nivel vertical y en el plano horizontal, dentro de la malla elemental del sistema estudiado.

El follaje del poró, como era de esperarse, fue determinante para la manifestación de diferencias horizontales y verticales en la temperatura del aire.

Las máximas diferencias horizontales en la temperatura del aire variaron entre 1 y 1.5 °C, en las diferentes alturas evaluadas dentro de la malla elemental.

Queda por estudiar la sensibilidad de las ecuaciones de cálculo de la evapotranspiración a estas temperaturas, y ver que significa realmente en términos de consumo de agua por el sistema.

LITERATURA CONSULTADA

- ANDERSON, D.E.; VERMO, S.B.; CLEMENT, R.J.; BALDOCCHI, D.D.; MATT, D.R. 1986. Turbulence spectro of CO₂, water vapor, temperature and velocity over a deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.* 38: 81-99.
- BEER, J. 1987. Ventajas y desventajas y características deseables de los árboles de sombra para café, cacao y té. Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza, CATIE, Turrialba, C.R. 77 p.
- BERGEN, J.D. 1975. Air movement in a forest clearing as indicated by smoke drift. *Agric. For. Meteorol.* 15:165-179.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC, 1990. Met one wind speed sensor model 014A: Instruction Manual. Campbell Scientific. USA. 6 p.
- CATIE., 1986. Sistemas Agroforestales: Principios y aplicación en los trópicos. San José, Costa Rica. 18 p.
- CHACON, E. J., 1990. Análisis del crecimiento del follaje en tres especies de Erythrina en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Programa de Estudios de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, CATIE. Turrialba, C.R. 1990. 51 p.
- DOLMAN, A.J. 1986. Estimates of roughness length and zero plane displacement for a foliated and non-foliated oak canopy. *Agric. For. Meteorol.* 36: 241-248.
- EASTHAM, J.; ROSE, C.W.; CAMERAN, D.M.; RONCE, S.J.; TALSMO, T. 1988. The effect of free spacing on evaporation from agroforestry experiment. *Agric. For. Meteorol.* 42:355-368.
- GASH, J.H.; SHUTTLEWORTH, W.J.; LLOYD, C.R.; ANDRE, J.C.; GOUTORBE, J.P.; GELPE, J. 1989. Micrometeorological measurements in les landes forest during. HAPEX-MOBILHY: *Agric. For. Meteorol.* 46:131-147.
- GOURDIAAN, J. 1989. Simulation of micrometeorology of crops, some methods and their problems, and ten results. *Agric. For. Meteorol.* 47: 239-258.
- GRASER, E.A.; UERMA, S.B.; ROSEMBERG, N.J. 1987. Within-canopy temperature patterns of sorghum at two row spacing. *Agric. For. Meteorol.* 39:309-317.

- HASKER, R.P.JR.; NAPPO, C.J. JR; HANNA, S.R.1974. Diurnal variation of vertical thermal structure in a pine plantation. Agric. For. Meteorol. 13:259-265.
- HATFIELD, J.L.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. 1984. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. Agric. For. Meteorol. 32: 41-53.
- HEWLETT PACKARD. s.f. Practical temperature measurements. 25 p.
- HOLMES, R.M.; DINGLE, A.N. 1965. The relationship between the macro-and microclimate. Agric. Meteorol. 2:127-133.
- JIMENEZ, F.; LHOMME, J.P. 1990. Elementos de micrometeorología. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE, Turrialba, C.R. 51 p.
- MARAUX, F.; RAPIDEL, B., 1990. La simulación del balance hídrico: aplicación para la determinación de fechas de siembra. Proyecto Regional de Agrometeorología. CATIE-CIRAD-ORSTOM. Turrialba, C.R., 1990. 31 p.
- MEDIETA, M.R., 1989. Diagnóstico integral de la cuenca del río Danto, la Ceiba, Honduras y acciones estratégicas para la formulación de un plan de manejo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 244 p.
- MEZA, R.; SANCHEZ, F., 1990. Plan de uso de la tierra. Ceiba, Tela, Honduras. Proyecto de Desarrollo de Bosque Latifoliados, Programa Forestal Honduras-Canadá. 122 p.
- MOFFAT, R. (s.f.) Gradient approach to thermocouple. Thermocouple thermometry. 5 p.
- MONTEITH, J.L. 1973. Principles of environmental physics. American Elsevier. New York. 243 p.
- MONTEITH, J.L. 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold. London. 241 p.
- MUNRO, D.S.; OKE, T.R. 1973. Estimating wind profile parameters for tall dense crops. Agric. For. Meteorol. 11:223-228.
- OKE, T.R. 1978. Boundary layer climates methuen. London. 372 p.
- PALMER, J.H. 1967. Diurnal variation in leaf and boll temperatures of irrigated cotton grown under two soil moisture regimes in a semi arid climate. Agri. For. Meteorol. 4:39-54.
- ROSEMBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. 1983. Microclimate: The biological environment. Wiley & Sons, New. York. 495 p.

- SAVAGE, M.J.; WIEBE, H.H. 1987. Voltage end-point determination for thermocouple psychrometers and the effect of cooling time. *Agric. For. Meteorol.* 39: 309-317.
- SHUTTLEWORTH, J.H.; LLOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J., 1984. Eddy measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quart, J.R. Met. Soc.* 110 p.
- TULLER, S.E. 1973. Effect of vertical vegetation surface on the adjacent microclimate: the role of aspect. *Agric. Meteorol.* 12: 407-427.
- UNWIN, D.M. 1980. *Microclimate: Measurements for ecologist.* Academic Press, Inc. New. York. 97 p.
- WEISS, A.; ALLEN, L.H. JR. 1976. Air flow patterns in vineyard rows. *Agric. For. Meteorol.* 16: 329-342.
- WEISS, A.; ALLEN, L.H. JR. 1976. Vertical and horizontal air flow above rows of vineyard. *Agric. Meteorol.* 17:433-452.
- WESCOR, INC. s.f. RJ-15 Thermocouple reference junction: *Instruction Manual.* USA. 6 p.

ANEXOS

Cuadro 1A. Resultados completos del modelo ajustado.

Variable dependiente: dT					
Fuente	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Pr >
Modelo	5	0.29734286	0.05946857	37.09	0.0001
Error	9	0.01443048	0.00160339		
Total	14	0.31177333			

Parametro	Estimado	Pr > T	Error estándar del estimado
Intercepto	1.913834791	0.0004	0.34630618
X	-0.099630709	0.1779	0.06817306
X ²	-0.036929057	0.0168	0.01260951
Y	-0.835755102	0.0001	0.12583053
Y ²	0.075333333	0.0001	0.01116727
XY	0.033877551	0.0029	0.00837370