



El Clima de la caficultura en Colombia

Álvaro Jaramillo R.



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

80 años de Ciencia
para la Caficultura colombiana



El Clima de la caficultura en Colombia

Álvaro Jaramillo R.*



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

80 años de Ciencia
para la Caficultura
colombiana

*Investigador Senior, Disciplina de Agroclimatología,
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Ministro de Hacienda y Crédito Público
Alberto Carrasquilla Barrera

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Andrés Valencia Pinzón

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
José Manuel Restrepo Abondano

Director del Departamento Nacional de Planeación
Gloria Alonso Másmela

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Nicolás Pérez Marulanda

Comité Nacional

Período 1° enero/2015- diciembre 31/2018

José Fernando Montoya Ortega

José Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Vélez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Pedro Gonzalo Carrillo Urariyu

Javier Bohórquez Bohórquez

Álvaro Espitia

Ricardo Arturo Hernández Rubio

Jesús Armando Benavides Portilla

Alfredo Yáñez Carvajal

Carlos Alberto Cardona Cardona

Luis Miguel Ramírez Colorado

Héctor Santos Galvis

Luis Javier Trujillo Buitrago

Camilo Restrepo Osorio

Gerente General

Roberto Vélez Vallejo

Gerente Administrativo

Carlos Alberto González Arboleda

Gerente Financiero

Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial

Juan Camilo Ramos

Gerente Técnico

Hernando Duque Orrego

Director Investigación Científica y Tecnológica

Álvaro León Gaitán Bustamante

Comité Editorial Cenicafé

Pablo Benavides M.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Paula Jimena Ramos Giraldo

Ph.D. Ing. Electrónica. Poscosecha, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.

Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.

Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina Vinasco

Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín L.

Diseño

Carmenza Bacca R.

Diagramación

Óscar Jaime Loaiza E.

Impresión

Capital Graphic S.A.S

© FNC - Cenicafé - 2018

ISBN 978-958-8490-21-2

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.



Índice

- 6** **Presentación**
- 10** **Introducción**
- 14** **Las regiones cafeteras de Colombia**
- 46** **La variabilidad climática en el trópico**
 - Escalas para el estudio del clima
 - La Zona de Convergencia InterTropical (ZCIT)
 - El Niño – La Niña-Oscilación del Sur
 - Condiciones del océano Pacífico durante El Niño
 - El Niño en Colombia
 - El Niño en la zona cafetera
 - Condiciones del océano Pacífico durante La Niña
 - La Niña en Colombia
 - La Niña en la zona cafetera
 - Los eventos de El Niño y La Niña
 - El Niño-La Niña Modoki
 - Las Ondas de los Alisios
 - Ondas Intra-Estacionales
 - Oscilación Cuasi-Bienal
 - Oscilación Decadal del Pacífico
 - Oscilación Multidecadal del Atlántico
 - Oscilación del Atlántico Norte
 - La Influencia del océano Pacífico
 - Influencia de la Amazonia
- 46** **El clima de las montañas**
- 52** **La radiación solar**
 - Radiación visible
 - Radiación infrarroja cercana
 - Radiación Fotosintéticamente Activa
 - Radiación termal o calor
 - Leyes de la radiación
 - Ley del Coseno de Lambert
 - Ley de Kirchoff
 - Ley de Planck
 - Ley de desplazamiento de Wien
 - Ley de Stefan-Boltzman
 - Balance de radiación y de energía

- La radiación solar en la zona cafetera de Colombia
- Insolación (brillo solar)
- Relación entre la radiación directa y la difusa
- Balances de radiación solar y de energía en una cuenca hidrográfica
- Balance de radiación solar en los cultivos
- Balance de energía en un cultivo
- Índice Normalizado de Vegetación

72 **La temperatura**

- Variación de la temperatura con la latitud
- Variación de la temperatura con la altitud
- Amplitud térmica
- Inversión térmica
- La temperatura del suelo
- Variación de la temperatura del suelo con la profundidad
- La temperatura de la planta
- La influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de la planta
- Islas de calor – temperatura de las ciudades

84 **La humedad del aire**

88 **La evaporación y la evapotranspiración**

- Medida de la evapotranspiración
- Métodos de medida directa
- Evapotranspirómetros y lisímetros
- Método hidrológico
- Método aerodinámico
- La evaporación en Colombia
- La evapotranspiración de referencia
- Evaporación de tanque A y la evapotranspiración de referencia (ET_o)

98 **La precipitación**

- Las características de la lluvia en Colombia
- Variación de la precipitación con la altitud
- Los patrones de la lluvia en Colombia
- Distribución de la lluvia
- La intensidad de la lluvia
- Ciclo diario de la precipitación
- Sistemas convectivos de mesoescala

120 El balance hídrico

El ciclo hidrológico
Balance hídrico en la zona cafetera de Colombia
Balance hídrico en las comunidades vegetales
La lluvia neta (lluvia efectiva)
La escorrentía
La percolación
El transporte de los nutrientes
Precipitación horizontal - bosque de niebla
La influencia de los bosques en el clima (Teoría de la Bomba Biótica)

142 El viento

Los vientos de valle - montaña
El viento dentro de los cultivos
Barreras rompevientos

148 Las heladas, el granizo, las descargas eléctricas, la presión atmosférica

154 El cambio climático

Causas del cambio climático
Mecanismos de forzamiento externo
Variaciones galácticas
Variaciones orbitales
Variaciones solares
Mecanismos de forzamiento interno
La formación de los continentes-Epirogénesis-
La formación de las montañas-Orogénesis-
La actividad volcánica
La circulación oceánica
La variación en la composición atmosférica
Retroalimentación climática
Cambio climático en Colombia

162 La adaptación de los ecosistemas - resiliencia

168 La agroclimatología del café

Desarrollo y crecimiento del café
Requerimientos de fotoperíodo
Requerimientos térmicos
Requerimientos hídricos
Períodos secos y húmedos en la zona cafetera de Colombia
Etapas de desarrollo del fruto de café
El Niño y sus efectos sobre el cultivo del café
La Niña y sus efectos sobre el cultivo del café
Épocas de siembra del café en Colombia
El sombrío en los cafetales
El efecto del viento en el café
Efecto del granizo en el café
Daños en el café por descargas eléctricas
Efecto de las heladas sobre los cafetos

188 Literatura citada



Presentación



Café y clima, una relación que nos apremia entender para acertar al momento de tomar decisiones en los sistemas de producción. Café, clima y montaña, una relación aún más compleja que es parte del día a día de los cultivadores colombianos, y que conforma los factores que definen al Café de Colombia como un producto especial y de calidad diferenciada.

La calidad de una taza de café es el resultado de múltiples componentes, entre los que se incluyen la variedad, el manejo agronómico de las plantaciones, las condiciones climáticas en las que se desarrolló el fruto, la madurez de los frutos en el momento de la cosecha, los cuidados en su beneficio para obtener un grano verde, el almacenamiento y la tostación de esos granos, y finalmente el método de preparación de la bebida.

De todos estos factores, las condiciones climáticas son las únicas por fuera del control de los actores de la cadena, pero por eso no deben ser ignoradas, si no todo lo contrario, requieren de un mejor entendimiento que le permita a los caficultores reaccionar en el corto y el mediano plazo, de manera que los sistemas de producción se construyan de manera robusta y se adapten a las condiciones predominantes en una región, vereda o lote, y además presenten la resiliencia necesaria para recuperarse rápidamente a eventos extremos que ocasionalmente se presenten.

En la celebración de los 80 años de labores del Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, es un orgullo contar con la participación del Investigador Científico Álvaro Jaramillo Robledo, Ingeniero Agrónomo con maestría en Agrometeorología, quien durante 45 años ha contribuido desde la Disciplina de Agroclimatología a entender el comportamiento del clima en las regiones montañosas de Colombia, el sitio de origen de nuestro café.

En el libro “El clima de la caficultura en Colombia” se presentan de manera clara y con el correspondiente respaldo teórico, los conceptos fundamentales que definen a los determinantes del clima, iniciando con los

efectos de las grandes masas de agua del planeta, los océanos Pacífico y Atlántico, y en el caso de Colombia considerando la influencia de la Amazonia. El contenido continua con la caracterización de los principales componentes del clima como son la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire, la precipitación y el viento, basados en la recopilación cuidadosa y el análisis juicioso de datos que ha adelantado Cenicafé desde hace más de 60 años, mediante la Red Agroclimática Cafetera, soportada de manera ininterrumpida por la Federación Nacional de Cafeteros, y que resume las series publicadas periódicamente desde 1945 de manera impresa o digital, a través del Anuario Meteorológico Cafetero de Cenicafé.

Esta sólida base de datos permite desarrollar un concepto aún más complejo y útil, como es el de balance hídrico, de gran aprovechamiento para la agricultura por su asociación con la fisiología de la planta y, por ende, con las prácticas agronómicas que hacen parte de la inmediatez que acompaña a un cultivo perenne como el café.

Y mientras el mundo continua el debate sobre las causas, la velocidad y la magnitud del fenómeno constante del cambio climático, que ha acompañado a la Tierra desde su formación, los contenidos de “El clima de la caficultura en Colombia” conducen a la identificación de los factores que definen la variabilidad climática en el trópico, que van desde las posiciones relativas de los astros y el comportamiento del sol y de la luna, hasta el acontecer geológico de continentes y montañas, y finalmente las condiciones particulares que afectan a la caficultura de Colombia, para redondear con la presentación de la relación directa entre la adaptación de los sistemas y la resiliencia, que conecta los fenómenos climáticos con los requerimientos específicos del café arábigo.

Desde la evidencia de la investigación científica, “El clima de la caficultura en Colombia” hace un aporte importante al entendimiento de la relación café-clima-montaña, una combinación que complementada con la dedicación de los caficultores colombianos, sigue siendo la clave para producir las mejores tazas de café del mundo.

Álvaro León Gaitán B.

Director Cenicafé

Octubre de 2018



Introducción





La producción agrícola depende del tiempo atmosférico y del clima; el conocimiento de los recursos ambientales disponibles y de las condiciones de las capas de aire situadas desde la superficie del suelo, teniendo en cuenta la capa límite suelo-aire hasta llegar a los niveles inferiores de la atmósfera, permite establecer directrices en las decisiones estratégicas para la planificación a corto y a largo plazo de los sistemas agrícolas.

Históricamente en la América prehispánica, los Mayas lograron importantes avances en los conocimientos matemáticos, cronológicos y astronómicos: registraron el ciclo anual del sol, el ciclo lunar, midieron los ciclos de Venus, Marte, Júpiter y Saturno, registraron los eclipses solares, desarrollaron el concepto del cero. Todas las creaciones culturales Mayas están fundamentadas en una concepción religiosa del mundo, explicadas por energías sagradas; estas energías son dioses que encarnan fuerzas de la naturaleza, entre los que están los astros y la lluvia (dios *Chaac*); generalmente se representaban por animales, así, el sol se manifiesta como una guacamaya o un jaguar, y la lluvia como una serpiente (Garza, De La, 1995).

En el territorio colombiano la observación de los diferentes fenómenos atmosféricos se remonta a períodos anteriores a la llegada de los españoles. Para los Muisca, aborígenes de las regiones de Cundinamarca y Boyacá, el culto al sol además de ser el centro de su religión y de sus mitos, tenía un papel importante en las actividades agrícolas y su representación aparece en varios monolitos, como se observa en las columnas de piedra del Observatorio Astronómico de *El Infiernito* en Villa de Leiva. Los Muisca también asociaron diferentes animales con los elementos meteorológicos, asociaban las ranas y los sapos con la lluvia, las serpientes y las guacamayas con el viento, los lagartos, los escarabajos y varios insectos con los períodos de siembra o recolección y a veces con observaciones fenológicas (Betancourt, 1982).

El conocimiento del clima del actual territorio colombiano viene desde las épocas precolombinas. Del encuentro entre los aborígenes y los primeros colonizadores españoles se derivó un conocimiento empírico del clima, sumado a las observaciones propias de los cronistas como Cieza de León, Hernández de Oviedo, Pedro Aguado, Pedro Simón y José Gumilla, entre los más destacados, se construyeron las descripciones del clima de la Nueva Granada entre el siglo XVI y XVIII. Las primeras observaciones y mediciones instrumentales de variables meteorológicas registradas se realizaron en Cartagena en 1735 por Jorge Juan y Antonio Ulloa, quienes formaron parte de una comisión que viajó a explorar la América meridional (Pabón, 2006).

José Celestino Mutis a su llegada a la Nueva Granada en 1760, fue el primero en traer barómetros y termómetros con los cuales se iniciaron las primeras mediciones. En 1803 se funda el Observatorio Astronómico de Santafé de Bogotá, como una institución de apoyo a la Expedición Botánica. En 1808, Francisco José de Caldas publicó en el *Semanario de la Nueva Granada*, mediciones de la presión atmosférica y la temperatura del aire y redescubre el hipsómetro con el cual se determina la altitud de una localidad a partir de la variación del punto de ebullición del agua (Albis y Martínez, 2000; Betancourt, 1982). F. J. de Caldas relaciona el clima con los seres vivos, en su obra *El influjo del clima sobre los seres organizados*, estudio en el cual se plantean fundamentos de la sociología y de la antropología colombiana (Caldas, 1808).

Entre los años de 1799 y 1804 Alejandro von Humboldt realizó observaciones astronómicas y mediciones barométricas en su viaje a la Nueva Granada (Humboldt, 1832). En 1823, en la misión francesa integrada por Rivero, Boussingault y Roulin, se hacen importantes aportes en el campo de la meteorología, con observaciones sobre la irradiación nocturna de las cordilleras de la Nueva Granada, la determinación de la temperatura de la zona Tórrida al nivel del mar y se logran avances en el conocimiento sobre la disminución de

la temperatura con la altura, en las cordilleras (Boussingault y Roulin, 1849). Indalecio Liévano, matemático y climatólogo realizó medidas barométricas en Bogotá y Cartagena (1868, 1871 y 1872) y publicó un folleto sobre Meteorología Agrícola (Betancourt, 1982).

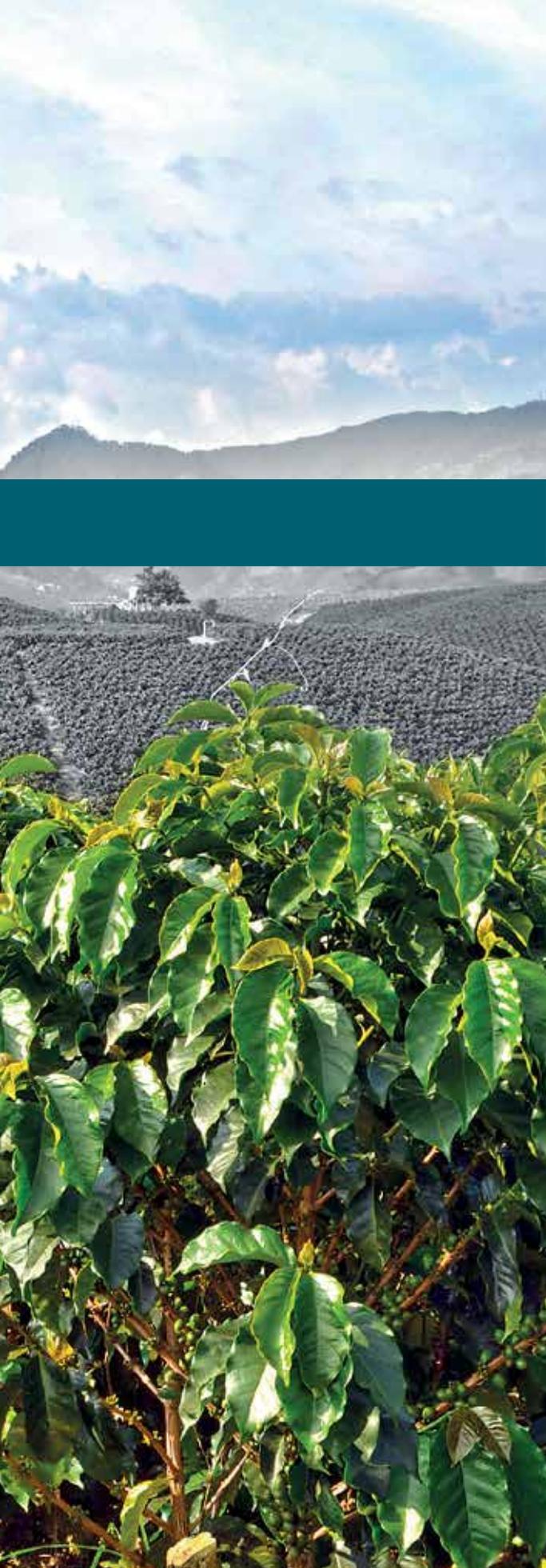
El Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH), se creó por recomendación y asesoría de la Organización Meteorológica Mundial en 1969, se integraron las redes climáticas existentes en la época en una sola red nacional con estándares de mediciones, observaciones regulares y de procesamiento de información constituyendo un solo archivo nacional de información hidrológica y meteorológica. Posteriormente, esta red ha sido operada por instituciones como el Himat (1978–1994) y el Ideam (desde 1995 hasta el presente) como parte importante del Sistema de Información Ambiental del país (Pabón, 2006).

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia consideró importante estudiar la influencia del clima en el desarrollo del cultivo del café en las diferentes regiones cafeteras. Las observaciones climáticas comenzaron en 1942 con la instalación de una estación en el Centro Nacional de Investigaciones de Café en Chinchiná-Caldas. En 1945 el Congreso Nacional de Cafeteros ordenó la creación de un Servicio Meteorológico propio. En el año de 1950 se estableció la primera red climática con estaciones completas en seis zonas de producción de café: Cenicafé La Granja-Manizales-Caldas, La Florida-Popayán-Cauca, Esteban Jaramillo-Venecia-Antioquia, Granja Líbano-Líbano-Tolima, Blonay-Chinácota-Norte de Santander y un pluviómetro en La Bella-Calarcá-Quindío. Las investigaciones agroclimáticas del café relacionadas con la caracterización de las condiciones meteorológicas y climatológicas de las zonas cafeteras de Colombia y las micrometeorológicas de los cafetales se iniciaron en Cenicafé en los años cincuenta (Schroeder, 1951; Trojer 1954a y b, 1955, 1959) y han continuado hasta el día de hoy. Actualmente en la red climática de la zona cafetera funcionan 370 estaciones entre convencionales y automáticas.

En la presente publicación se hace una ampliación de las investigaciones agroclimáticas realizadas por el Centro Nacional de Investigaciones de Café desde su creación en 1938 (Jaramillo, 2005a) relacionadas con los aspectos macroclimáticos y microclimáticos de los sistemas de producción de café en Colombia y su influencia en el crecimiento y desarrollo del cultivo.



Las regiones cafeteras de Colombia



Los cambios abruptos en el relieve de Colombia originan la gran diversidad de climas que determinan cinco grandes regiones geográficas (Guhl, 1975):

- ♦ La región del Caribe, en el litoral Atlántico, con clima desde semihúmedo hasta árido, exceptuando la Sierra Nevada de Santa Marta.
- ♦ La región Pacífica, con clima húmedo y superhúmedo.
- ♦ La región Andina, con sus tres cordilleras, ecológicamente muy subdividida por cinturones horizontales y verticales de clima y vegetación. En esta región está situada la zona cafetera.
- ♦ La región de la Orinoquia.
- ♦ La región de la Amazonia.

Las regiones cafeteras de Colombia están localizadas sobre la cadena de los Andes, en las laderas de las tres cordilleras que cruzan el territorio de Sur a Norte: cordilleras Occidental, Central y Oriental.

La región cafetera se ha dividido latitudinalmente en tres grandes zonas:

- ♦ Zona Cafetera Norte (latitud mayor a 7° Norte).
- ♦ Zona Cafetera Central (entre los 3° y los 7° de latitud Norte), subdividida en la Región Cafetera Central Norte (latitud entre 5° y 7° Norte) y Región Cafetera Central Sur (latitud entre 5° y 3° Norte).
- ♦ Región Cafetera Sur (latitud menor de 3° Norte).

En general, los cultivos de café en Colombia se encuentran localizados entre los 1.000 y 2.000 m de altitud, con variaciones regionales de acuerdo con las laderas de las cordilleras donde estén ubicados (Figura 1).

En la Tabla 1, se presenta la localización geográfica de algunas de las estaciones de la red climática de la zona cafetera, establecida por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y operada por Cenicafe desde 1950 (Cenicafe, 2017).

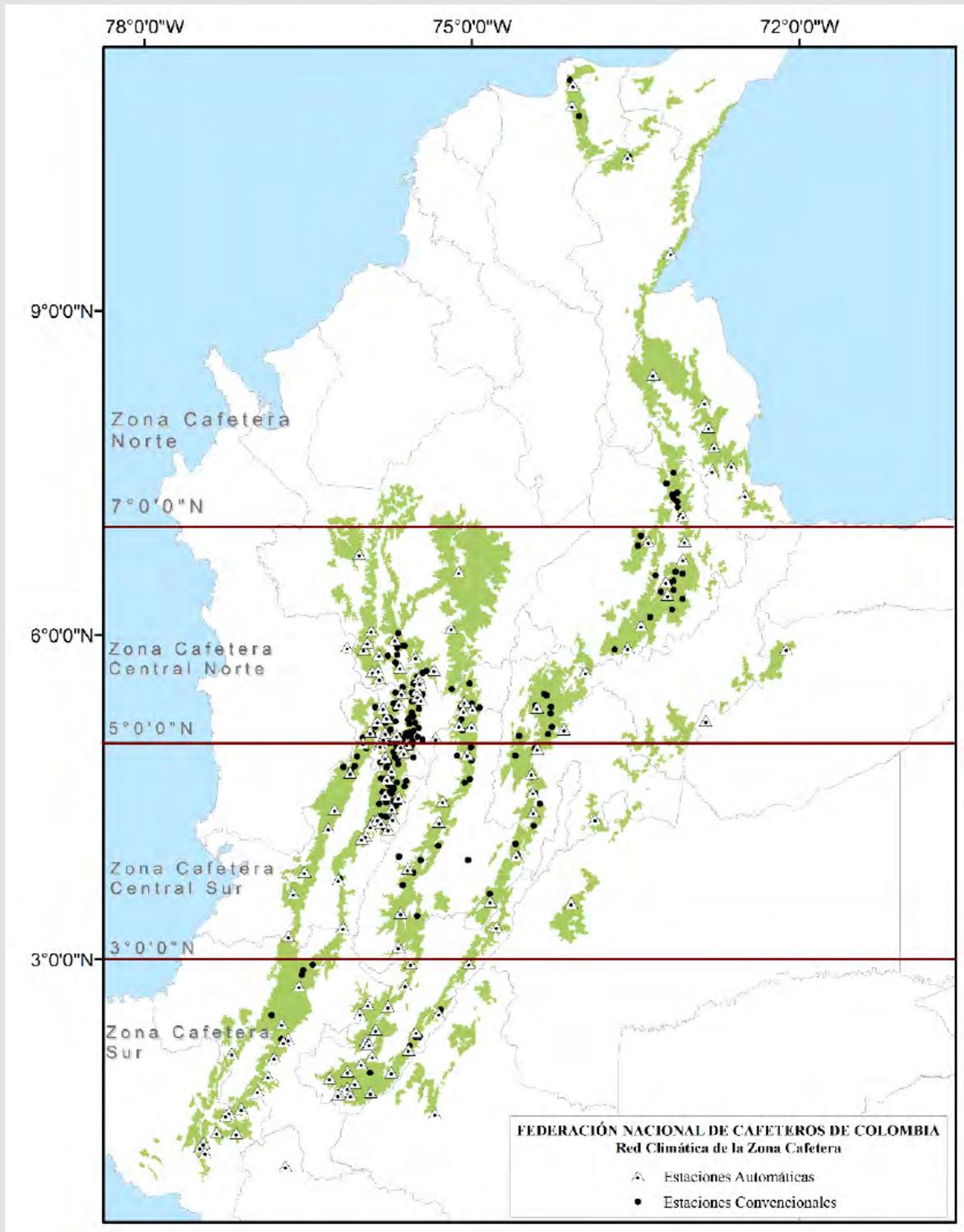


Figura 1. Regiones de la zona cafetera de Colombia. Red climática de la zona cafetera. Cenicafé-Federación Nacional de Cafeteros.

Tabla 1.

Localización geográfica de estaciones climáticas de la zona cafetera de Colombia.

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Antioquia				
Carimagua	Amagá	6,02	-75,68	1.802
El Trapiche	Ciudad Bolívar	5,80	-76,02	1.277
Cocorná	Cocorná	6,07	-75,18	1.344
La Aldea	Dabeiba	7,02	-76,25	1.500
Santa Isabel	Fredonia	5,88	-75,68	1.963
Santa Cruz	Fredonia	5,90	-75,63	1.400
La Blanquita	Fredonia	5,82	-75,68	570
Jonas	Fredonia	5,98	-75,68	1.252
Bariloche	Fredonia	5,92	-75,70	1.748
Miguel Valencia	Jardín	5,60	-75,85	1.621
El Porvenir	Jericó	5,80	-75,77	1.906
El Ocaso	Medellín	3,53	-74,88	1.000
El Refugio	Medellín	4,70	-74,43	1.250
El Rocío	Medellín	4,62	-75,75	1.400
La Morenita	Medellín	4,90	-75,77	1.440
La Nacional	Támesis	5,72	-75,70	1.190
Virgen de Oro	Támesis	5,75	-75,70	1.656
La Cristalina	Támesis	5,70	-75,67	775
El Rosario	Venecia	5,97	-75,70	1.635
Boyacá				
Bertha	Moniquirá	5,88	-73,57	1.677
Caldas				
San José	Aguadas	5,57	-75,47	1.663
El Regazo	Aguadas	5,62	-75,50	1.662
Cuatro Esquinas	Aguadas	5,67	-75,42	1.900
Guaymaral	Aguadas	5,65	-75,45	1.600
Santa Fe	Anserma	5,18	-75,78	1.410
El Tabuyo	Anserma	5,25	-75,78	1.669
La Congoja	Anserma	5,20	-75,70	1.550
La Miranda	Anserma	5,23	-75,73	1.840
La Praderita	Belalcázar	5,00	-75,78	1.329
Moravo	Chinchiná	5,02	-75,72	1.146
Bengala	Chinchiná	4,95	-75,60	1.650
La Sierra	Chinchiná	4,98	-75,63	1.440
La Romelia	Chinchiná	4,97	-75,67	1.335
Naranjal	Chinchiná	4,97	-75,65	1.381
Los Pomos	Chinchiná	4,97	-75,58	1.583
La Divisa	Chinchiná	4,98	-75,60	1.590
El Mirador	Filadelfia	5,23	-75,57	1.650

Continúa...

...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
La Ilusión	Filadelfia	5,22	-75,58	1.348
La Julia	Filadelfia	5,30	-75,57	1.650
El Socorro	La Merced	5,38	-75,55	1.852
Llanadas	La Merced	5,38	-75,55	1.800
La Juliana	Manizales	5,13	-75,48	1.785
Planalto	Manizales	4,98	-75,58	1.413
El Algarrobo	Manizales	5,07	-75,58	1.202
Santa Teresa	Manizales	5,12	-75,53	1.698
Santa Teresita	Manizales	5,07	-75,62	1.172
Las Colinas	Manizales	5,10	-75,57	1.450
El Pistacho	Manizales	5,07	-75,55	1.582
Almacafé Letras	Manizales	5,05	-75,33	3.684
Recinto del Pensamiento	Manizales	5,03	-75,45	2.187
Tesorito	Manizales	5,03	-75,45	2.200
La Selva	Manizales	5,08	-75,60	1.312
Java	Manizales	5,02	-75,53	1.778
Cenicafé	Manizales	5,00	-75,60	1.310
Agronomía	Manizales	5,05	-75,50	2.088
Finca Tesorito	Manizales	5,02	-75,62	2.200
El Brisal	Manzanares	5,22	-75,10	1.390
Llanadas	Manzanares	5,20	-75,13	1.420
El Descanso	Marmato	5,50	-75,62	1.803
La Esperanza	Marquetalia	5,30	-75,08	1.463
Santa Helena	Marquetalia	5,32	-75,00	1.395
Piamonte	Neira	5,18	-75,52	1.625
Llano Grande	Neira	5,18	-75,57	1.414
El Refugio	Neira	5,18	-75,58	1.320
La Cascada	Pácora	5,47	-75,55	1.600
El Morro	Pácora	5,47	-75,48	1.741
La Linda	Pácora	5,55	-75,53	1.750
Santa Ana	Palestina	5,02	-75,67	1.250
La Palma	Palestina	5,02	-75,68	1.165
La Argentina	Palestina	5,03	-75,68	1.354
El Recreo	Palestina	5,03	-75,65	1.430
La Margarita	Palestina	5,03	-75,62	1.436
Santágueda	Palestina	5,07	-75,67	1.026
Granja Luker	Palestina	5,07	-75,68	1.031
Hogar Juvenil	Pensilvania	5,50	-75,18	1.560
Granja Kennedy	Pensilvania	5,33	-75,10	1.900
La Manuelita	Riosucio	5,37	-75,68	1.460
La Argentina	Riosucio	5,47	-75,70	1.420

Continúa...



...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
San Lucas	Risaralda	5,12	-75,75	1.105
La Palmita	Risaralda	5,08	-75,77	1.401
Encimadas	Salamina	5,38	-75,47	1.850
La Gaviota	Salamina	5,37	-75,48	1.772
El Ciprés	Salamina	5,43	-75,50	1.877
El Tiburio	Samaná	5,55	-75,02	1.403
El Medio	Samaná	5,37	-75,00	1.352
Rafael Escobar	Supía	5,45	-75,63	1.307
La Pastorita	Victoria	5,32	-74,97	1.122
Cuba	Victoria	5,33	-74,93	1.054
Bello Horizonte	Villamaría	4,98	-75,55	1.690
La Esmeralda	Viterbo	5,08	-75,90	1.365
Cauca				
Madrigal	Caldono	2,85	-76,55	1.434
La Suecia	El Tambo	2,48	-76,83	1.693
Manuel Mejía	El Tambo	2,40	-76,73	1.735
La Trinidad	Piendamó	2,75	-76,58	1.671
Portachuelo	Rosas	2,27	-76,75	1.695
Mondomo	Santander de Quilichao	2,90	-76,55	1.380
La Esperanza	Santander de Quilichao	2,95	-76,45	1.608
Instituto Técnico	Santander de Quilichao	3,02	-76,48	1.110
Pueblo Bello	Pueblo Bello	10,42	-73,57	1.134
El Helechal	Valledupar	10,43	-73,57	1.447
Cundinamarca				
San Luis	Arbeláez	4,23	-74,43	1.700
Mesitas de Santa Inés	Cachipay	4,72	-74,45	1.340
El Paraíso	Caparrapí	5,32	-74,52	1.450
Las Granjas	El Colegio	4,57	-74,43	1.400
El Porvenir	El Colegio	4,53	-74,47	1.350
Misiones	El Colegio	4,55	-74,43	1.540
Santa Rosita	El Peñón	5,27	-74,28	1.437
Valsalice	Fusagasugá	4,40	-74,38	1.450
Bethania	Fusagasugá	4,35	-74,42	1.380
Sec. de Agricultura	Guaduas	5,07	-74,60	1.060
Honduras	La Mesa	4,68	-74,45	1.077
Sec. de Agricultura	La Mesa	4,63	-74,47	1.300
Canaima	La Palma	5,35	-74,42	1.594
Secretaría Agricultura	La Palma	5,35	-74,40	1.250
Monterredondo	Quetame	4,32	-73,97	1.300
Bello Horizonte	San Antonio del Tequendama	4,60	-74,38	1.380
La Carlina	San Francisco	4,97	-74,28	1.650

Continúa...



...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
El Tesorito	San Juan de Río Seco	4,88	-74,60	1.533
El Triángulo	Sasaima	4,93	-74,42	1.500
Icalí	Sasaima	4,95	-74,42	1.328
Santa Bárbara	Sasaima	4,93	-74,42	1.478
Pinar del Río	Silvania	4,43	-74,38	1.752
La Vuelta	Tibacuy	4,33	-74,47	1.500
Granja Tibacuy	Tibacuy	4,37	-74,43	1.538
La Vistosa	Topaipí	5,33	-74,27	1.374
Cerinza	Vergara	5,15	-74,27	1.450
La Florida	Vergara	5,08	-74,30	1.400
La Esperanza	Villeta	5,02	-74,52	1.350
Atala	Viotá	4,38	-74,53	1.160
El Jardín	Yacopí	5,45	-74,32	1.245
Montelíbano	Yacopí	5,45	-74,33	1.365
Huila				
Guayabal	Algeciras	2,53	-75,28	1.460
Kiosco	Algeciras	2,53	-75,33	1.400
Villa Consuelo	Garzón	2,18	-75,57	1.570
Jorge Villamil	Gigante	2,33	-75,52	1.420
Simón Campos	La Plata	2,35	-75,88	1.754
Sucre	Tello	2,98	-75,05	1.450
Corrales	Teruel	2,75	-75,62	1.450
Buenos Aires	Teruel	2,75	-75,60	1.450
Concentración Desarrollo	Timaná	1,95	-75,93	1.141
Magdalena				
La Victoria	Santa Marta	11,13	-74,10	1.100
Jirocasaca	Santa Marta	11,05	-74,03	710
Nariño				
Ospina Pérez	Consacá	1,25	-77,48	1.603
La Unión	La Unión	1,58	-77,13	1.800
El Sauce	La Unión	1,62	-77,12	1.609
Norte de Santander				
Blonay	Chinácota	7,57	-72,62	1.250
La Estrella (La Vega)	Convención	8,47	-73,33	1.000
Gabriel María Barriga	Convención	8,42	-73,33	1.261
Francisco Romero	Salazar	7,73	-72,78	903
Quindío				
La Pradera	Armenia	4,47	-75,72	1.350
Tucumán	Armenia	4,53	-75,73	1.250
El Sena	Armenia	4,57	-75,65	1.550
La Esperanza	Buenavista	4,37	-75,75	1.428

Continúa...

...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Paraguaicito	Buenavista	4,40	-75,73	1.203
El Paraíso	Calarcá	4,48	-75,68	1.400
Quebradanegra	Calarcá	4,45	-75,67	1.500
El Jardín	Calarcá	4,47	-75,70	1.365
La Bella	Calarcá	4,50	-75,67	1.449
Bremen	Circasia	4,67	-75,60	2.028
La Ilusión	Circasia	4,58	-75,72	1.442
Mónaco	Córdoba	4,42	-75,70	1.350
La Esperanza	Filandia	4,63	-75,68	1.671
La Esperanza	Génova	4,22	-75,80	1.650
La Selva	Génova	4,18	-75,82	1.833
Villa Horizaba	Génova	4,25	-75,80	1.540
La Alejandría	Génova	4,18	-75,78	1.600
La Argentina	La Tebaida	4,45	-75,78	1.200
La Miranda	La Tebaida	4,43	-75,85	1.193
Sorrento	Montenegro	4,55	-75,82	1.203
La Julia	Montenegro	4,55	-75,75	1.250
El Agrado	Montenegro	4,52	-75,80	1.275
La Esperanza	Pijao	4,30	-75,73	1.667
El Porvenir	Pijao	4,32	-75,78	1.470
Almacafé Vivero	Quimbaya	4,62	-75,77	1.330
Maracay	Quimbaya	4,60	-75,73	1.402
Normandía	Salento	4,60	-75,62	1.637
La Hungría	Salento	4,65	-75,60	2.014
Risaralda				
La Tribuna	Balboa	4,95	-75,97	1.580
Ingenio Risaralda	Balboa	2,92	-75,90	900
La Elvira	Belén de Umbría	5,18	-75,87	1.540
Los Cámbulos	Belén de Umbría	5,15	-75,88	1.400
Las Hortensias	Dosquebradas	4,87	-75,70	1.977
El Bosque	Dosquebradas	4,85	-75,68	1.458
Buenos Aires	Guática	5,32	-75,80	1.814
Ospirma	Guática	5,33	-75,82	1.661
La Palmera	Marsella	5,00	-75,75	1.450
El Barranco	Mistrató	5,33	-75,88	1.580
El Pílamó	Pereira	4,87	-75,80	1.113
Hiroshima	Pereira	4,77	-75,73	1.340
La Renta	Pereira	4,78	-75,78	1.194
La Catalina	Pereira	4,75	-75,73	1.321
Los Cámbulos	Pereira	4,82	-75,83	1.189
Planta de Tratamiento	Pereira	4,80	-75,67	1.487

Continúa...



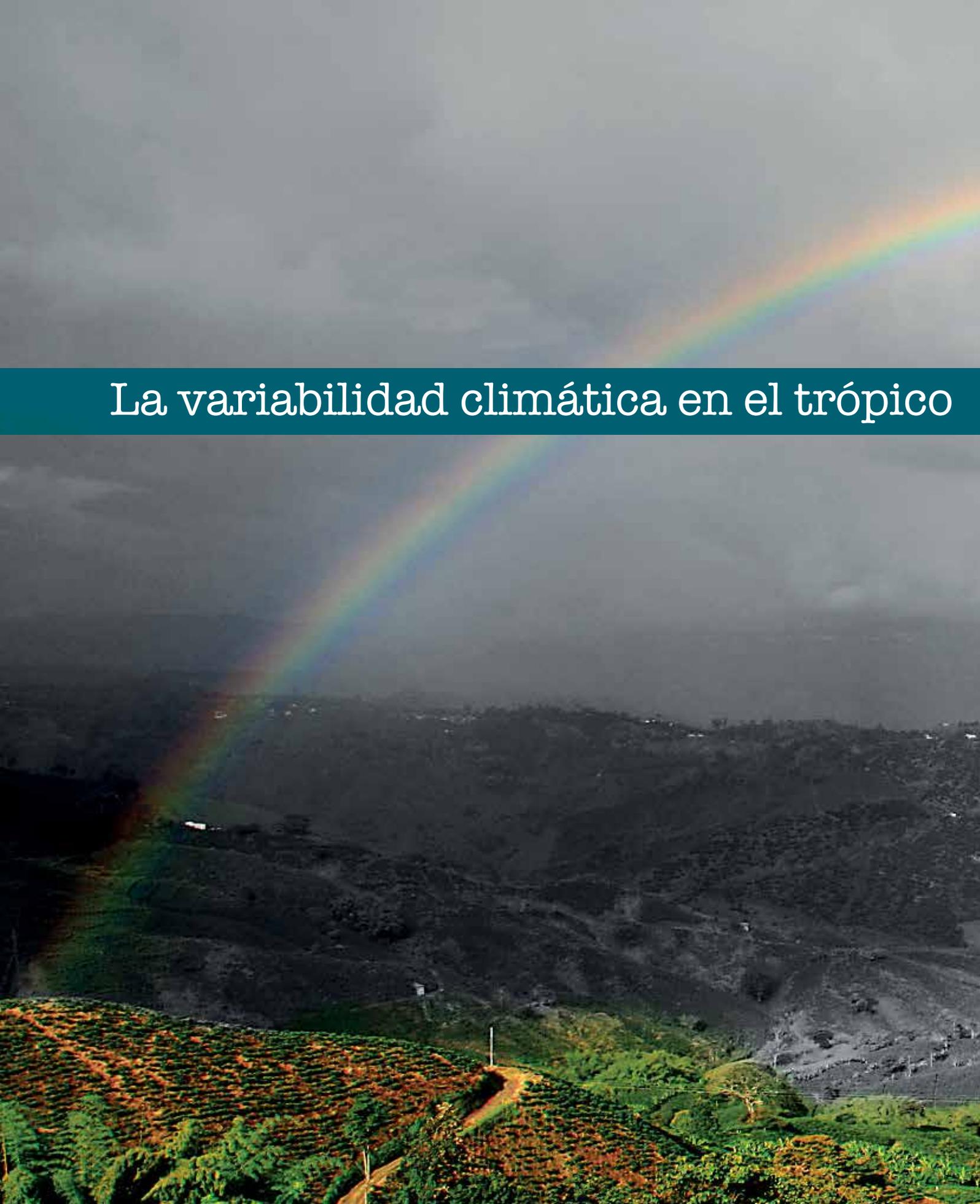
...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
La Playa	Pereira	4,82	-75,75	1.290
Combia	Pereira	4,85	-75,78	1.173
El Cedral	Pereira	4,70	-75,53	2.120
El Diamante	Quinchía	5,32	-75,70	1.550
La Oriental	Quinchía	5,37	-75,72	1.730
El Castillo	Santa Rosa de Cabal	4,93	-75,67	1.550
El Jazmín	Santa Rosa de Cabal	4,92	-75,62	1.635
Los Naranjos	Santuario	5,05	-76,00	1.580
Santander				
Cite	Barbosa	5,97	-73,60	1.600
Ceylán	Bucaramanga	7,18	-73,12	1.304
Villanueva	Charalá	6,23	-73,17	1.450
Miporal	Floridablanca	7,10	-73,08	1.237
San Antonio	Floridablanca	7,10	-73,07	1.539
Bonanza	Girón	7,08	-73,28	1.250
Sevilla	Guadalupe	6,25	-73,37	1.390
Chochos	Hato	6,55	-73,32	1.400
El Roble	Los Santos	6,87	-73,05	1.646
La Peña	Oiba	6,17	-73,37	1.630
Las Delicias	Palmas Del Socorro	6,40	-73,27	1.450
La Laguna	Páramo	6,50	-73,15	1.550
Las Flores	Pinchote	6,48	-73,18	1.700
La Cumbre	Puente Nacional	5,87	-73,68	1.691
La Meseta	Rionegro	7,28	-73,15	941
Cocal	Rionegro	7,27	-73,15	700
Los Cocos	Rionegro	7,23	-73,12	1.300
Palestina	Rionegro	7,32	-73,12	1.350
El Silencio	Rionegro	7,40	-73,22	1.120
Santa Rita	San Gil	6,58	-73,13	1.600
Casa de Teja	San Vicente de Chucurí	6,92	-73,45	960
Aguasblancas	San Vicente de Chucurí	6,83	-73,48	964
Alberto Santos	Socorro	6,50	-73,22	1.499
La Chapola	Socorro	6,45	-73,20	1.731
La Plazuela	Socorro	6,45	-73,23	1.672
Cielo Roto	Suaita	6,12	-73,37	1.504
El Mesón	Valle de San José	6,42	-73,15	1.330
Tolima				
Totarito	Alvarado	4,67	-75,02	1.250
Janiyof	Anzoátegui	4,63	-75,07	1.720
La Danta	Casabianca	5,10	-75,10	1.700
El Horizonte	Cunday	4,07	-74,60	1.270

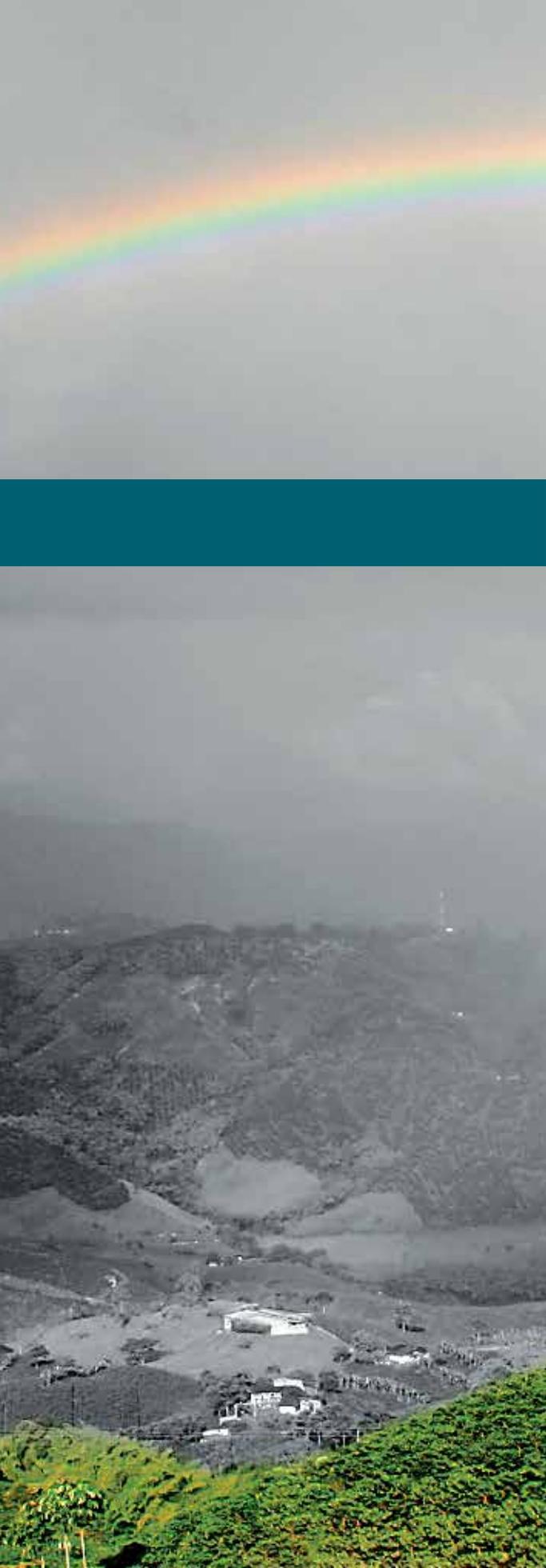
Continúa...

...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
La Montaña	Dolores	3,55	-74,90	1.260
El Campín	Dolores	3,60	-74,83	1.219
Palocabildo	Falan	5,13	-74,88	1.500
Tricontinental	Fresno	5,15	-75,00	1.269
La Cimarrona	Fresno	5,17	-75,00	1.400
La Esperanza	Ibagué	4,47	-75,27	1.353
Planes	Lérida	4,83	-75,00	1.223
El Edén	Líbano	4,97	-75,02	1.350
Granja La Unión	Líbano	4,92	-75,05	1.514
La Trinidad	Líbano	4,90	-75,03	1.456
La Granja	Melgar	4,17	-74,58	1.200
El Inciensial	Murillo	4,88	-75,13	2.400
El Recreo	Ortega	4,05	-75,30	1.504
Buenos Aires	Palocabildo	5,13	-75,02	1.410
El Rubí	Planadas	3,12	-75,67	1.725
Los Andes	Planadas	3,18	-75,62	1.400
La Aldea	Rovira	4,20	-75,23	1.550
La Meseta	San Antonio	3,92	-75,48	1.600
Santa Bárbara	Santa Isabel	4,77	-75,03	1.670
Guadualito	Santa Isabel	4,68	-75,08	1.620
Orisol	Valle de San Juan	4,18	-75,23	1.500
El Tucuy	Villarrica	3,97	-74,58	1.452
Luis Bustamante	Villarrica	3,90	-74,57	1.616
Valle del Cauca				
Arturo Gómez	Alcalá	4,67	-75,78	1.259
Bellavista	Ansermanuevo	4,75	-76,10	1.528
El Placer	Ansermanuevo	4,78	-76,07	1.744
Santiago Gutiérrez	Argelia	4,73	-76,12	1.530
Venecia	Caicedonia	4,33	-75,83	1.168
El Berrión	Cartago	4,67	-75,83	1.166
Santa Marta	El Águila	4,88	-76,05	1.764
Albán	El Cairo	4,78	-76,18	1.510
La Selva	Ginebra	3,75	-76,20	1.805
Campanella	Palmira	3,48	-76,20	1.550
Julio Fernández	Restrepo	3,82	-76,53	1.381
Heraclio Uribe	Sevilla	4,28	-75,92	1.540
La Sirena	Sevilla	4,28	-75,90	1.519
Manuel María Mallarino	Trujillo	4,22	-76,32	1.331
El Recreo	Ulloa	4,70	-75,73	1.421

A landscape photograph showing a volcanic landscape. In the foreground, there are green hills with rows of coffee plants. A dirt road winds through the coffee fields. In the middle ground, a dark, rocky volcanic slope rises. In the background, a large, dark volcanic cone is visible under a cloudy sky. A vibrant rainbow arches across the sky, starting from the left side and extending towards the right. The overall scene is a mix of natural beauty and volcanic activity.

La variabilidad climática en el trópico



La región tropical presenta condiciones que la distinguen de las demás regiones del mundo, es así como su vegetación, suelos, agricultura y desarrollo económico están directa o indirectamente relacionadas con las condiciones del clima.

Para entender las funciones ecológicas en los trópicos, deben definirse las características del Trópico (Vareschi citado por Lüttge, 1997):

Geodésicamente el Trópico está situado entre los 23,5° Norte (Trópico de Cáncer) y los 23,5° Sur (Trópico de Capricornio).

Ecogeográficamente los trópicos son zonas en las cuales los efectos de los ciclos día-noche son más importantes que los ciclos estacionales; los ciclos de temperatura día-noche son mucho mayores que en las zonas templadas; las variaciones anuales de la temperatura media son pocas en los trópicos.

Fitogeográficamente los trópicos están determinados por la distribución de las palmeras.

Biológicamente los trópicos son zonas de alta productividad biológica, con una fijación de carbono y una capacidad fotosintética superior a $600 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ lo cual globalmente corresponde a los bosques tropicales húmedos, en el más amplio sentido.

Climatológicamente los trópicos son zonas con similar longitud del día y la noche; ellas no siempre se caracterizan por altas temperatura y humedad; son dependientes de la altitud. En los trópicos pueden distinguirse áreas calientes y frías, y dependiendo de los regímenes de precipitación pueden diferenciarse trópicos húmedos y secos.

Entre las características de la región Tropical pueden citarse:

Uniformidad estacional. Los climas tropicales se caracterizan por la ausencia de una estación fría, las diferencias entre las estaciones son generalmente pequeñas. Esto puede ser demostrado por medio del rango

medio anual, las diferencias entre un mes y otro no son superiores a 4°C.

Uniformidad espacial. Para una misma localidad dentro de las condiciones tropicales la diferencia de temperatura anual es muy poca, como respuesta a la poca variación de la radiación solar recibida, en especial entre el Ecuador y los 10° de latitud Norte o Sur. Esta menor variación de la temperatura también se explica debido a que una gran superficie de la zona tropical está constituida por océanos, que son un gran depósito de calor.

Variaciones térmicas diarias. Para las condiciones tropicales las condiciones de temperatura están determinadas especialmente por los cambios térmicos del día y la noche.

Efecto de la altitud. En el Trópico la temperatura media del aire disminuye en cerca de 0,65°C por 100 m de aumento en la altitud.

Escalas para el estudio del clima

De acuerdo con los objetivos, los estudios del clima pueden realizarse en diferentes escalas en el espacio y en el tiempo; en general,

pueden considerarse cuatro aproximaciones (Figura 2):

Escala global, es la descripción del clima de todo el planeta, las interacciones con el sistema solar y con las variaciones regionales. En general, el clima global depende de la cantidad de energía solar recibida y de la cantidad de energía que queda en el sistema.

Escala macroclimática, se refiere al estudio del clima en grandes áreas, está determinado por factores tales como la latitud, las corrientes marinas, la altitud, el relieve, distancias desde el océano, grandes movimientos de masas de aire y otros. Por ejemplo, la Zona de Convergencia Intertropical, El Niño-La Niña-Oscilación del Sur, los ciclones tropicales. Estos fenómenos tienen gran importancia en las características climáticas y estacionales en diversas regiones del globo.

Escala mesoclimática, el clima se estudia en regiones más pequeñas y se hace énfasis en las condiciones fisiográficas de la región, por ejemplo, la altura sobre el nivel del mar, la pendiente del terreno, la proximidad a un valle, a una montaña, a cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses), presencia de áreas boscosas o de desierto, por la orientación de las vertientes con respecto a la exposición solar o a la dirección de los vientos. Las



Figura 2.
Escalas espaciales para el estudio del clima.

tempestades, circulaciones de valle-montaña son fenómenos asociados a las características fisiográficas de la región.

Escala microclimática, se refiere al clima de pequeñas áreas y está condicionado principalmente por la cobertura del terreno, por ejemplo, la influencia de una ciudad, de un embalse, de un bosque, la clase de cultivo, las distancias de siembra, la arquitectura de la planta, los efectos del sombrío y el riego.

La micrometeorología estudia la interacción de los mecanismos, los procesos y los estados que ocurren en el suelo, en la planta y en la atmósfera. En la agricultura tiene diferentes aplicaciones (Arya, 1988), como son:

- ♦ La determinación de los perfiles de la velocidad del viento, la temperatura, la humedad atmosférica y el dióxido de carbono dentro del cultivo.
- ♦ El conocimiento de los flujos de radiación solar y de energía dentro de las plantaciones.
- ♦ La predicción de la temperatura y la humedad en el suelo.
- ♦ La estimación de la evaporación y la evapotranspiración de las plantas.
- ♦ La determinación la actividad fotosintética e intercambio del CO₂ entre la planta y la atmósfera.
- ♦ La protección de los cultivos contra vientos fuertes y temperaturas extremas.

El tiempo y el clima en la región tropical y en Colombia se explican por la interacción de las influencias de los diferentes componentes de la variabilidad climática en la región tropical (Figura 3), entre las cuales se tienen: La Zona de Convergencia Intertropical, El Niño-La Niña -Oscilación del Sur, las Ondas de los Alisios (Huracanes del Atlántico y el Caribe), Oscilación Decadal del Pacífico, los sistemas atmosféricos de la Amazonia y las Oscilaciones Multidecadal y del Atlántico Norte, entre otros (Poveda, 2004; Montealegre, 2009).



Figura 3. Componentes de la variabilidad climática en la región Tropical.

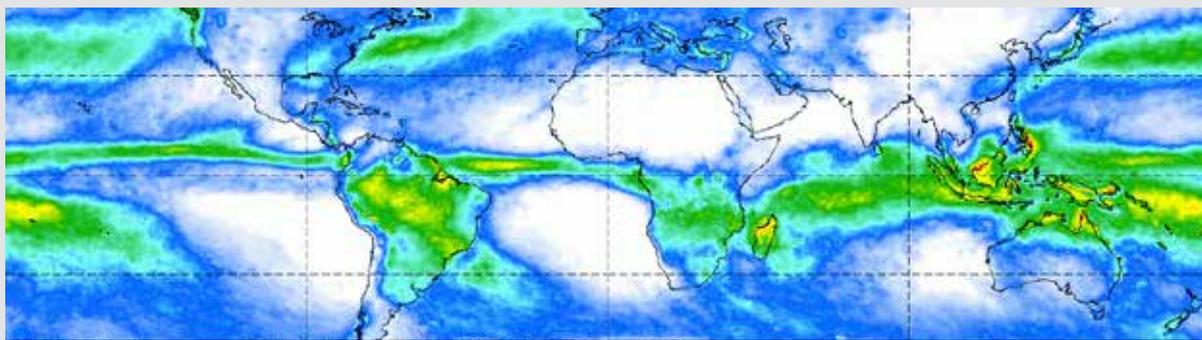
La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)

La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) está definida como una banda zonal de vigorosa convección, que se manifiesta por el desarrollo de cúmulos, ampliamente confirmado mediante el uso de las imágenes de satélite, y señala la convergencia entre el aire de los hemisferios Norte y Sur. En la ZCIT los vientos Alisios del Noreste, que se originan como un flujo alrededor de las altas presiones del Atlántico Norte, se reúnen con los vientos Alisios del Sureste, generados como un flujo alrededor de las altas presiones del Pacífico Sur y Atlántico Sur (León *et al.*, 2000).

El comportamiento de la precipitación en el transcurso del año está determinado por el movimiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical –ZCIT– (Figura 4), la cual puede describirse como una franja de nubes, con abundantes lluvias; las regiones



Figura 4.
Zona de
Convergencia
Intertropical.



que no están bajo la influencia de la ZCIT presentan buen tiempo, soleado y seco.

El movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical en Colombia determina la ocurrencia de los períodos secos y húmedos durante el año. En la Figura 5, se observan los meses secos y húmedos en las diferentes regiones cafeteras de Colombia.

Los patrones de lluvia de la región Andina se relacionan con la influencia de los vientos

Alisios que ingresan por el Atlántico, de las masas de aire que provienen del océano Pacífico y por los aportes de humedad procedentes de la cuenca del Amazonas.

El comportamiento general de la distribución intra-anual de la precipitación en la región Andina de Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de dos períodos secos y dos lluviosos en el año, determinados principalmente por el movimiento latitudinal de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la



Figura 5.
Patrones de distribución de la lluvia
en la zona cafetera.

cual condiciona el tiempo de alta nubosidad y gran cantidad de lluvia.

En la Zona Cafetera Norte (mayor de 7° de latitud Norte) y en la vertiente Oriental, de la cordillera Oriental, se presenta un período seco pronunciado de diciembre a marzo (o abril) y un período húmedo de mayo a noviembre, con una ligera disminución en julio; esta situación se registra en los departamentos de Cesar, Magdalena, Santander, Norte de Santander, Arauca, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.

En la Zona Cafetera Central (latitudes entre 3° a 7° Norte) se presentan dos períodos lluviosos: marzo - junio y septiembre - diciembre, y dos períodos menos lluviosos: enero - febrero y julio - agosto; esta condición puede observarse en los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío.

En la Zona Cafetera Sur (latitudes inferiores a 3° Norte) ocurre un período seco muy definido desde mediados de junio a mediados de septiembre y un período húmedo de octubre a junio; como ejemplos se tienen los departamentos de Cauca y Nariño.

El Niño - La Niña - Oscilación del Sur

Los pescadores peruanos y ecuatorianos han observado los cambios en la temperatura y dirección de las corrientes de las aguas costeras del océano Pacífico. Tales cambios producen alteraciones del ciclo de las lluvias y afectan la pesca en las costas de Suramérica. A este fenómeno lo llamaron “El Niño” (relacionado con la época de Navidad). Más tarde se lo denominó El Niño-La Niña-Oscilación del Sur (ENOS), por las fluctuaciones periódicas que se registran en la presión atmosférica superficial en dos lugares del Pacífico Sur, Darwin en Australia y en la isla de Tahití, antes del calentamiento o enfriamiento gradual del Pacífico ecuatorial (Arntz y Fahrbach, 1996; Ideam, 1998; Philnder, 1990; Trenberth, 1997; Wallace y Vogel, 1994).

Entre las posibles causas del origen de los eventos de El Niño y La Niña se han planteado la rotación terrestre, los volcanes, la sismicidad (Mesa, 2002) y el Ciclo Nodal Lunar (Molion, 2017).

Para el estudio de El Niño-La Niña-Oscilación del Sur (ENOS) se han seleccionado regiones del océano Pacífico ecuatorial conocidas como Niño1 (Frente a la costa del Perú), Niño2 (Frente a la costa del Ecuador), Niño3 (Longitud 90° a 150° Oeste), Niño4 (longitud 150° Oeste a 160° Este). Las condiciones de la temperatura superficial de la región Niño3.4 (Longitud 120° a 170° Oeste) suministran la información para el pronóstico de las condiciones de El Niño-La Niña (Figura 6).

Condiciones normales en el océano Pacífico

En el océano Pacífico ecuatorial, en su condición normal o neutral (Figura 7), los vientos Alisios se desplazan desde las costas de Suramérica hacia el continente asiático. Este movimiento de grandes masas atmosféricas mantiene las aguas superficiales calientes en las costas de Australia, Indonesia y Filipinas. Como consecuencia, en Asia, el aire es húmedo y caliente, la presión atmosférica es baja

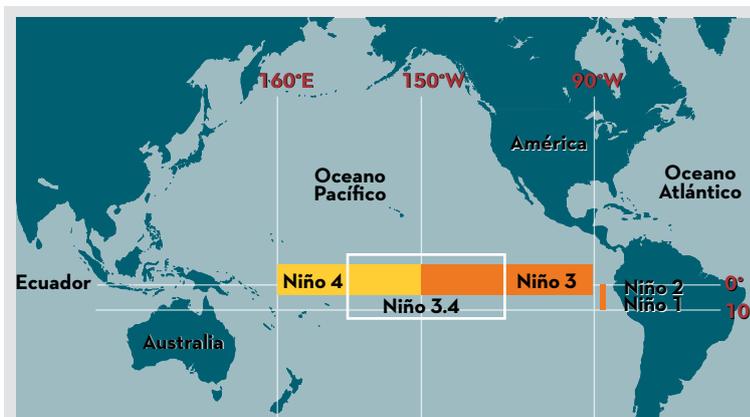
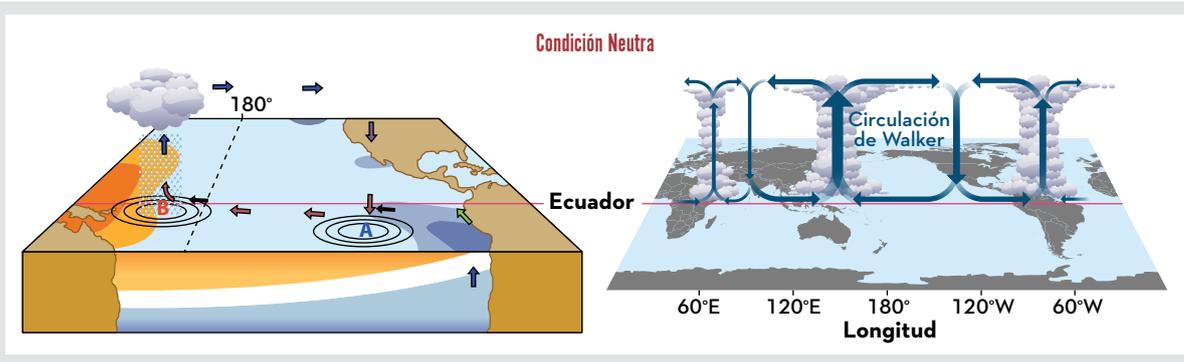


Figura 6. Regiones de estudio de El Niño-La Niña.

Figura 7.

Condición normal o neutra en la temperatura del agua en la superficie del océano Pacífico.



y la temperatura del agua es alta; estas condiciones originan abundantes lluvias en la Polinesia ecuatorial, el Sureste asiático y parte de China y Japón. Simultáneamente, en la costa del Sur de Ecuador, la costa peruana y buena parte de la costa chilena, el aire es frío y seco, la presión atmosférica es alta y la temperatura oceánica superficial es menor que en la costa asiática, como resultado, gran parte de la costa pacífica en Suramérica es relativamente seca (Arntz y Fahrbach, 1996; Ideam, 1998; Trenberth, 1997; Wallace y Vogel, 1994).

Condiciones del océano Pacífico durante El Niño

Durante el desarrollo de El Niño (Figura 8) se identifican cuatro fases: Inicio, desarrollo, madurez y debilitamiento. La fase inicial corresponde al desplazamiento de aguas cálidas desde el Sureste de Asia y Polinesia ecuatorial hacia el centro del océano Pacífico, debido a la disminución en la intensidad de los vientos Alisios que soplan desde el Oriente hacia el Occidente; en la fase de desarrollo las aguas cálidas se desplazan desde Asia hacia Suramérica; en la fase de madurez ocurre el máximo calentamiento frente a las costas de Perú, Ecuador y Colombia y, por último, en la fase de debilitamiento se va retornando a la normalidad, en la cual los vientos Alisios empiezan a recuperar su intensidad y la temperatura de las aguas superficiales

comienza a disminuir. Estas condiciones originan lluvias intensas en Ecuador y Perú, y sequías en algunas regiones del continente asiático, en África y Australia (Arntz y Fahrbach, 1996; Henríquez, 1996; Ideam, 1998; Trenberth, 1997; Wallace y Vogel, 1994).

Para que se considere una condición de El Niño, la temperatura del océano debe estar al menos 0,5°C por encima de la temperatura media normal, durante cinco trimestres consecutivos. La desviación por encima o por debajo del valor promedio de la temperatura en la superficie del océano se conoce como Índice Oceánico de El Niño (ONI), el cual permite conocer en qué condición de temperatura se encuentra cada punto del océano en un momento dado.

El Niño en Colombia

El régimen de lluvias por el efecto de El Niño no sigue un patrón común, ni ha tenido las mismas características en los últimos eventos. En términos generales, se ha podido identificar una deficiencia moderada de la precipitación entre el 20% y el 40% en los volúmenes mensuales en la región Caribe y la mayor parte de la región Andina, especialmente en Nariño, Valle del Cauca, Norte del Huila, Occidente de Antioquia, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Santander y la región del Catatumbo. Estas deficiencias son de carácter severo (superiores al 40%) en La Guajira, parte media del litoral Caribe, Norte de Córdoba, sector central de Sucre, altiplano de Cundinamarca-Boyacá (Ideam, 2005).

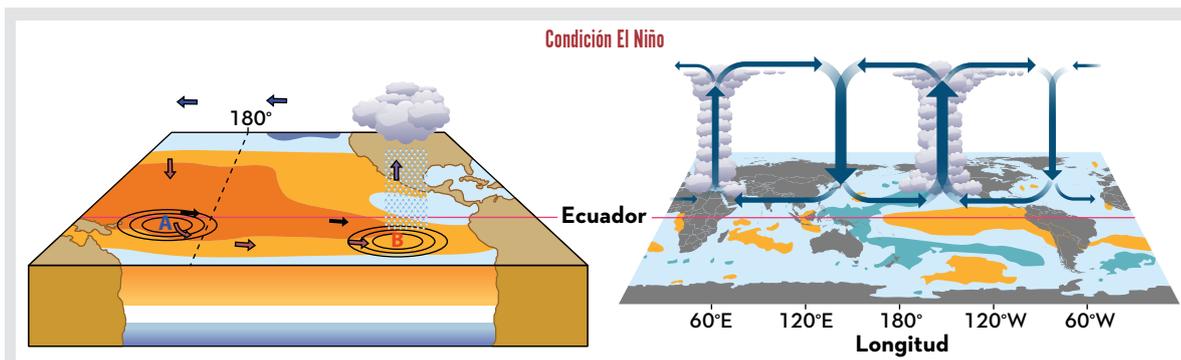


Figura 8. Condición del océano Pacífico durante El Niño. Se observa el calentamiento en la superficie del océano Pacífico ecuatorial.

En Colombia, El Niño produce efectos con duraciones hasta tres años consecutivos. A mediados del primer año, se registran excesos de lluvia en los Llanos Orientales y deficiencias de precipitación en la región Andina y en la Costa Atlántica. Durante el segundo año, en la fase activa de El Niño, la deficiencia de lluvia se generaliza en la región Andina y en la Costa Atlántica. En el tercer año (fase final), las lluvias tienden a niveles superiores al normal.

La influencia de El Niño es evidente sobre los ecosistemas marinos (menores poblaciones de fitoplancton y zooplancton, menor volumen de pesca), los ecosistemas terrestres (incendios forestales, déficit de humedad en el suelo, deslizamientos), el transporte fluvial (inmovilización de embarcaciones), el sector hidroenergético (disminución del nivel de los embalses), sobre el agua para consumo humano (racionamiento, desabastecimientos) y la salud de la población (aumenta la tasa de enfermedades tropicales como la malaria, fiebre amarilla, cólera y dengue) (Henríquez, 1996; Ideam, 1998; Jaramillo 2005; Poveda y Jaramillo, 2000; Poveda *et al.*, 2000, 2001, 2002).

El Niño en la zona cafetera

La incidencia de El Niño en la zona cafetera de Colombia está asociada principalmente a la deficiencia hídrica en el suelo y a sus efectos sobre el cultivo del café.

Los efectos de El Niño sobre la zona cafetera no pueden generalizarse; es así como en

algunas regiones con bajo brillo solar y altas precipitaciones su efecto es benéfico para la producción de café, por los incrementos en el brillo solar. En otras regiones puede ejercer una acción perjudicial, por ejemplo, en zonas cálidas con suelos de baja retención de humedad y en regiones con lluvias menores a 1.500 mm al año.

En la región cafetera de Colombia se ha observado que cuando se presenta El Niño disminuyen las cantidades de lluvia, especialmente durante los meses de diciembre, enero, febrero, junio, julio y agosto.

Para la zona cafetera durante los eventos de El Niño calificados como fuertes, 1991/92, 1997/98 y 2015/16, la disminución promedio de la lluvia anual fue de un 22% con valores extremos que variaron entre el 9% y el 35%. Durante los eventos de El Niño calificados como fuertes, para la zona cafetera la disminución promedio de la lluvia anual fue de 20% (1982/1983), 25% (1991/1992), 13% (1997/1998) y 29% (2015/2016) con valores extremos de 53% (Chinácota-Blonay-Norte de Santander), 27% (Blonay, Norte de Santander) y 46% (F. Romero, Salazar, Norte de Santander). Como puede observarse El Niño 2015/16 fue el más fuerte de los analizados en donde se registró la mayor disminución en la lluvia (Tabla 2).

Asociados al evento de El Niño se presentan aumentos en el brillo solar y en la temperatura máxima del aire (Tablas 3 y 4).

Tabla 2.

Disminución anual de la lluvia (%) durante eventos fuertes de El Niño en diferentes regiones de la zona cafetera.

Departamento	Municipio	Estación	Lluvia media (mm)	JL82-JN83	JL91-JN92	JL97-JN98	JL15-JN16	Media
Antioquia	Venecia	El Rosario	2.635	15	31	20	35	25
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.996	14	23	5	10	13
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	2.574	28	22	22	28	25
Caldas	Chinchiná	Naranjal	2.805	30	25	20	15	22
Caldas	Manizales	Agronomía	1.923	23	36	20	41	30
Caldas	Palestina	Santágueda	2.289	27	33	21	33	28
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	2.049	38	18	2	34	23
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	2.049	27	11	19	40	24
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas de Sta Inés	1.532	22	32	2	32	22
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.115	28	25	18	22	23
Cundinamarca	Yacopí	Montelíbano	2.748	14	24	0	14	13
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.337	26	16	0	20	15
N. de Santander	Chinácota	Blonay	1.481	37	53	27	43	40
N. de Santander	Salazar	Fco Romero	2.685	19	33	21	46	30
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.435	31	25	16	32	26
Nariño	La Unión	El Sauce	1.874	11	20	0	31	15
Quindío	Buenavista	Paraguaquito	2.169	20	31	17	28	24
Quindío	Calarcá	La Bella	2.197	24	13	22	42	25
Quindío	Montenegro	El Agrado	2.145	14	30	12	23	20
Quindío	Quimbaya	Maracay	2.457	17	25	2	42	22
Risaralda	Guática	Ospirma	1.737	14	26	16	19	19
Risaralda	Pereira	Planta de T	2.696	12	20	11	9	13
Risaralda	Sta. Rosa de C.	El Jazmín	2.674	27	22	11	22	20
Santander	S. Vicente de Ch.	Aguasblancas	1.919	7	12	12	8	10
Tolima	Libano	La Trinidad	2.192	15	20	20	33	22
Valle	Alcalá	Arturo Gómez	2.018	22	19	7	32	20
Valle	El Cairo	Albán	1.504	16	9	24	31	20
Valle	Ginebra	La Selva	1.664	18	20	3	40	20
Valle	Restrepo	Julio Fernández	1.093	0	33	10	32	19
Valle	Trujillo	M. M. Mallarino	1.749	14	36	9	27	21
			Media	20	25	13	29	22
			V. máximo	38	53	27	46	41
			V. mínimo	0	9	0	8	4

Tabla 3.

Aumento anual del brillo solar (%) durante eventos fuertes de El Niño en diferentes regiones de la zona cafetera.

Departamento	Municipio	Estación	Brillo solar Media (h)	JL91-JN92	JL97-JN98	JL15-Jn16	Media
Antioquia	Venecia	El Rosario	1.978	6	6	8	7
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.827	5	3	1	3
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	1.665	6	0	-6	0
Caldas	Chinchiná	Naranjal	1.690	1	7	3	3
Caldas	Manizales	Agronomía	1.437	5	4	3	4
Caldas	Palestina	Granja Luker	1.960	8	-2	-6	0
Caldas	Palestina	Santágueda	1.957	3	2	-2	1
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	1.739	5	7	-2	3
Cesar	Valledupar	Pueblo Bello	2.311	-2	3	2	1
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas de Sta Inés	1.434	16	12	1	10
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.439	3	7	-6	2
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.167	5	-2	2	2
N. de Santander	Chinácota	Blonay	1.411	4	9	4	6
N. de Santander	Convención	Gabriel M. Barriga	1.444	4	23	12	13
N. de Santander	Salazar	Francisco Romero	1.475	5	12	13	10
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.660	5	4	-7	0
Nariño	La Unión	El Sauce	1.635	0	10	1	3
Quindío	Buenavista	Paraguaicito	1.671	-1	5	5	3
Quindío	Calarcá	La Bella	1.376	10	14	13	12
Quindío	Montenegro	El Agrado	1.671	0	8	9	6
Quindío	Quimbaya	Maracay	1.588	1	11	6	6
Risaralda	Pereira	El Cedral	898	16	19	2	12
Risaralda	Pereira	La Catalina	1.633	2	9	7	6
Risaralda	Sta Rosa de C.	El Jazmín	1.375	2	7	4	4
Santander	San Vicente de Ch.	Aguasblancas	1.460	-2	4	1	1
Tolima	Líbano	La Trinidad	1.547	5	7	10	7
Valle	Alcalá	Arturo Gómez	1.734	-3	9	-1	2
Valle	El Cairo	Albán	1.535	6	9	7	7
Valle	Ginebra	La Selva	1.144	8	18	9	12
Valle	Restrepo	Julio Fernández	1.649	7	2	-13	-1
Valle	Trujillo	M. M. Mallarino	1.558	0	12	-2	3
			Media	4	8	3	5
			V. máximo	16	23	13	13
			V. mínimo	-3	-2	-13	-1

Tabla 4.

Aumento anual de la temperatura máxima (°C) durante eventos fuertes de El Niño.

Departamento	Municipio	Estación	Altitud (m)	1991-1992	1997-1998	2015-2016	Media
Antioquia	Venecia	El Rosario	1.635	0,8	1,9	1,8	1,5
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.677	0,6	1,4	1,3	1,1
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	1.310	0,0	1,3	2,1	1,1
Caldas	Chinchiná	Naranjal	1.381	0,5	1,2	0,7	0,8
Caldas	Manizales	Agronomía	2.088	0,0	1,6	1,0	0,9
Caldas	Palestina	Granja Luker	1.031	0,6	1,2	1,5	1,1
Caldas	Palestina	Santágueda	1.026	0,2	1,8	1,2	1,1
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	1.735	0,2	1,6	2,1	1,3
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	0,2	0,8	1,2	0,7
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas Sta Inés	1.340	0,1	1,6	1,6	1,1
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.538	-0,1	1,1	1,2	0,7
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.420	0,4	1,6	1,5	1,2
N. de Santander	Chinácota	Blonay	1.250	0,6	1,5	1,7	1,3
N. de Santander	Convención	Gabriel M Barriga	1.261	0,6	1,8	0,5	1,0
N. de Santander	Salazar	Francisco Romero	903	0,6	1,5	1,5	1,2
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.603	0,5	2,2	2,3	1,7
Quindío	Buenavista	Paraguaicito	1.203	0,1	1,6	1,0	0,9
Quindío	Calarcá	La Bella	1.449	-0,1	1,0	1,7	0,8
Quindío	Montenegro	El Agrado	1.275	1,0	1,4	1,4	1,3
Quindío	Quimbaya	Maracay	1.402	0,2	1,1	1,4	0,9
Risaralda	Pereira	La Catalina	1.321	0,5	1,0	1,6	1,0
Risaralda	S. Rosa de C.	El Jazmín	1.635	1,4	1,2	1,1	1,2
Tolima	Libano	La Trinidad	1.456	0,3	0,7	1,3	0,8
Valle	Alcalá	Arturo Gómez	1.259	0,6	1,3	2,5	1,4
Valle	El Cairo	Albán	1.510	0,5	1,6	1,3	1,1
Valle	Restrepo	Julio Fernández	1.381	0,2	1,4	1,7	1,1
Valle	Trujillo	M. M. Mallarino	1.331	0,4	1,6	1,6	1,2
			Media	0,4	1,4	1,5	1,1
			V. máximo	1,4	2,2	2,5	1,5
			V. mínimo	-0,1	0,7	0,5	0,7

Condiciones del océano Pacífico durante La Niña

Durante La Niña pueden identificarse cuatro fases: inicio, desarrollo, madurez y debilitamiento o retorno a la normalidad. Durante la fase inicial

se observa un significativo fortalecimiento de los vientos Alisios del Este y una intensificación de la surgencia (movimiento del agua desde la profundidad hacia la superficie) frente a las costas de Ecuador y Perú, la cual genera una fuente de agua fría en la superficie, que posteriormente se propaga hacia el Occidente. En la fase de desarrollo las aguas frías se desplazan desde la costa Suramérica hacia el Occidente y

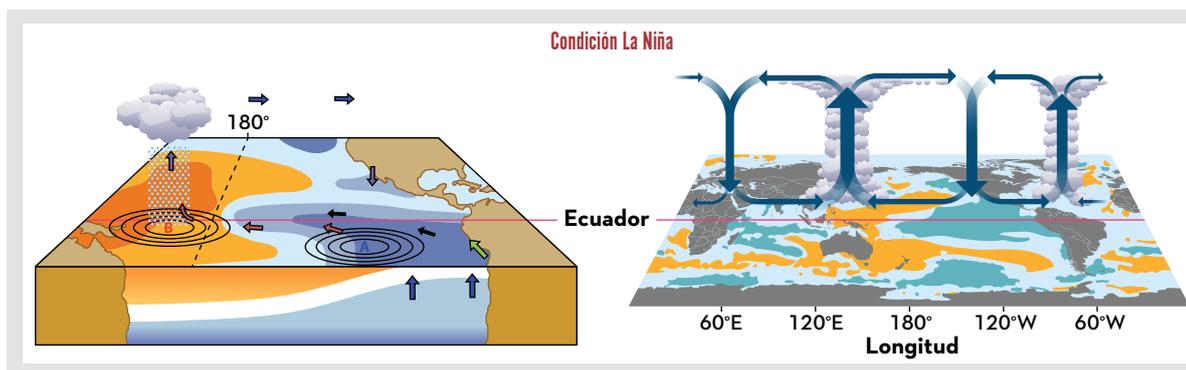


Figura 9. Condición del océano Pacífico durante La Niña. Se observa el enfriamiento (azul) en la superficie del océano Pacífico ecuatorial.

cubren el Pacífico tropical oriental y central. En la fase de madurez los vientos Alisios soplan con mayor intensidad en la mayor parte del Pacífico tropical y se presenta el máximo enfriamiento en los sectores central y oriental del Pacífico tropical (Figura 9); en la fase de debilitamiento o de retorno a condiciones normales se aprecia una disminución en la intensidad de los vientos Alisios y las aguas cálidas nuevamente fluyen desde el Occidente (Arntz y Fahrbach, 1996; Henríquez, 1996; Ideam, 1998; Trenberth, 1997; Wallace y Vogel, 1994).

Para considerar una condición de La Niña la temperatura del océano Pacífico debe estar al menos 0,5°C por debajo de la temperatura media normal, durante cinco trimestres consecutivos.

La Niña en Colombia

El evento de La Niña en Colombia genera incrementos en las lluvias, con valores entre 20% y 40% por encima de los valores esperados, los cuales ocurren en forma muy localizada en áreas del Nororiente, Centro y Sur de la región Andina y el Nororiente de la región Caribe. Se presentan núcleos muy puntuales con excedentes de lluvia severos (mayores del 40%) en La Guajira, Norte del Magdalena, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca y un sector entre Tolima y Valle.

La Niña en la zona cafetera

Los efectos de La Niña sobre la zona cafetera no pueden generalizarse, es así como en regiones con baja lluvia anual (menor a los 1.500 mm), el aumento en las cantidades

de lluvia favorece el desarrollo y crecimiento de los cultivos, entre ellos el café. En las regiones donde normalmente se presentan altas cantidades de lluvia anual (mayor a los 2.500 mm) los excedentes de lluvia y la disminución del brillo solar pueden ejercer una acción perjudicial en la producción de café y, adicionalmente, un aumento en la incidencia y la severidad de las enfermedades.

Para la zona cafetera eventos de La Niña fuertes se registraron en los años 1999/2000, 2007/2008 y 2010/2011, con aumentos de la lluvia anual promedio de 82%, 22% y 41%, respectivamente, y promedio general de 48%, con valores extremos entre el 24% y el 81%. El evento más fuerte de La Niña se registró en el período 1999/2000 con un aumento promedio de la lluvia anual del 82%, con valores extremos entre 31% en la estación Bertha en Moniquirá-Boyacá, y 147% en La Catalina en Pereira-Risaralda (Tabla 5).

Durante los eventos fuertes de La Niña en la zona cafetera se presentan disminuciones anuales en el brillo solar y en la temperatura máxima del aire (Tablas 6 y 7). La disminución registrada en el brillo solar durante los eventos fuertes de La Niña presentó un valor medio de 12%, con valores extremos entre 3% en La Cristalina en Támesis-Antioquia, Bertha en Moniquirá-Boyacá y Jorge Villamil en Gigante-Huila y 23% en El Jazmín en Pereira-Risaralda. El evento más intenso se registró en el 2010-2011, con una disminución promedio del 18% y valores extremos de 28% en El Jazmín en Pereira-Risaralda y del 9% en la estación F. Romero en Salazar-Norte de Santander.

Tabla 5.

Aumento anual de la lluvia (%) durante eventos fuertes de La Niña en la zona cafetera.

Departamento	Municipio	Estación	Lluvia anual media mm	JL99/ JN00	JL07/ JN08	JL10/ JN11	Media
Antioquia	Cocorná	Cocorná	4.835				34
Antioquia	Támesis	La Cristalina	2.313	80	39	53	57
Antioquia	Venecia	El Rosario	2.635	97	47	63	69
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.996	31	13	26	24
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	2.574	85	36	37	53
Caldas	Chinchiná	La Romelia	2.811	89	22	35	49
Caldas	Chinchiná	Naranjal	2.805	76	33	41	50
Caldas	Manizales	Agronomía	1.923	143	47	53	81
Caldas	Manizales	Planalto	2.618	38	30	34	34
Caldas	Palestina	Granja Luker	2.282	132	36	38	69
Caldas	Palestina	La Palma	2.720	82	19	30	44
Caldas	Palestina	Santágueda	2.289	115	36	35	62
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	2.049	101	35	42	60
Cauca	Piendamó	La Trinidad	2.108	55	32	17	35
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	2.049	57	6	25	29
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas de Sta Inés	1.532	64	15	29	36
Cundinamarca	Mesitas del C.	Misiones	1.430	46	39	38	41
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.115	47	22	55	41
Cundinamarca	Yacopí	Montelíbano	2.748	53	7	34	31
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.337	88	1	47	45
N. De Santander	Chinácota	Blonay	1.481	51	-13	90	43
N. De Santander	Convención	Gabriel M. Barriga	1.207	71	-8	87	50
N. De Santander	Salazar	Francisco Romero	2.685	43	-17	81	36
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.435	122	8	27	52
Nariño	La Unión	El Sauce	1.874	80	20	28	43
Quindío	Buenavista	Paraguaicito	2.169	115	44	48	69
Quindío	Calarcá	La Bella	2.197	44	36	68	49
Quindío	Montenegro	El Agrado	2.145	103	30	48	60
Quindío	Quimbaya	Maracay	2.457	115	30	34	60
Risaralda	Belén de Umbría	La Elvira	2.413	74	41	56	57
Risaralda	Guática	Ospirma	1.737	65	23	32	40
Risaralda	Pereira	El Cedral	2.662	80	-4	47	41
Risaralda	Pereira	La Catalina	2.211	147	39	33	73
Risaralda	Pereira	Planta de T	2.696	59	17	15	31
Risaralda	Sta Rosa de C.	El Jazmín	2.674	84	30	43	53
Santander	Floridablanca	San Antonio	1.530	71	8	62	47
Santander	Socorro	Alberto Santos	1.617	52	-5	63	36
Santander	S Vicente de Ch.	Aguasblancas	1.919	81	11	48	47

Continúa...

...continuación

Departamento	Municipio	Estación	Lluvia anual media mm	JL99/ JN00	JL07/ JN08	JL10/ JN11	Media
Tolima	Ibagué	La Trinidad	2.013	131	19	-21	43
Tolima	Líbano	Arturo Gómez	2.192	57	20	34	37
Valle	Alcalá	Santiago Gutiérrez	2.018	107	37	53	66
Valle	Argelia	Albán	1.435	72	15	36	41
Valle	El Cairo	La Selva	1.504	95	24	47	55
Valle	Ginebra	Julio Fernández	1.664	83	15	23	40
Valle	Restrepo	La Sirena	1.093	88	8	22	39
Valle	Sevilla	M. M. Mallarino	2.149	107	23	39	56
Valle	Trujillo	El Recreo	1.749	77	31	60	56
Valle	Ulloa	Ulloa	2.316	110	29	31	57
			Media	82	22	41	48
			V. mínimo	31	-17	-21	24
			V. máximo	147	47	90	81

Los eventos de El Niño y La Niña ocurridos desde 1870

Al revisar la historia de los eventos de El Niño y La Niña desde 1870 hasta el 2016, los eventos más fuertes de El Niño se registraron en 1877-78, 1988-89, 1982-83, 1997-98, 2015-16 y de La Niña en los años 1892-93, 1916-17, 1973-74, 1975-76, 1988-89 (Tabla 8).

De estos eventos se destaca El Niño 1877-1878 con un gran impacto global, el cual generó hambruna para cerca de 20 millones de personas en el Asia, Sureste asiático y África, causando una fuerte disminución de las lluvias en los Andes de Suramérica incluida la región andina de Colombia (Aceituno *et al.*, 2009).

El Niño-La Niña Modoki

Modoki es una palabra japonesa que significa “orígenes similares y efectos diferentes”, “similar

pero diferente”. El nombre “El Niño Modoki” fue utilizado por el profesor Yamagata en 2007, del Programa de Investigación de Variaciones Climáticas del *Research Institute for Global Change* de Japón (Ashok *et al.*, 2007).

El Niño-La Niña Modoki aparece como el segundo evento dominante de variabilidad interanual en el Pacífico tropical. El Niño Modoki se asocia con un fuerte calentamiento anómalo en el Pacífico tropical central y el enfriamiento en el Pacífico tropical Oriental y Occidental (Figura 10). Asociadas a estos distintos patrones de calentamiento y enfriamiento, las teleconexiones son muy diferentes de los patrones de El Niño convencional. El Niño Modoki aumenta la probabilidad de formación de huracanes en el Caribe.

Ondas de los Alisios

Son ondas atmosféricas con circulación ciclónica sobrepuestas a los vientos del Este las cuales se desplazan desde el Occidente de África hacia el Atlántico, con un período entre 4 a 8 días y una longitud de onda de 2.000 km. Las ondas tropicales del Este constituyen la génesis de los huracanes sobre el Atlántico Norte y el mar Caribe (León *et al.*, 2001, Riehl, 1954).



Tabla 6.

Disminución anual del brillo solar (%) durante eventos fuertes de La Niña en la zona cafetera.

Departamento	Municipio	Estación	Brillo solar media (h)	JL99/JN00	JL07/JN08	JL10/JN11	Media
Antioquia	Támesis	La Cristalina	2.161	5	-4	9	3
Antioquia	Venecia	El Rosario	1.978	14	4	20	12
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.827	5	-9	12	3
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	1.665	15	11	22	16
Caldas	Chinchiná	Naranjal	1.690	12	6	19	13
Caldas	Manizales	Agronomía	1.437	20	4	20	15
Caldas	Palestina	Granja Luker	1.960	8	4	16	9
Caldas	Palestina	Santágueda	1.957	7	0	10	6
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	1.739	16	12	20	16
Cauca	Piendamó	La Trinidad	1.560	15	11	21	16
Cesar	Valledupar	Pueblo Bello	2.311	1	0	15	5
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas de Sta I.	1.434	7	14	18	13
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.439	9	9	23	14
Cundinamarca	Yacopí	Montelíbano	1.663	15	-1	12	9
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.167	4	-4	10	3
N de Santander	Chinácota	Blonay	1.411	13	5	18	12
N de Santander	Convención	Gabriel M. Barriga	1.444	11	7	13	10
N de Santander	Salazar	Francisco Romero	1.475	8	3	9	7
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.660	13	17	14	15
Nariño	La Unión	El Sauce	1.635	16	12	13	14
Quindío	Buenavista	Paraguacito	1.671	17	4	19	13
Quindío	Montenegro	El Agrado	1.671	14	2	12	9
Quindío	Quimbaya	Maracay	1.588	18	6	19	14
Risaralda	Belén de U	La Elvira	1.429	17	7	23	15
Risaralda	Pereira	La Catalina	1.633	17	3	22	14
Risaralda	Sta Rosa de Cabal	El Jazmín	1.375	25	16	28	23
Santander	Floridablanca	San Antonio	1.325	13	3	21	12
Santander	Socorro	Alberto Santos	2.248	7	0	14	7
Santander	San Vicente de Ch.	Aguasblancas	1.460	11	-7	15	6
Tolima	Líbano	La Trinidad	1.547	14	6	22	14
Valle	Alcalá	Arturo Gómez	1.734	13	7	12	11
Valle	El Cairo	Albán	1.535	18	3	21	14
Valle	Ginebra	La Selva	1.144	24	20	23	22
Valle	Restrepo	Julio Fernández	1.649	12	10	25	16
Valle	Sevilla	La Sirena	1.322	14	11	21	16
Valle	Trujillo	M M. Mallarino	1.558	21	10	22	18
			Media	13	6	18	12
			V. máximo	25	20	28	23
			V. mínimo	1	-9	9	3

Tabla 7.

Disminución anual de temperatura máxima (°C) durante eventos fuertes de La Niña en la zona cafetera.

Departamento	Municipio	Estación	Altitud (m)	JL99/ JN00	JL07/ JN08	JL10/ JN11	Media
Antioquia	Bolívar	El Trapiche	1.277	-0,8	-0,9	-1,4	-1,0
Antioquia	Cocorná	Cocorná	1.344	-0,6	-0,2	-0,7	-0,4
Antioquia	Jardín	Miguel Valencia	1.621	0,0	-0,1	-0,8	-0,3
Antioquia	Támesis	La Cristalina	775	-1,3	-0,4	-0,8	-0,9
Antioquia	Támesis	Virgen de Oro	1.656	-0,9	-1,1	-1,6	-1,2
Antioquia	Venecia	El Rosario	1.635	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7
Boyacá	Moniquirá	Bertha	1.677	-0,6	-0,1	-0,8	-0,5
Caldas	Chinchiná	Cenicafé	1.310	-0,8	-0,1	-0,5	-0,5
Caldas	Chinchiná	Naranjal	1.381	-0,6	-0,4	-0,9	-0,7
Caldas	Manizales	Planalto	1.413	-0,9	-0,3	-0,7	-0,6
Caldas	Palestina	Granja Luker	1.031	-0,4	-0,6	-0,7	-0,6
Caldas	Palestina	Santágueda	1.026	-0,4	-0,8	-1,2	-0,8
Cauca	El Tambo	Manuel Mejía	1.735	-0,8	-0,8	-0,4	-0,7
Cauca	Piendamó	La Trinidad	1.671	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0
Cesar	Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	-0,7	-0,5	-1,3	-0,8
Cundinamarca	Cachipay	Mesitas Sta Inés	1.340	-0,6	-0,7	-0,5	-0,6
Cundinamarca	El Peñón	Santa Rosita	1.437	-0,4	-0,9	-0,5	-0,6
Cundinamarca	Mesitas del C.	Misiones	1.540	-1,1	-0,2	-0,8	-0,7
Cundinamarca	Tibacuy	Granja Tibacuy	1.538	-0,4	-0,1	-0,7	-0,4
Cundinamarca	Yacopí	Montelíbano	1.365	-0,9	0,1	-0,9	-0,6
Huila	Gigante	Jorge Villamil	1.420	-0,2	0,1	0,2	0,1
N. De Santander	Chinácota	Blonay	1.250	-1,0	-0,6	-0,8	-0,8
N. De Santander	Convención	Gabriel M Barriga	1.261	-0,3	-0,8	-0,8	-0,6
N. De Santander	Salazar	Francisco Romero	903	-0,7	-0,2	-0,5	-0,5
Nariño	Consacá	Ospina Pérez	1.603	-0,7	-1,0	-0,5	-0,7
Nariño	La Unión	El Sauce	1.609	-1,4	-1,4	-1,2	-1,3
Quindío	Buenavista	Paraguacito	1.203	-0,9	-0,6	-0,7	-0,8
Quindío	Calarcá	La Bella	1.449	-0,9	-0,8	-0,7	-0,8
Quindío	Montenegro	El Agrado	1.275	-0,9	-0,8	-1,2	-1,0
Quindío	Quimbaya	Maracay	1.402	-1,1	-0,1	-0,6	-0,6
Risaralda	Pereira	El Pílamo	1.113	-1,0	-0,6	-0,9	-0,8
Risaralda	Pereira	La Catalina	1.321	-1,0	-0,4	-0,6	-0,7
Risaralda	Sata Rosa de C.	El Jazmín	1.635	-1,1	-0,8	-1,2	-1,0
Santander	Floridablanca	San Antonio	1.539	-0,8	-0,5	-0,9	-0,7
Santander	Socorro	Alberto Santos	1.499	-0,6	-0,9	-1,6	-1,0
Tolima	Libano	La Trinidad	1.456	-0,4	0,1	-0,8	-0,4
Valle	Alcalá	Arturo Gómez	1.259	-0,6	-0,3	-0,2	-0,4
Valle	Caicedonia	Venecia	1.168	-1,1	-0,1	-0,9	-0,7

Continúa...

...continuación

Departamento	Municipio	Estación	Altitud (m)	JL99/ JN00	JL07/ JN08	JL10/ JN11	Media
Valle	El Cairo	Albán	1.510	-0,9	-0,9	-0,7	-0,8
Valle	Restrepo	Julio Fernández	1.381	-0,7	-0,4	-0,6	-0,6
Valle	Sevilla	La Sirena	1.519	-1,4	-0,4	-1,0	-0,9
			Media	-0,8	-0,5	-0,8	-0,7
			V. máximo	-1,4	-1,4	-1,6	-1,3
			V. mínimo	-0,3	0,1	0,2	-0,3

Tabla 8.

Los eventos de El Niño-La Niña desde 1870 a 2016. ONI-ENSO-ERSSTv4 (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>).

La Niña				El Niño			
Muy fuerte < -2,0°C	Fuerte < -1,5°C	Moderada < -1,0°C	Débil < -0,5°C	Débil > +0,5°C	Moderada > +1,0°C	Fuerte > +1,5°C	Muy fuerte > +2,0°C
1916-17	1892-93	1879-80	1869-70	1884-85	1880-81	1896-97	1877-78
	1973-74	1886-87	1872-73	1923-24	1885-86	1902-03	1888-89
	1975-76	1889-90	1874-75	1945-46	1809-00	1905-06	1982-83
	1988-89	1893-94	1878-79	1951-52	1904-05	1940-41	1997-98
		1903-04	1898-99	1953-54	1911-12	1957-58	2015-16
		1909-10	1908-09	1958-59	1913-14	1972-73	
		1910-11	1950-51	1968-69	1914-15		
		1915-16	1954-55	1969-70	1918-19		
		1917-18	1964-65	1976-77	1925-26		
		1920-21	1967-68	1994-95	1930-31		
		1924-25	1971-72	2004-05	1941-42		
		1933-34	1974-75	2006-07	1963-64		
		1938-39	1984-85		1965-66		
		1942-43	1995-96		1986-87		
		1949-50	2000-01		1987-88		
		1955-56	2011-12		1991-92		
		1970-71			2002-03		
		1998-99			2009-10		
		1999-00					
		2007-08					
		2010-11					

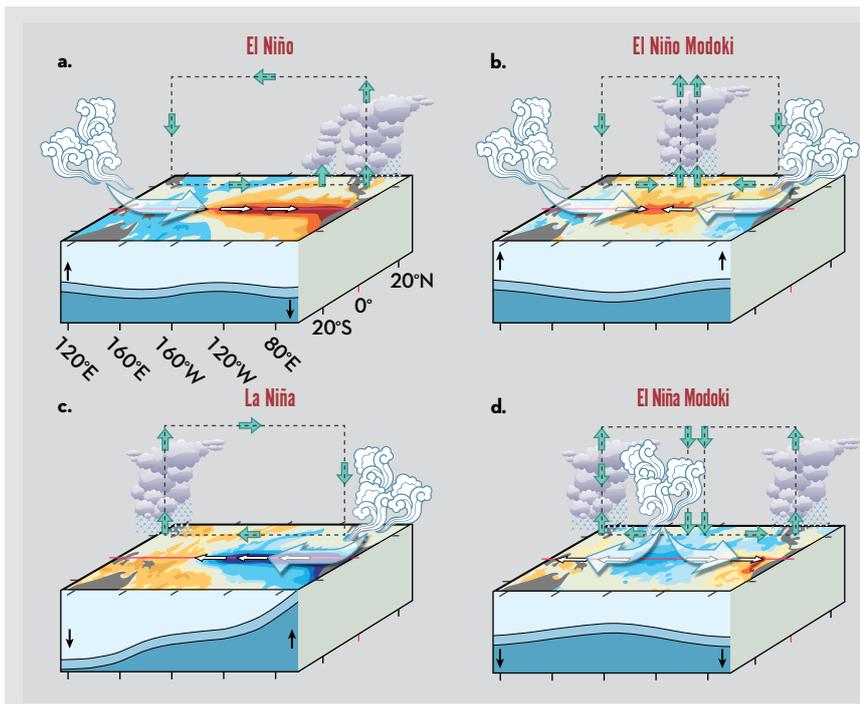


Figura 10.
El Niño y La Niña Modoki.
(<https://earthscience.stackexchange.com/questions/2822/what-is-el-ni%C3%B1o-modoki>).

Estas ondas pasan por el territorio colombiano hacia el océano Pacífico y constituyen una fuente importante en la variabilidad climática y de precipitación en especial en la región Caribe, valle del río Magdalena y Oriente del país (Poveda, 2004).

Los huracanes o ciclones tropicales se forman por la intensificación de perturbaciones tropicales como las producidas por las ondas de los Alisios; son sistemas atmosféricos disipadores de energía, de estructura ciclónica móvil, con bandas de nubes en forma de espiral formados en aguas calientes del océano (más de 26°C), y vientos superiores a los 120 km h⁻¹. La palabra huracán proviene de *Hurankén* (familia lingüística Arawak) de la región del Caribe con el cual los aborígenes denominaban a las tormentas.

Un huracán se caracteriza por vientos fuertes, con bandas de nubes en forma de espiral que producen lluvia abundante y se extienden entre 300 y 500 km de su centro.

Los huracanes tropicales se clasifican de acuerdo con la velocidad de sus vientos:

depresión tropical (menor de 62 km h⁻¹), *tormenta tropical* (entre 63 y 117 km h⁻¹) y *huracán* (mayor de 118 km h⁻¹). Los huracanes del Atlántico se originan entre los 5 y 20 grados de latitud Norte, donde las aguas marítimas son muy cálidas, especialmente entre los meses de agosto y octubre.

Los huracanes afectan de manera esporádica los regímenes de la lluvia en la costa Caribe y el archipiélago de San Andrés y Providencia. La ocurrencia promedio de huracanes en la región Caribe es de cinco huracanes en el año.

Ondas intra-estacionales

Las ondas intra-estacionales también conocidas como Oscilación de Madden-Julian, son una perturbación tropical que se propaga hacia el Este en las zonas tropicales, en la región comprendida entre el océano Índico Austral a través de Australia, hacia el Este, hasta el Pacífico Occidental, con un ciclo en el orden de los 30 a 60 días.

Las ondas intra-estacionales tienen influencia en los patrones de las precipitaciones tropicales y extratropicales, en la circulación atmosférica, y la temperatura de la superficie de casi la totalidad de las zonas tropicales y subtropicales del mundo (Madden-Julian, 1971).

En Colombia las fases extremas de la oscilación de Madden-Julian influyen en las anomalías de la precipitación sobre el territorio colombiano: la fase subsidente tiende a generar una disminución de la precipitación; la fase convectiva estimula un aumento de la precipitación. Para Colombia se ha encontrado un ciclo con período cercano a los 20 días (Yepes y Poveda, 2012) y otro de 30 días (Torres y Pabón, 2017).

Oscilación cuasi-bienal

La oscilación cuasi-bienal (Zea *et al.*, 2000), se relaciona con la alternancia de los vientos del Este, dominantes durante una parte del período, con los vientos del Oeste; es una oscilación a largo plazo, con un período irregular, que varía entre un poco menos de dos años (20 meses) y hasta casi tres años

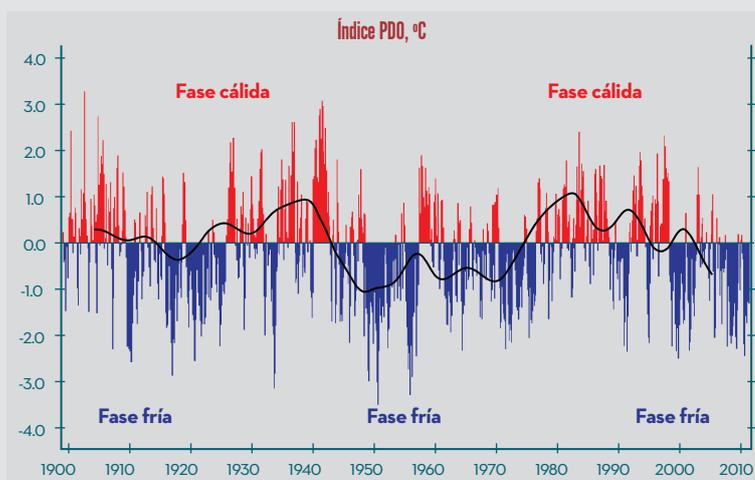
(35 meses), con una duración media de 28 meses. La oscilación cuasi-bienal es cíclica, con características que al parecer tienen una influencia relacionada con la intensidad y magnitud de los eventos cálidos (El Niño-Oscilación del Sur) y sus opuestos (La Niña-Oscilación del Sur), en el océano Pacífico tropical. Las señales muestran que en eventos El Niño, catalogados como intensos, se ha observado la transición de la fase Este a Oeste, mientras que en eventos menos intensos el régimen de vientos característicos de la baja estratosfera ha presentado una transición opuesta a la anterior.

Oscilación decadal del Pacífico

La Oscilación Decadal del Pacífico¹ se ha descrito como una fluctuación de largo período en el océano Pacífico, con una duración de 20 a 30 años.

La Oscilación Decadal del Pacífico consta de una fase cálida o positiva, donde habría una mayor ocurrencia de eventos El Niño, y una fase fría o negativa, donde serían más frecuentes los eventos La Niña; la duración

Figura 11. Comportamiento de la Oscilación Decadal del Pacífico entre 1900 y 2015 (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>).



¹ <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

de cada una de estas fases está entre 20 y 30 años. Es así como entre 1926 y 1946 hubo una mayor frecuencia de eventos El Niño, en el período 1947 a 1976 fueron más frecuentes los eventos La Niña, y posteriormente, se presentó un período entre 1977 a 2000 con una alta frecuencia de eventos El Niño (Figura 11).

Si se tiene en cuenta la secuencia del comportamiento de la oscilación decadal del Pacífico y considerando las incertidumbres que se presentan en las tendencias climáticas, se estaría al final de un período de 30 años con una alta frecuencia de eventos El Niño y se estaría en el comienzo de un período frío de igual duración, con mayor frecuencia de eventos La Niña.

De acuerdo con las consideraciones anteriores se plantea que la caficultura en Colombia se debe planificar con base a un panorama frío para los próximos 20-30 años con una mayor frecuencia de eventos La Niña, lo cual implicaría un manejo del cultivo bajo condiciones de mayor humedad menor brillo solar y menor temperatura, sin que este escenario implique que no se presentarán años con condiciones Neutras o de El Niño.

Oscilación Multidecadal del Atlántico

La Oscilación Multidecadal del Atlántico es parte de la variabilidad natural que ocurre en el océano Atlántico Norte; es una componente oceánica que tiene su expresión en la variación de la temperatura de la superficie del océano y se identifica como un patrón con eventos cálidos y fríos con una periodicidad de 60-80 años. La Oscilación Multidecadal del Atlántico está correlacionada con la temperatura del aire y las precipitaciones sobre gran parte del hemisferio Norte, en particular Norteamérica y Europa, así como del Noreste de Brasil y África y con el clima del verano en Europa. También se asocia con cambios en la frecuencia de las sequías de América del Norte y se refleja en la frecuencia de los grandes huracanes en el Atlántico (Montealegre, 2009; Mesa *et al.*, 1997).

Oscilación del Atlántico Norte

La Oscilación del Atlántico Norte se refiere a un comportamiento atmosférico de ocurrencia periódica, cuya naturaleza es semejante a la del ENOS (El Niño-La Niña—Oscilación del Sur), aunque mucho menos conocido. La temperatura superficial del océano Atlántico Norte permite identificar la ocurrencia de períodos cálidos y fríos, aunque su magnitud es mucho menor que la observada en el Pacífico ecuatorial (5°N-5°S, 150°W-90°W). Los procesos que suceden en el área extratropical del Atlántico Norte no parecen tener una relación tan directa con la variabilidad de la precipitación en el Norte del continente Sudamericano, aunque para los eventos extremos se sugiere alguna conexión (Montealegre, 2009; Mesa *et al.*, 1997).

La influencia del océano Pacífico en la climatología de Colombia

El océano Pacífico ejerce un control notorio sobre la hidroclimatología de Colombia, en particular del Occidente y Centro del país, pero a su vez las lluvias sobre los Andes de Colombia ejercen un efecto importante en las precipitaciones del Pacífico.

En el Pacífico, frente al litoral colombiano, se presenta un giro de los vientos Alisios, este comportamiento asociado al flujo de los vientos del Este, dominantes en el Caribe, da origen a la formación de nubes de gran desarrollo vertical, con altas precipitaciones que ocurren en el océano y en la región continental del litoral Pacífico y sectores de la cordillera Occidental de Colombia (Cuartas y Poveda, 2002, Poveda, 2004).

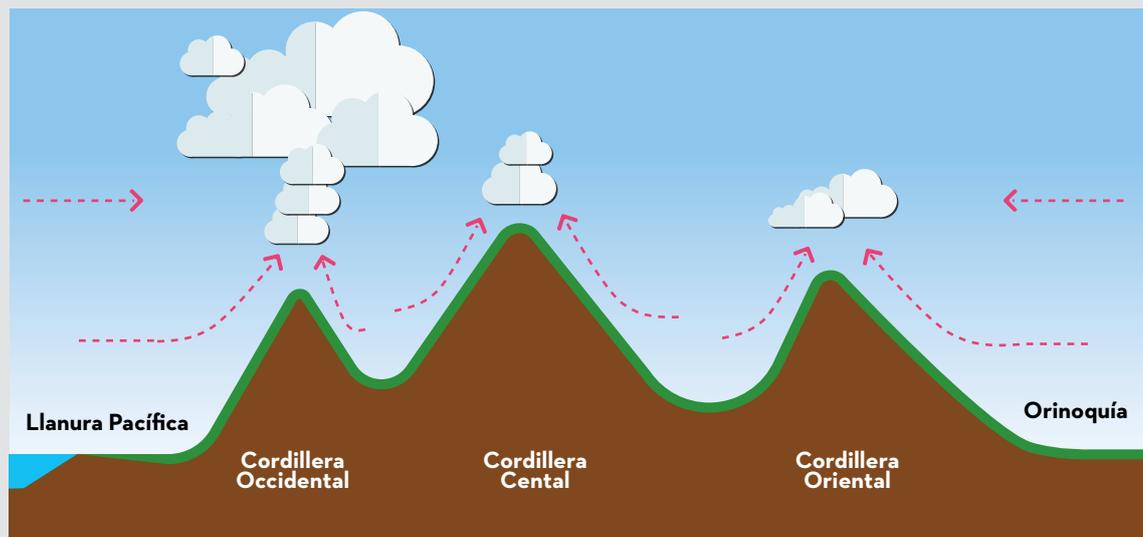
Poveda (2004) describe la corriente de vientos en chorro del Occidente de Colombia o chorro del Chocó, la cual transporta

grandes cantidades de humedad desde el océano Pacífico al interior del país, estimadas en $3.800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con su mayor actividad en el segundo semestre del año, e interactúa con la cordillera Occidental y con los vientos Alisios del Noreste, favoreciendo la convección profunda y la ocurrencia de grandes cantidades de lluvia.

En la Figura 12 se presenta un ejemplo de la influencia de la corriente del Chocó procedente del océano Pacífico y la interacción de los vientos Alisios, así como su influencia en la climatología de Colombia y en la formación de los sistemas convectivos de mesoescala en la vertiente Pacífica (Martínez *et al.*, 2003; Poveda y Mesa, 2000).

Figura 12.

Interacción de las cordilleras de Colombia con la corriente del Chocó y los vientos Alisios (Martínez *et al.*, 2003; Poveda y Mesa, 2000).



Influencia de la Amazonia en la climatología de Colombia

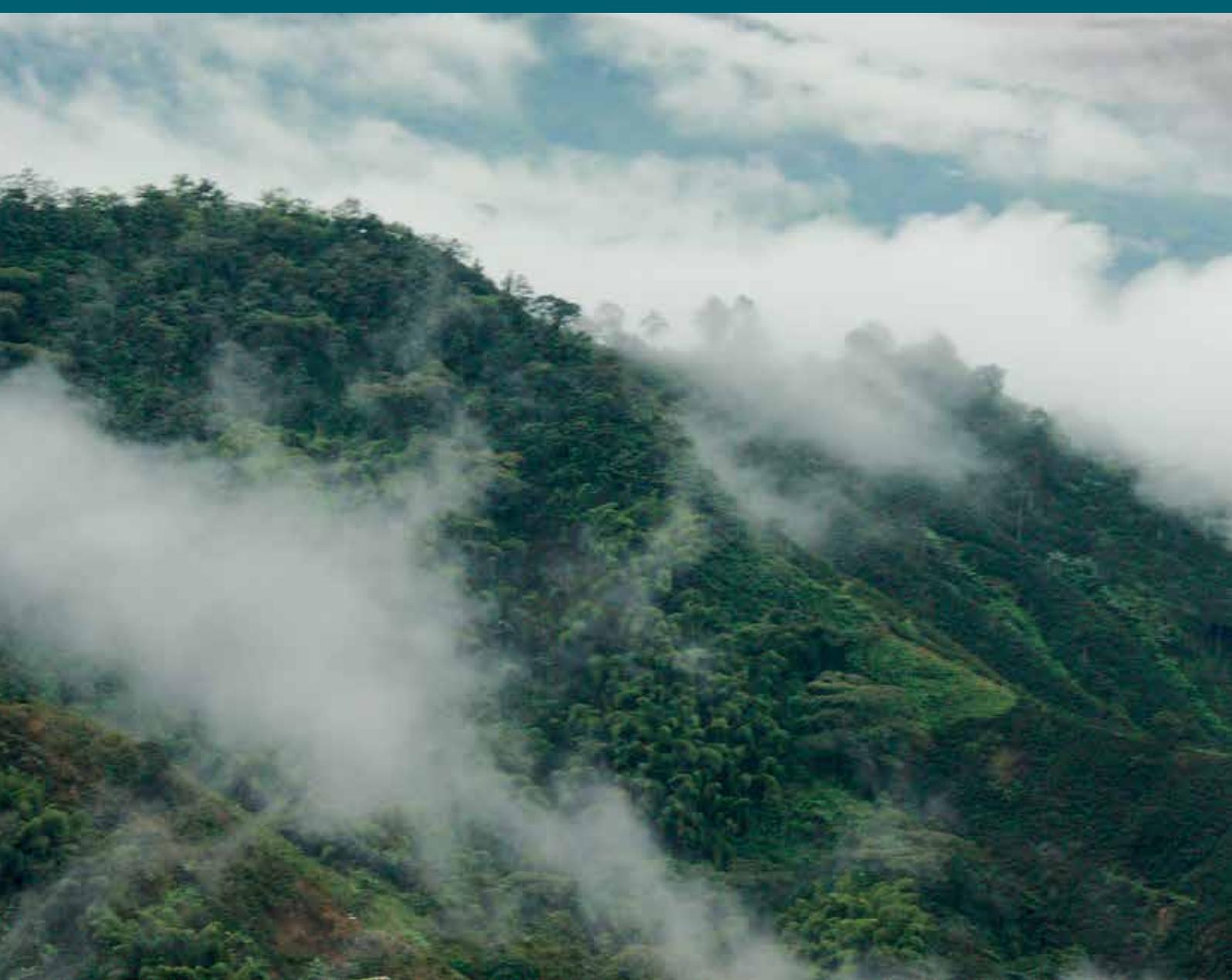
Las masas de aire provenientes de las latitudes medias, las que originalmente pudieron haber sido de origen polar, pero que en su recorrido continental modifican su temperatura y humedad, ocasionalmente pueden llegar

cerca de la zona ecuatorial; estas masas pueden causar inestabilidad y formación de bandas nubosas con altas precipitaciones en la amazonia colombiana. Algunas veces, cuando estos sistemas son intensos, sus efectos pueden extenderse hasta llegar a originar descensos significativos de la temperatura y modificar el clima, a lo largo de la cordillera Oriental y parte de la Orinoquia colombiana. Domínguez, (1985), describe las condiciones dinámicas del clima amazónico, las características de la lluvia y su ubicación en el sistema de clasificación de Köppen y aspectos paleoclimáticos.





El clima de las montañas





Las montañas en la Tierra se encuentran desde el Ecuador hasta los polos y ocupan aproximadamente la quinta parte de los continentes y las islas. Una décima parte de la población de la Tierra recibe su sustento directamente de las montañas: estas suministran agua, combustibles, energía eléctrica, minerales, alimentos y productos medicinales. Las montañas actúan como sistemas de interceptación, almacenamiento y distribución del agua.

La cadena montañosa de los Andes en Suramérica se extiende entre el mar Caribe y el Cabo de Hornos con una longitud de 7.240 km y una altitud media de 3.660 m.

En Colombia la cadena de los Andes se divide en tres cordilleras (Figura 13):

- ♦ Cordillera Occidental: Longitud 1.095 km, Altitud media: 2.000 m.
- ♦ Cordillera Central: Longitud: 1.000 km, Altitud media: 3.000 m.
- ♦ Cordillera Oriental; Longitud: 1.200 km, Altitud media: 2.000 m.

Otras formaciones montañosas en Colombia son la Sierra Nevada de Santa Marta, y las serranías de La Macarena, San Lucas, El Darién y Macuira (La Guajira).

Las montañas actúan como barreras al flujo del aire, dependiendo de su tamaño, forma, orientación y localización relativa.

La fisiografía de la región, en especial las dimensiones y orientación de las montañas respecto a los vientos prevalecientes influye sobre los procesos a gran escala; el relieve relativo y la forma del terreno tienen importancia a escala regional, mientras que la inclinación de la pendiente y su aspecto originan diferenciaciones locales de clima.

En las regiones de montaña la variación de la temperatura del aire con la altitud es de aproximadamente 0,65°C/100 metros.



Figura 13.
Regiones de montaña en Colombia.

La lluvia de una región montañosa está conformada por una cantidad que ocurriría en la ausencia de montañas como resultado de la convección, de la convergencia ciclónica y de una componente debida a la orografía por la intensificación de los procesos sobre las montañas, así como por la fuerza ascendente del aire sobre la superficie del terreno (Barry, 1992; Lauer, 1989).

Los gradientes altitudinales de las precipitaciones presentan patrones complejos, con una amplia variabilidad entre diferentes condiciones fisiográficas de las montañas en función de la orientación y altitud. En la Figura 14 se muestra la variación de la lluvia anual con la altitud en diferentes regiones del mundo; los gradientes altitudinales varían en las diferentes montañas y la franja altitudinal de mayor precipitación se encuentra a diferentes altitudes (zona sombreada).

Los vientos asociados con el relieve del terreno montañoso son generalmente de dos tipos: vientos originados por el *forzamiento mecánico* o topográfico y vientos generados por el calentamiento de la superficie o *forzamiento térmico* (Figura 15). Los flujos por forzamiento mecánico se producen cuando las masas de

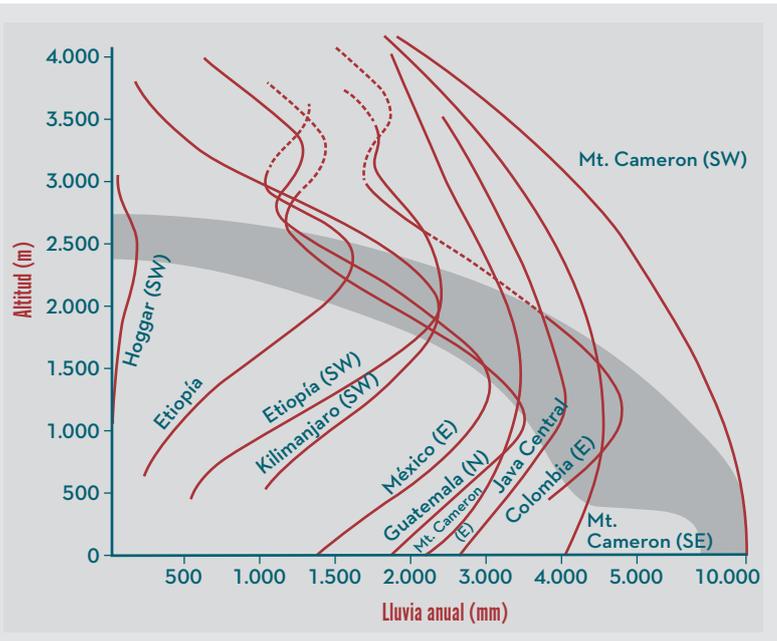


Figura 14.
Variación de la lluvia anual con la altitud para diferentes regiones montañosas del mundo (Barry, 1992).

aire son presionadas sobre la superficie de la montaña y obligadas a elevarse o a orientarse a lo largo de las cuencas de las quebradas y los ríos. El forzamiento térmico se produce cuando el aire se calienta sobre la superficie del terreno, disminuyendo su densidad por lo cual las masas de aire tienden a subir durante el día o durante la noche el aire más frío y más denso desciende sobre la ladera de la montaña (Whiteman, 2000).

Durante el día, el aire que está comprimido lateralmente tiende a expandirse verticalmente y fluir siguiendo la dirección ascendente del eje del valle. Simultáneamente soplan vientos anabáticos (ascendentes), que se forman como resultado del mayor calentamiento de las laderas del valle en comparación con su fondo. Estos vientos de pendiente se elevan por encima de la cumbre de las montañas y alimentan una corriente que retorna a lo largo

de la línea del valle en sentido descendente, que compensa el viento de valle. En la noche se produce el proceso inverso: el aire frío y más denso de los niveles superiores desciende hacia las depresiones y valles, produciendo lo que se conoce como viento catabático. Este viento alcanza su velocidad máxima justo antes de la salida del sol, momento en que es mayor el enfriamiento diario (Whiteman, 2000).

El comportamiento del viento y su interacción con la montaña depende de la estabilidad del aire que se aproxima a las montañas, de la velocidad del flujo de aire y de las características topográficas del terreno subyacente.

El relieve del terreno influye tanto en la velocidad como en la dirección del viento. La altura y longitud de la montaña determinan si el aire irá sobre o alrededor de la barrera. La

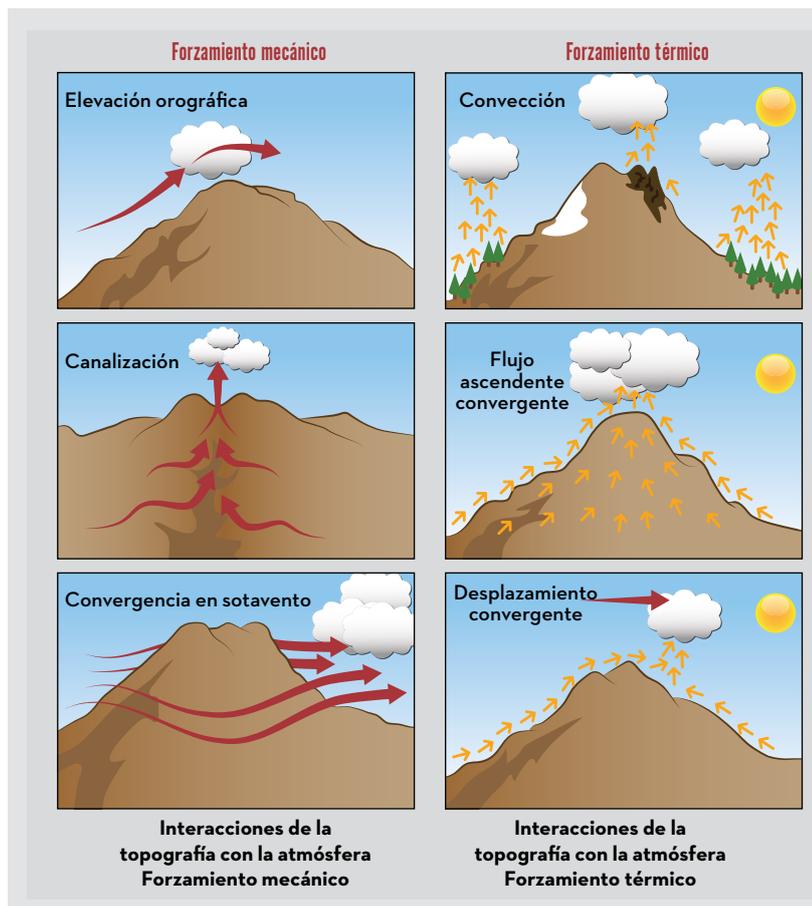


Figura 15. Mecanismos de interacción de la topografía con la atmósfera. Forzamientos mecánico y térmico (Whiteman, 2000).

cantidad de energía necesaria para que el aire fluya sobre una montaña alta es mucho mayor que la requerida para fluir sobre una colina pequeña, igualmente se necesita más energía para que el aire fluya alrededor de una cadena montañosa que alrededor de un pico aislado.

Los obstáculos del terreno (montañas, lotes forestales, cinturones de árboles, edificios) generan flujos turbulentos o remolinos que giran en sentido contrario al flujo principal.

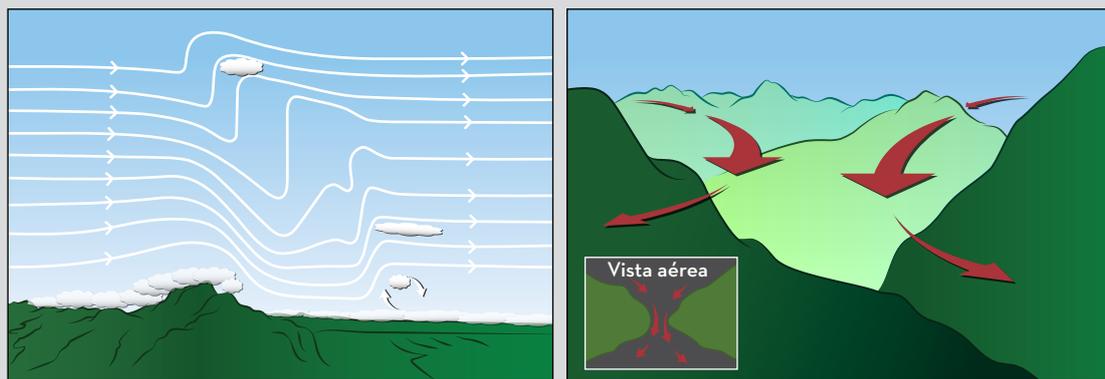
Los vientos que se mueven a lo largo de canales o estrechamientos entre dos montañas son impulsados por la diferencia de presión que hay entre la entrada y la salida; estos vientos se mueven desde un área de alta presión a una de baja presión (Figura 16).

En la interacción del relieve de las montañas con la atmósfera se presentan procesos de ascensión del aire y expansión atmosférica que al aumentar de volumen generan disminución en la temperatura del aire y procesos de condensación del vapor de agua con formación de nubosidad; también se presentan procesos de compresión del aire aumentando su temperatura, una mayor evaporación y una menor nubosidad (Figura 17).

Las masas de aire al elevarse sobre la ladera de las montañas se expanden y se enfrían y descargan los excedentes de humedad en forma de lluvia, por lo cual a medida que ascienden son cada vez más secas, estas masas de aire cuando traspasan la montaña aunque están saturadas son relativamente secas, e inician un proceso de descenso por la ladera opuesta, calentándose por compresión, dando origen a zonas de menor lluvia y mayor temperatura para una misma altitud; este proceso se conoce como efecto Foehn (Barry, 1992; Moran y Morgan, 1991).

La nubosidad en las cordilleras de la región Andina está asociada a procesos de expansión atmosférica y la ausencia de nubes generada por procesos de compresión (Figura 18). En Colombia se observan regiones donde dominan los procesos de expansión-compresión atmosférica, como por ejemplo, en la cordillera Occidental, vertiente Occidental (Buenaventura-Valle, 6.500 mm año⁻¹ hacia la vertiente Oriental de la misma cordillera (Restrepo-Valle, 1.067 mm año⁻¹); otras zonas donde ocurren estos procesos se presentan en la cordillera Oriental, vertiente Oriental (Florencia-Caquetá, 4.000 mm año⁻¹) hacia la vertiente Occidental (Neiva-Huila, 1.300 mm año⁻¹).

Figura 16. Interacción de la montaña con la atmósfera: ondas de montaña y efecto de embudo. *The Comet Program* (<http://www.comet.ucar.edu/>)



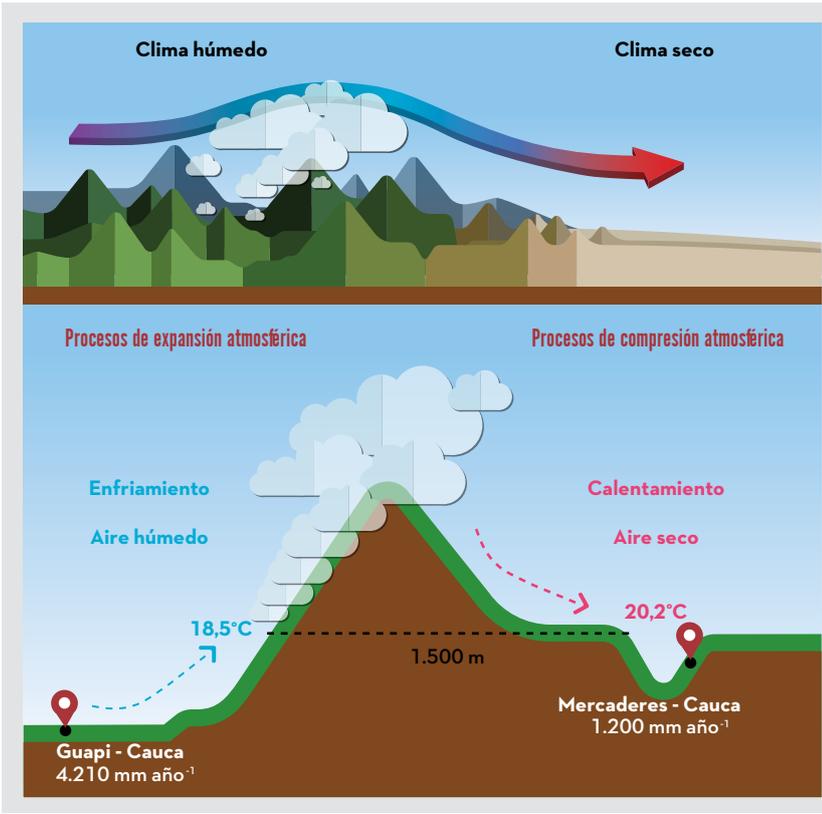


Figura 17. Interacción de las condiciones topográficas con la atmósfera. Procesos termodinámicos de expansión y compresión atmosférica. Un ejemplo para la cordillera Occidental de Colombia.

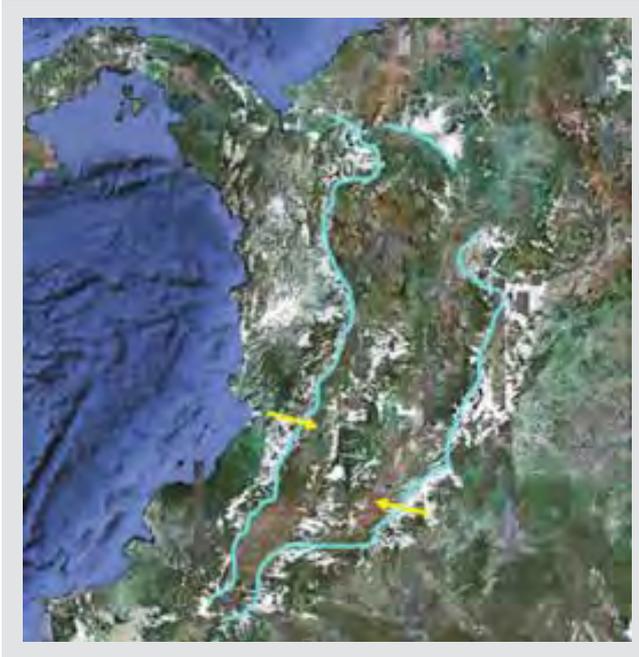


Figura 18. Nubosidad asociada a procesos de expansión y compresión en las cordilleras de la región Andina de Colombia.



La radiación solar





El sol suministra la energía requerida para los procesos físicos y biológicos que ocurren en el sistema terrestre. La radiación solar determina el microclima del cultivo, su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que su cantidad, el grado de interceptación y la eficiencia en su uso, son factores fundamentales en el crecimiento de las plantas.

La Tierra es el tercer planeta del sistema solar y se mueve alrededor del sol en una órbita elíptica cada 364,25 días. Al punto más cercano se le llama *perihelio* y al más lejano *afelio*. El movimiento de translación elíptica origina durante el año cambios en la cantidad de radiación solar que alcanza la Tierra (Figura 19).

La radiación solar está compuesta por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. La cantidad de energía radiante recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre a la distancia media entre el sol y la Tierra, se denomina *constante solar*, con un valor medio de $1.373 \text{ Watt m}^{-2}$ ($1,96 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$). La atmósfera absorbe y dispersa selectivamente la radiación solar, modificando el flujo y la calidad del espectro que incide en la superficie terrestre. La magnitud de ese fenómeno depende de la masa relativa de la atmósfera (Bonhomme, 1993). Las unidades de radiación y los factores de conversión se muestran en la Tabla 9.

Las unidades de Irradiancia se pueden expresar en ergios $\text{cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, o en Watt m^{-2} o en $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Los valores de irradiancia cambian con la altitud solar (altura del sol sobre el horizonte), a menor altitud solar menor irradiancia.

Entre los procesos que modifican la radiación solar durante su paso por la atmósfera están:

Reflexión o albedo, es la fracción de la radiación incidente reflejada por las nubes (33%, en promedio, para el sistema terrestre).

Figura 19. Movimiento de la Tierra alrededor del sol. Inclínación del eje terrestre y la radiación solar.

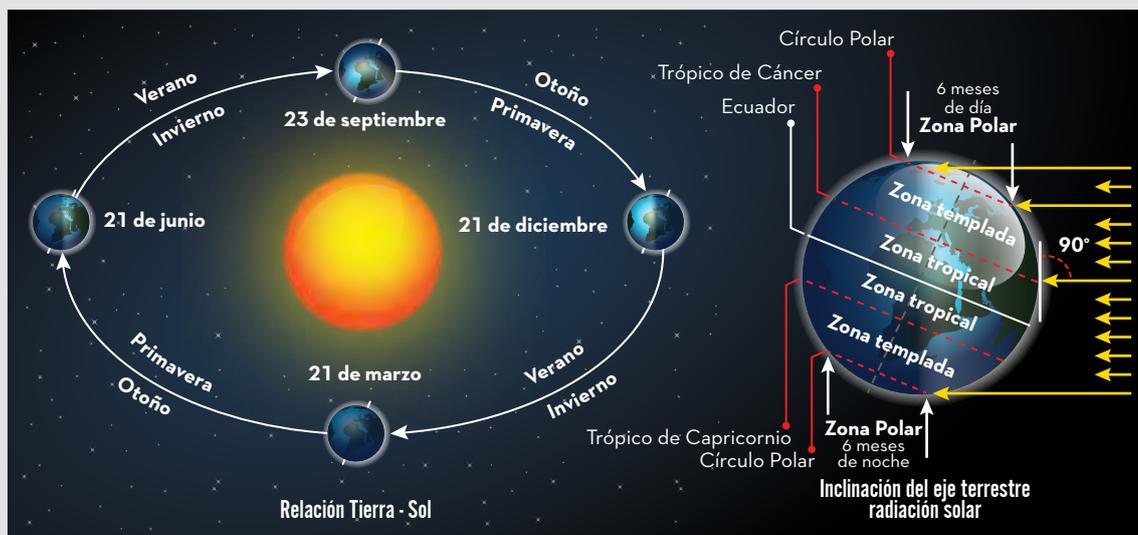


Tabla 9. Unidades de radiación solar y los factores de conversión (Allen *et al.*, 2006).

	Factor multiplicador para obtener la energía recibida en una superficie por unidad de tiempo				Evaporación equivalente
	MJm ⁻² día ⁻¹	Jcm ⁻² día ⁻¹	1calcm ⁻² día ⁻¹	Wm ⁻²	mmdía ⁻¹
1MJm ⁻² día ⁻¹	1	100	23,9	11,6	0,408
1calcm ⁻² día ⁻¹	4,1868x10 ⁻²	4,1868	1	0,485	0,0171
1Wm ⁻²	0,0864	8,64	2,06	1	0,0353
1mmdía ⁻¹	2,45	245	58,5	28,4	1

Difusión ocurre cuando una parte de la radiación solar al atravesar la atmósfera incide sobre las moléculas del aire, del agua y el polvo atmosférico.

Absorción, cuando los componentes de la atmósfera absorben diferentes bandas del espectro solar, por ejemplo el ozono absorbe las franjas azul, violeta y ultravioleta; el oxígeno absorbe parte de la franja visible y el infrarrojo es absorbido por el dióxido de carbono y el vapor de agua.

La radiación incidente que no es modificada por los mecanismos de reflexión, difusión y absorción, ni por la acción de los componentes atmosféricos, se denomina radiación directa. La *radiación difusa* es aquella parte de

la radiación que se dispersa hacia otras regiones de la bóveda celeste, antes de salir de la atmósfera, o antes de que llegue a la superficie terrestre. La suma de la radiación directa más la radiación difusa se denomina *radiación global*.

Las radiaciones de longitudes de onda (λ) menores de 3.000 nanómetros (nm) se definen como radiaciones de *onda corta*. La radiación global se divide en varias franjas de acuerdo con su longitud de onda (Figura 20).

Radiación ultravioleta (UV) ($\lambda < 320$ nm)

En condiciones naturales, estas radiaciones son absorbidas en gran parte por el ozono y el oxígeno atmosféricos.

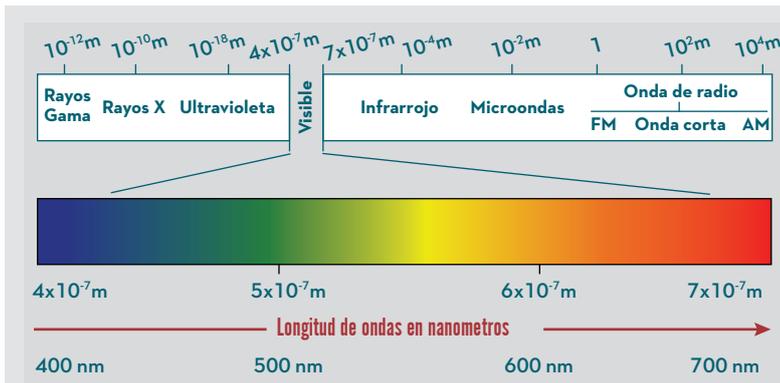


Figura 20. Longitudes de onda de la radiación solar.

Radiación visible ($400 < \lambda < 700 \text{ nm}$)

Es la parte del espectro electromagnético denominada "luz visible", esta atraviesa la atmósfera perdiendo poca energía y es la franja donde ocurren los procesos fotobiológicos como la fotosíntesis (*Radiación Fotosintéticamente Activa*, RFA), la actividad del fitocromo en los vegetales, y la visión, en los animales superiores.

Radiación infrarroja cercana (IRC) ($750 < \lambda < 3.000 \text{ nm}$)

La mayor parte de esta radiación es absorbida por el dióxido de carbono y el vapor de agua atmosféricos.

Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA)

Las plantas verdes utilizan la Radiación Fotosintéticamente Activa para convertir

el CO_2 y el agua, en biomasa y oxígeno molecular mediante el proceso de la fotosíntesis. Las principales características de la RFA que afectan el comportamiento biológico son la calidad, la intensidad y la duración.

La calidad de la radiación solar se refiere a los diferentes rangos de longitudes de onda que constituyen el espectro electromagnético visible y que se asocian al concepto de color. Está relacionada con el efecto de los diferentes colores que constituyen la luz visible: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Cada uno de estos colores es absorbido en diferentes proporciones por la clorofila en el proceso de la fotosíntesis. Por ejemplo, en un alto porcentaje de los ecosistemas se absorbe la mayoría del rojo y del azul, transmitiéndose el verde y el rojo lejano (Figura 21). La calidad de la luz es un factor que limita el

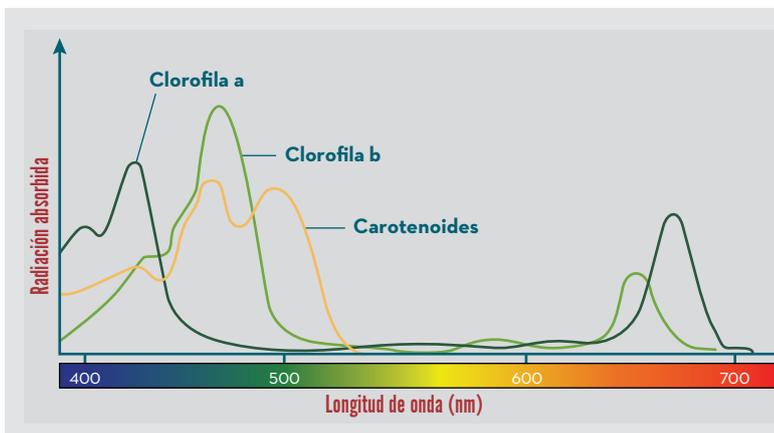


Figura 21. Espectro de absorción de la radiación solar por la clorofila.

crecimiento de muchas plantas debajo del follaje.

A altas intensidades de radiación solar los pigmentos de la fotosíntesis se saturan, esto significa que un aumento en la cantidad de radiación se traduce en un incremento en la tasa de fotosíntesis.

Las diferentes longitudes de onda del espectro solar influyen en el desarrollo y crecimiento de las plantas (Klar, 1984):

- ♦ 1ª banda, longitudes de onda (λ) mayores de 1.000 nanómetros (nm) son absorbidas por la planta sin afectar los procesos bioquímicos.
- ♦ 2ª banda, $1.000 > \lambda > 720$ nm, es la región que afecta la elongación de las plantas, actuando sobre el fotoperiodismo, control de la floración, germinación de las semillas y coloración de los frutos.
- ♦ 3ª banda, $720 > \lambda > 600$ nm, produce gran actividad fotosintética por actuar directamente sobre la clorofila.
- ♦ 4ª banda, $610 > \lambda > 500$ nm, produce poco efecto sobre la actividad fotosintética en el verde y débil actividad de formación.
- ♦ 5ª banda, $510 > \lambda > 400$ nm, es la región de mayor absorción de clorofila y de los pigmentos amarillos; es una región de fuerte actividad fotosintética en el azul-violeta y en los efectos de formación.
- ♦ 6ª banda, $400 > \lambda > 315$ nm, produce efectos en el desarrollo de la planta, dando origen a plantas más cortas y a hojas más gruesas.
- ♦ 7ª banda, $315 > \lambda > 280$ nm, es perjudicial para la mayoría de las plantas.
- ♦ 8ª banda, $\lambda < 280$ nm, mata rápidamente las plantas.

La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), está comprendida entre los 400 y 700 nm y corresponde aproximadamente a la mitad de la radiación global (Ross, 1981).

Radiación termal o calor

La superficie terrestre emite radiación de onda larga con longitudes de onda entre 5.000 y 10.000 nm. Todos los objetos con temperaturas superiores al cero absoluto emiten radiaciones proporcionales a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Cerca del 90% de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre al espacio es absorbida por la atmósfera, especialmente por el vapor de agua, las nubes y el gas carbónico. Gran parte de ella regresa a la superficie terrestre.

Leyes de la radiación

(Dogniaux, 1994; Rosenberg, 1974)

Diferentes leyes describen las propiedades de la radiación electromagnética emitida por un radiador perfecto, usualmente llamado *cuerpo negro*, un objeto hipotético que absorbe toda la radiación que incide en él, y no refleja ni transmite la radiación. En realidad, no existe un radiador perfecto en la naturaleza, pero el sol y la Tierra se aproximan a un cuerpo negro.

Irradiancia (I) o densidad de flujo de radiación solar, es la cantidad de energía recibida por unidad de área y unidad de tiempo (Figura 22).

Ley de Lambert

La irradiancia de una superficie depende de la exposición relativa a la fuente de radiación. Una superficie, por ejemplo, una hoja expuesta a un rayo de luz perpendicular a ella (ángulo recto) recibe la máxima radiación por unidad de área. Si la superficie está inclinada al rayo, la energía se distribuye sobre un área mayor y, por lo tanto, la irradiancia es menor. La irradiancia en la superficie mayor (I) se calcula con la ley del coseno (Figura 23).

De acuerdo con el principio de conservación de la energía, del total de radiación solar que ingresa a un sistema, una cantidad de radiación se refleja, otra se absorbe y otra se transmite. Un ejemplo se observa en la Figura 24.

Si se divide cada uno de los términos de la expresión anterior por la energía total, se tiene la Ecuación <1>:

$$1 = r + a + t \quad \text{<1>}$$

En donde r , a y t se conocen respectivamente como reflectividad (r), absorptividad (a) y transmisividad (t).

Ley de Kirchoff, establece que el coeficiente de absorción de un material para radiación de una longitud de onda específica es igual a su emisividad en la misma longitud de onda.

Ley de Planck. La tasa de radiación emitida por un cuerpo negro depende de la temperatura absoluta del cuerpo y de la longitud de onda específica de la radiación.

Ley de desplazamiento de Wien. La máxima intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo negro (T). Como se presenta en la Ecuación <2>:

$$\lambda_{max} = 0,2898 \text{ (cm}^\circ\text{K)} / T(^{\circ}\text{K)} \quad \text{<2>}$$

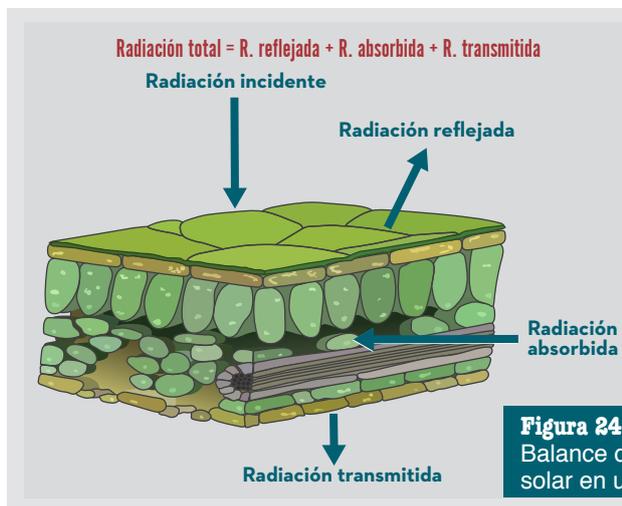
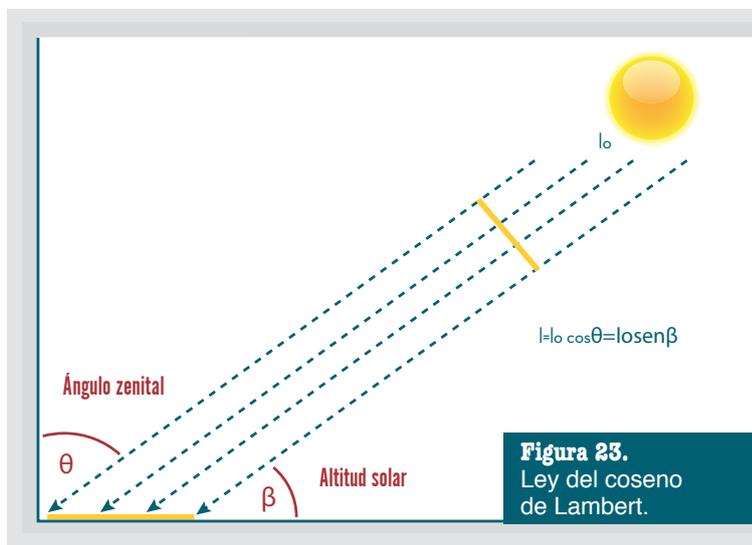
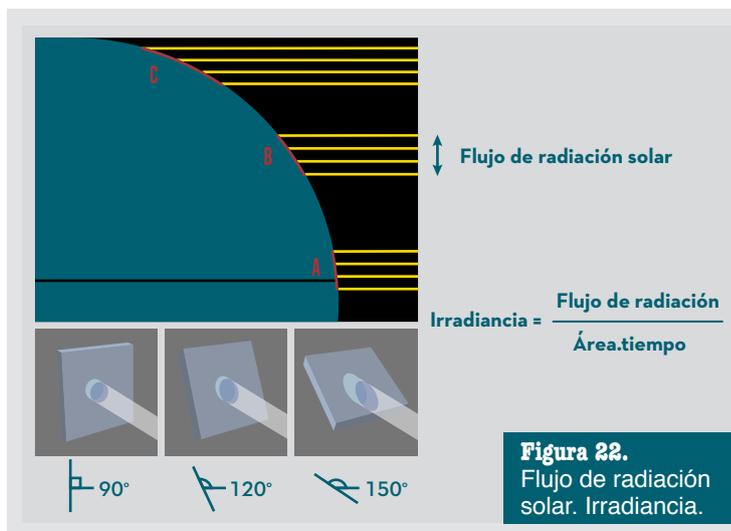
Ley de Stefan-Boltzman. Establece que la tasa a la cual un cuerpo negro irradia energía (Emisividad, E) es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante (T , $^{\circ}\text{Kelvin}$), de acuerdo con la Ecuación <3>:

$$E = \sigma T^4 \quad \text{<3>}$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman, igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

Balance de radiación y de energía

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo está determinada en primer término por el macroclima de la región (latitud, día del año, grandes circulaciones



atmosféricas), por las condiciones de nubosidad que determinan las cantidades de radiación directa y difusa, y por las propiedades del follaje, como son el tamaño y disposición de las hojas, estructura de la planta, distancia de siembra. Estas características determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo.

La radiación neta es la diferencia entre la radiación solar entrante y saliente, tanto de onda corta (entre 300 a 3.000 nm) como de onda larga (mayor de 3.000 nm). El balance de radiación sobre una superficie se puede expresar como se presenta en la Ecuación <4> (Jaramillo y dos Santos, 1980):

$$Rn = (1 - \alpha)(KD \downarrow + Kd \downarrow) + (L \uparrow - L \downarrow) \text{ <4>}$$

Donde:

Rn: radiación neta

α : albedo o proporción de radiación reflejada.

KD \downarrow : radiación directa de onda corta incidente.

Kd \downarrow : radiación difusa de onda corta que entra a la superficie.

L \uparrow : radiación de onda larga emitida por la superficie.

L \downarrow : radiación de onda larga que llega a la superficie.

La radiación neta se mide con radiómetros netos y los flujos entrantes y salientes de onda corta con piranómetros y la radiación de onda larga con pirgeómetros.

El balance de radiación de onda larga se puede estimar con las medidas hechas en la estación meteorológica o mediante ecuaciones empíricas como la de Brunt (Pereira *et al.*, 2007), de acuerdo con las siguientes expresiones (Ecuaciones <5> y <6>)

Para un clima húmedo

$$L^* = - [4,903 \cdot 10^9 T^4 (0,56 - 0,25 \sqrt{en}) (0,1 + 0,9 n / N)] \text{ (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}) \text{ <5>}$$

Para un clima seco

$$L^* = - 4,903 \cdot 10^9 T^4 [(0,34 - 0,14 \sqrt{en}) (0,1 + 0,9 n / N)] \text{ (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}) \text{ <6>}$$

Donde:

T: temperatura media diaria del aire (°K).

en: presión real de vapor de agua de la atmósfera (kPa).

n: número de horas de brillo solar observado.

N: número de horas de brillo solar astronómico.

Balance de radiación solar y de energía en la Tierra

Un balance de radiación solar de onda corta y larga y su balance de energía en la Tierra se presenta en la Figura 25.

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Esta energía al pasar por la atmósfera se debilita debido a los procesos de difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases como el ozono y el vapor de agua y por partículas en suspensión e incide en la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación solar absorbida por la superficie es devuelta al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

La radiación solar incidente sobre una superficie se compone de radiación directa y radiación difusa:

Radiación directa. Es aquella que llega directamente del Sol sin haber tenido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

Radiación difusa. Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, y otros.

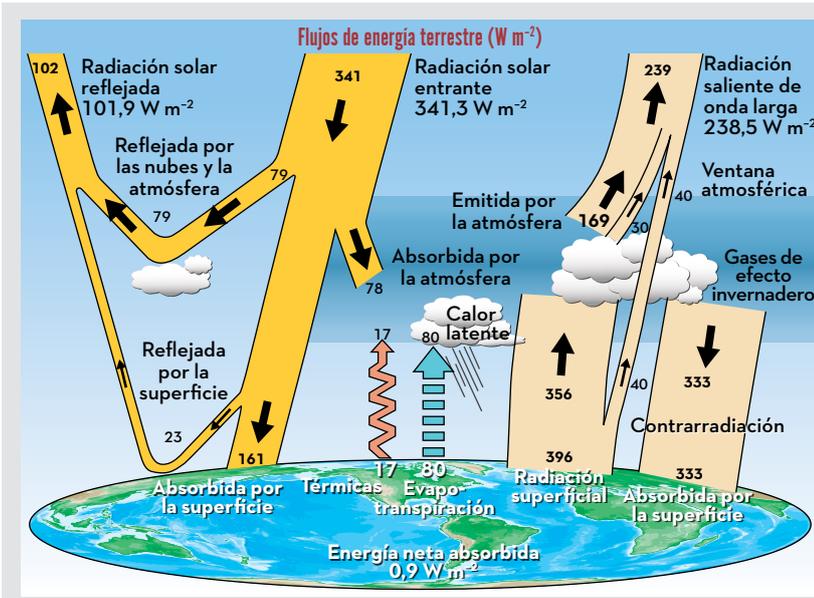


Figura 25. Balances de radiación y de energía en la Tierra (Trenberth *et al.*, 2009).

La radiación solar en la zona cafetera de Colombia

La duración astronómica del día o fotoperíodo se refiere a la duración del día entre la salida y la puesta del sol. La cantidad de radiación solar incidente en una región en un período de tiempo dado varía con la latitud. Por encontrarse Colombia cerca de la

zona ecuatorial recibe abundante radiación solar durante todo el año. Entre 0°y 12° de latitud Norte la radiación solar media varía respectivamente entre 36,1 y 35,3 MJ m⁻² día⁻¹; los valores máximos se presentan en marzo y septiembre (Tabla 10). Los valores medios de brillo solar astronómico son de 12,0 horas con variaciones en el año entre 11,3 y 12,7 horas (12° Norte).

Tabla 10.

Valores máximos astronómicos de la radiación solar y brillo mensual solar para diferentes latitudes de la región andina de Colombia. (Allen *et al.*, 2006).

Latitud	Radiación solar (MJ m ⁻² día ⁻²)				Brillo solar (horas)			
	0° N	4° N	8° N	12° N	0° N	4° N	8° N	12° N
E	36,2	34,6	32,8	30,9	12,0	11,8	11,6	11,4
F	37,5	36,4	35,2	33,8	12,0	11,9	11,7	11,6
M	37,9	37,6	37,2	36,5	12,0	12,0	11,9	11,9
A	36,8	37,4	37,8	38,0	12,0	12,1	12,2	12,3
M	34,8	36,0	37,1	38,0	12,0	12,2	12,4	12,6
J	33,4	35,0	36,3	37,6	12,0	12,2	12,5	12,7
JL	33,9	35,3	36,5	37,6	12,0	12,2	12,4	12,6
A	35,7	36,5	37,2	37,8	12,0	12,1	12,3	12,4
S	37,2	37,3	37,2	36,9	12,0	12,0	12,0	12,1
O	37,4	36,6	35,6	34,5	12,0	11,9	11,8	11,7
N	36,3	34,9	33,3	31,5	12,0	11,8	11,6	11,4
D	35,6	33,9	32,0	30,0	12,0	11,8	11,5	11,3
Media	36,1	36,0	35,7	35,3	12,0	12,0	12,0	12,0

La radiación global presenta modificaciones en sus cantidades diarias por diversos factores, como son, la exposición de la ladera y la ocurrencia de nubosidad influenciada por la circulación atmosférica local (vientos valle-montaña-valle). Este comportamiento se observa claramente en un perfil altitudinal situado en la vertiente Occidental de la cordillera Oriental, (Figura 26), en donde el máximo valor de la radiación solar se presenta a una altitud de 172 m (Palanquero - Cundinamarca) sobre el valle del río Magdalena ($20,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Desde este nivel hacia arriba se observa una disminución progresiva de la radiación hasta una altitud de 1.550 m (Tibacuy - Cundinamarca) en donde se presenta un valor mínimo de $13,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. A partir de esta altitud se registra un aumento de la radiación hasta un valor de $15,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a 2.553 m (Tibaitatá - Mosquera - Cundinamarca). La región de disminución de la radiación solar se explicaría en parte por la presencia de la zona de neblina o bosques de niebla presentes en las laderas de la Zona Andina.

Insolación (Brillo solar)

La insolación puede expresarse como el número de horas de brillo solar de una localidad (número de horas de radiación directa). La radiación solar y el brillo solar astronómicamente posible dependen de la latitud de la localidad y del día del año.

El valor máximo de brillo solar que llega a la parte superior de la atmósfera, entre la línea ecuatorial y los 12° de latitud Norte, varía entre $11,3$ y $12,7 \text{ h día}^{-1}$, estos valores se reducen al llegar a la superficie terrestre influidos por el ciclo diario de la nubosidad, la orientación y exposición de las laderas y por la amplitud del horizonte.

El transcurso anual del brillo solar en la zona andina sigue una onda opuesta a la distribución de las lluvias, originado por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical -ZCIT-.

En los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena, la distribución del brillo solar es bimodal con sus valores máximos en los meses de menor lluvia como son enero-febrero y julio-agosto. En las regiones externas de las cordilleras como son los Llanos Orientales y la Costa Atlántica la distribución tiende a ser unimodal con valores máximos en diciembre-enero y valores mínimos en junio-julio. Para Colombia los mayores valores de brillo solar se registran en la península de La Guajira con cantidades anuales próximas a las 3.000 horas; los valores más bajos se observan en el litoral Pacífico con 900 horas al año (Bernal, 1987; Chaves y Jaramillo, 1997).

El brillo solar mensual y anual para algunas localidades de la zona cafetera de Colombia se presenta en la Tabla 11. Un 30% de los valores observados presentan cantidades de brillo solar superiores a 1.800 h año^{-1} (46%

Figura 26.

Variación de la radiación solar con la altitud. Cuenca del río Magdalena. cordillera Oriental, vertiente Occidental.

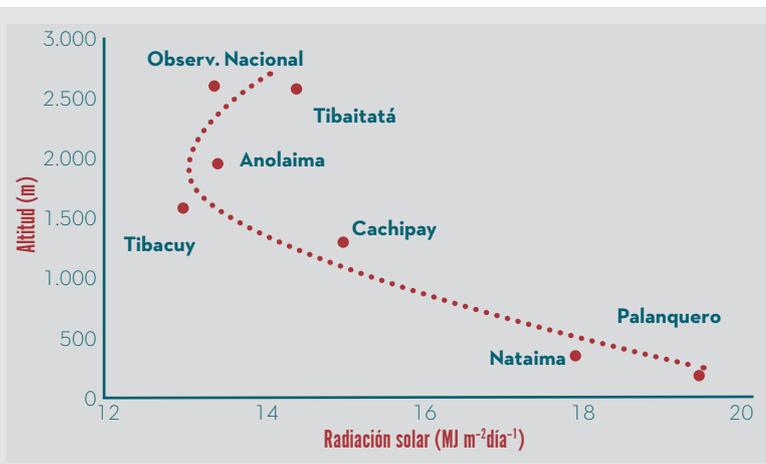


Tabla 11.

Brillo solar mensual y anual (horas) en la zona cafetera de Colombia (Cenicafé, 2017).

Estación	Municipio	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Anual
Cesar														
Ramón Mejía	La Paz	255	237	235	184	164	152	200	183	155	154	173	237	2.330
Pueblo Bello	Pueblo Pello	258	221	203	165	159	170	198	185	167	169	184	234	2.311
Magdalena														
Jirocasaca	Santa Marta	235	204	212	180	147	132	159	149	112	105	118	181	1.936
La Victoria	Santa Marta	178	178	182	115	106	135	136	127	109	88	81	134	1.569
N. de Santander														
Blonay	Chinácota	139	106	90	87	115	115	134	138	127	122	113	124	1.411
Gabriel M Barriga	Convención	105	98	96	85	107	137	167	180	147	134	105	82	1.444
Francisco Romero	Salazar	119	94	91	88	120	130	155	167	152	132	114	113	1.475
Santander														
San Antonio	Floridablanca	144	119	105	95	92	95	110	116	119	118	95	116	1.325
El Roble	Los Santos	205	189	161	138	141	146	160	167	163	153	147	166	1.936
Aguasblancas	San Vicente	141	117	102	99	113	128	158	151	131	112	99	110	1.460
Alberto Santos	Socorro	225	195	191	165	165	169	194	196	185	180	180	203	2.248
Boyacá														
Bertha	Moniquirá	204	168	150	124	123	132	153	153	138	147	157	178	1.827
Cundinamarca														
G Villamaria	Anolaima	178	160	160	121	149	148	180	182	178	150	130	142	1.877
Mesitas Santa Inés	Cachipay	145	117	105	100	108	121	137	143	129	114	99	114	1.434
La Arcadia	El Colegio	111	97	68	57	57	61	82	85	81	74	66	75	915
Santa Rosita	El Peñón	125	111	113	110	118	123	150	148	131	128	107	108	1.473
Misiones	El Colegio	136	104	97	74	71	81	98	104	98	89	90	115	1.159
Santa Bárbara	Sasaima	129	105	97	96	106	109	131	140	126	123	110	112	1.385
Granja Tibacuy	Tibacuy	160	125	112	96	102	111	120	121	119	118	113	143	1.439
Hacienda Java	Viotá	134	118	102	82	87	92	113	118	109	100	87	126	1.269
Montelíbano	Yacopí	149	123	118	113	127	143	178	169	147	138	129	130	1.663
Tolima														
El Limón	Chaparral	153	126	121	119	144	147	157	154	143	124	113	135	1.635
El Campin	Dolores	146	123	97	88	109	132	158	148	135	116	95	120	1.468
La Montaña	Dolores	168	139	132	122	144	162	181	178	154	134	118	145	1.775
Tricontinental	Fresno	131	139	120	124	134	160	194	195	181	140	116	122	1.757
Chapetón	Ibagué	150	124	129	119	134	150	167	162	151	131	115	132	1.664
La Primavera	Ibagué	155	118	121	128	133	148	162	172	158	142	115	134	1.686
La Trinidad	Libano	132	109	103	99	111	138	183	187	154	117	99	115	1.547
Los Andes	Planadas	124	113	90	94	104	123	121	127	107	118	100	118	1.338
El Tucuy	Villarrica	116	103	74	80	83	88	122	108	111	99	81	97	1.161
Luis Bustamante	Villarrica	97	84	82	72	81	95	103	105	89	80	72	90	1.049

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Anual
Huila														
Jorge Villamil	Gigante	123	95	89	85	87	90	96	104	105	99	90	104	1.167
Simón Campos	La Plata	127	101	74	91	91	93	104	110	126	110	86	104	1.217
La Cascada	Pitalito	139	123	86	105	97	81	110	109	114	121	116	128	1.328
Antioquia														
El Trapiche	C. Bolívar	164	164	167	156	158	172	203	204	165	154	146	153	2.007
Cocorná	Cocorná	174	148	139	139	161	188	226	222	187	157	144	162	2.047
La Maquina	Cocorná	160	148	153	145	156	197	232	217	188	161	149	158	2.063
Piamonte	Fredonia	206	173	164	152	127	163	202	180	154	133	137	172	1.961
Miguel Valencia	Jardín	161	151	149	130	136	160	189	176	143	129	134	147	1.805
La Cristalina	Támesis	199	184	176	156	159	180	210	210	181	167	160	181	2.161
Virgen de Oro	Támesis	163	149	124	93	85	106	146	150	114	101	89	108	1.428
El Rosario	Venecia	195	166	162	137	145	176	213	198	161	133	133	160	1.978
El Delirio	Yolombó	179	167	153	121	144	162	234	206	178	137	147	181	2.009
El Rubí	Yolombó	186	171	160	138	180	205	245	231	211	166	142	155	2.191
Caldas														
Bellavista	Anserma	145	125	119	97	104	122	165	151	118	94	96	118	1.454
Cenicafé	Manizales	171	142	142	117	114	129	160	157	132	125	127	148	1.665
Naranjal	Chinchiná	171	147	145	117	116	130	166	160	134	127	130	146	1.690
La Ilusión	Filadelfia	188	184	163	135	139	143	174	182	164	158	153	169	1.952
El Algarrobo	Manizales	174	154	153	124	120	129	168	167	134	143	138	153	1.756
Llanadas	Manzanares	137	127	126	116	139	140	169	169	158	123	111	124	1.638
Santa Helena	Marquetalia	128	106	99	102	120	150	187	193	160	121	103	111	1.581
El Refugio	Neira	189	142	158	121	127	133	168	178	134	139	149	174	1.811
Granja Luker	Palestina	189	169	170	143	141	152	187	182	155	152	154	166	1.960
Santágueda	Palestina	193	165	167	143	140	151	183	183	155	150	155	172	1.957
Rafael escobar	Supía	195	170	168	143	146	163	202	198	159	152	151	172	2.018
Risaralda														
La Elvira	Belen de Umbría	127	117	115	99	100	116	159	162	131	109	92	102	1.429
Ospirma	Guática	166	147	143	127	134	156	188	189	157	144	128	151	1.829
El Pilamo	Pereira	179	151	146	128	124	128	159	164	142	144	145	152	1.764
La Catalina	Pereira	163	136	135	113	111	127	161	160	132	130	125	140	1.633
La Joya	Pereira	187	158	162	134	129	137	176	167	140	143	149	165	1.846
El Jazmín	Sta Rosa de C.	141	117	115	93	92	111	141	139	114	100	97	114	1.375
Quindío														
El Sena	Armenia	136	110	113	96	101	119	161	148	112	93	90	117	1.398
Paraguaicito	Buenavista	172	140	137	118	117	132	162	159	135	127	126	145	1.671
La Bella	Calarcá	135	114	115	95	93	108	139	146	121	102	98	111	1.376
El Agrado	Montenegro	156	133	138	121	116	133	169	171	146	133	120	134	1.671
La Esperanza	Pijao	115	108	89	82	89	105	140	144	118	86	83	102	1.261

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Anual
Maracay	Quimbaya	145	127	129	110	111	128	169	174	136	121	112	127	1...588
Valle														
Arturo Gómez	Alcalá	165	142	144	124	125	139	176	175	143	133	129	140	1.734
Venecia	Caicedonia	167	143	145	126	126	145	177	180	149	137	130	148	1.771
Albán	El Cairo	122	112	121	116	126	139	172	168	139	115	99	105	1.535
La Selva	Ginebra	103	90	89	83	80	99	121	127	108	89	71	83	1.144
Campanella	Palmira	109	116	96	96	99	72	106	149	110	124	74	67	1.217
Julio Fernández	Restrepo	159	140	138	118	119	128	159	164	138	127	119	140	1.649
Heraclio Uribe	Sevilla	120	111	109	92	101	120	158	148	120	98	89	103	1.370
La Sirena	Sevilla	116	102	99	91	91	110	145	152	118	106	90	100	1.322
Manuel M. Mallarino	Trujillo	143	127	126	109	108	127	168	170	137	116	106	121	1.558
Cauca														
Manuel Mejía	El Tambo	164	137	139	126	131	133	181	180	144	131	126	148	1.739
La Trinidad	Piendamó	137	116	108	107	115	136	170	176	143	127	108	118	1.560
La Florida	Popayán	178	154	145	118	123	150	174	167	152	128	125	155	1.768
La Campiña	Timbío	151	125	138	107	113	140	156	157	131	115	112	136	1.580
Nariño														
Ospina Pérez	Consacá	145	118	116	113	124	139	171	177	151	138	132	138	1.660
El Sauce	La Unión	131	110	113	119	129	148	176	184	155	135	116	119	1.635
La Unión	La Unión	125	108	111	106	132	152	202	183	152	116	84	109	1.581

del brillo solar astronómicamente posible); un 46% con valores anuales comprendidos entre 1.400 y 1.800 horas y un 22% con valores inferiores a 1.400 horas (28% del brillo solar astronómicamente posible). Los valores anuales observados indican una alta presencia de nubosidad y en consecuencia altas proporciones de radiación difusa; en un 14% de los valores se observan cantidades superiores a las 2.000 h año⁻¹ (49% del brillo solar máximo). El menor valor registrado está próximo a 950 h año⁻¹ (22% del brillo solar astronómicamente posible).

Al analizar la variación de la cantidad de horas de brillo solar registrada entre los 1.000 y los 4.200 m de altitud, para la cuenca del río Chinchiná-Caldas localizada en la vertiente Occidental de la cordillera Central, el máximo brillo solar presenta un valor anual próximo a las 2.000 horas a 1.026 m de altitud (Santágueda-Caldas) y disminuye progresivamente hacia

la franja del bosque de niebla hasta 656 horas en Las Palomas a 2.700 m, para aumentar a 1.000 horas a 4.200 m de altura (Estación Gualí), como se presenta en la Figura 27.

Un índice utilizado en el balance de radiación solar dentro de los cultivos es el albedo, definido como la relación entre la radiación reflejada por una superficie y el total de la radiación incidente sobre la misma. Esta proporción constituye una radiación que no es utilizada en los procesos de fotosíntesis y transpiración de las plantas. El albedo depende del ángulo de incidencia de la radiación solar, de la disposición de las hojas, del color, de las condiciones de humedad y nutrición de las plantas, entre otros.

En la Tabla 12, se relacionan algunos valores de albedo para diferentes superficies. Un rango frecuente para la mayoría de los cultivos está entre el 10% y el 20%.

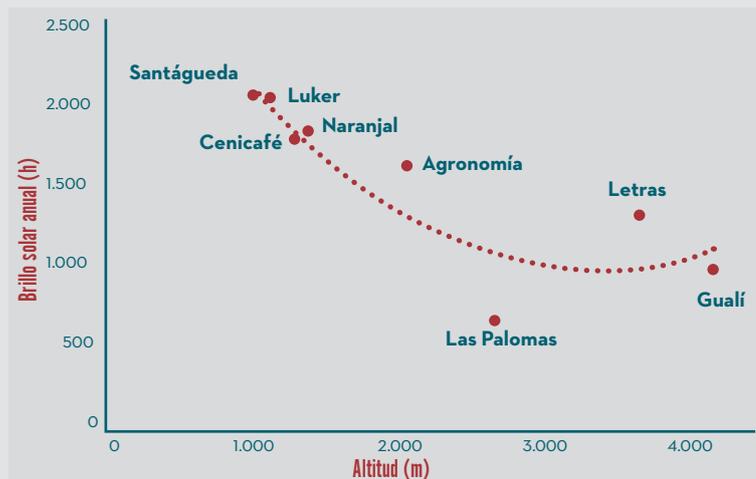


Figura 27. Variación altitudinal del brillo solar con la altitud. Cuenca del río Chinchiná-Caldas.

Tabla 12. Albedo para diferentes superficies (Ayoade, 1983; Rosenberg, 1974; Sellers, 1974).

Superficie	Albedo (%)
Suelo negro	8-14
Bosque coníferas	5-15
Bosque tropical	15-20
Cultivos verdes	15-25
Desierto	25-30
Agua	5-10
Nieve	80-95
Hielo	50-70
Nubes	36-90
La Tierra	33

Relación entre el brillo solar y la radiación solar en Colombia

La cantidad de horas de brillo solar es una medida frecuente en muchas estaciones climáticas de la zona cafetera. A partir de este valor puede determinarse la cantidad de radiación global incidente en una localidad, por medio de la relación de Angstrom-Prescott (Ecuación <7>).

$$\frac{R_g}{R_A} = a + b * \frac{n}{N} \quad <7>$$

Donde:

R_g : radiación global diaria observada en la superficie terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Registrada mediante un piranómetro.

R_A : radiación global diaria astronómicamente posible, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Para su cálculo, consultar a Allen *et al.* (2006).

n : brillo solar diario observado, horas. Se registra mediante un heliógrafo.

N : brillo solar diario astronómicamente posible, horas. Para su cálculo, consultar a Allen *et al.* (2006).

a, b : coeficientes de la regresión lineal.

Para las condiciones de la zona cafetera Gómez y Guzmán (1995) y Guzmán *et al.* (2013), estimaron los coeficientes a y b de la relación de Angstrom. Los valores de a y b están dentro de los rangos encontrados para 42 localidades situadas en un rango latitudinal muy amplio, entre los 36° Sur a 60° Norte (Frere *et al.*, 1978; Rietveld, 1978).

La radiación global de la zona cafetera puede estimarse regionalmente mediante las siguientes expresiones que se presentan en las Ecuaciones <8>, <9>, <10>, <11> y <12> (Guzmán *et al.*, 2013):

Grupo 1 (Pueblo Bello, San Antonio y El Rosario):

$$R_g/R_A = 0,167 + 0,696 (n/N) \quad <8>$$

Grupo 2 (Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaquito y La Sirena):

$$R_g/R_A = 0,234 + 0,497 (n/N) \quad <9>$$

Grupo 3 (Santa Bárbara y Jorge Villamil):

$$R_g/R_A = 0,249 + 0,515 (n/N) \quad <10>$$

Grupo 4 (La Trinidad, Manuel Mejía y Ospina Pérez):

$$Rg/RA = 0,253 + 0,464 (n/N) <11>$$

Para el total de las estaciones:

$$Rg/RA = 0,221 + 0,553 (n/N) <12>$$

Con estos coeficientes se estimaron los valores de radiación global mensual para algunas estaciones de la zona cafetera, estos

varían entre 13,0 MJ m⁻² día⁻¹ en Santa Helena-Marquetalia-Caldas y 20,6 MJ m⁻² día⁻¹ en Pueblo Bello-Cesar (Tabla 13).

Dentro de una cuenca hidrográfica, el brillo solar varía con la altitud, explicable por las diferencias en la nubosidad diurna debida a la circulación de los vientos valle-montaña. En promedio, por cada 1.000 m de incremento de

Tabla 13.

Valores medios mensuales de brillo solar-BS- (horas) y radiación solar global -Rg- (MJm⁻²día⁻¹) para estaciones de la zona cafetera (Guzmán *et al*, 2013).

Estación		E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Anual
Pueblo Bello	BS	8,5	7,6	6,7	5,7	5,2	5,8	6,6	6,2	5,3	5,5	6,6	6,9	6,4
	Rg	22,5	22,1	21,7	20,6	19,7	20,8	21,7	21,2	19,6	10,0	10,1	19,1	20,6
San Antonio	BS	5,5	4,1	3,5	3,2	3,1	3,1	3,9	3,8	3,6	4,0	3,6	3,6	3,8
	Rg	14,8	13,6	13,7	13,2	12,9	13,1	13,7	13,7	13,7	13,7	12,6	12,0	13,4
El Rosario	BS	6,4	5,0	5,1	4,5	4,9	5,8	6,6	6,5	4,6	4,4	4,5	4,2	5,2
	Rg	16,9	15,1	15,9	14,8	15,6	16,5	17,8	17,3	15,1	14,3	14,2	13,7	15,6
Rafael Escobar	BS	6,4	5,0	4,7	5,0	4,7	5,3	6,2	6,6	4,9	5,1	4,8	4,9	5,3
	Rg	18,3	17,3	17,2	17,4	16,5	16,5	17,5	18,4	17,1	17,2	16,1	15,8	17,1
Santa Helena	BS	4,3	2,9	2,8	3,1	4,2	4,2	6,0	6,3	4,4	4,1	3,6	3,0	4,1
	Rg	12,9	11,7	11,8	11,6	13,3	13,1	15,3	16,1	13,8	13,1	12,0	11,1	13,0
Santa Bárbara	BS	4,4	3,3	2,9	3,1	3,4	3,7	4,6	4,6	3,6	4,1	3,8	3,3	3,7
	Rg	14,5	13,9	13,5	13,8	14,5	14,0	16,0	14,6	13,9	15,2	14,0	13,3	14,3
La Trinidad	BS	3,7	3,4	3,4	3,3	3,7	4,3	5,5	6,3	4,3	4,4	3,3	3,2	4,1
	Rg	13,5	13,7	14,3	14,0	14,1	14,9	16,6	18,1	15,8	15,5	13,2	12,6	14,7
Albán	BS	4,1	3,7	3,6	3,8	3,8	4,4	5,2	5,6	4,1	4,2	3,2	3,0	4,1
	Rg	13,4	13,4	14,7	15,2	14,9	15,5	16,7	16,7	15,0	14,4	12,7	12,2	14,6
La Catalina	BS	5,5	4,4	4,1	3,6	3,5	4,0	5,1	5,5	3,8	4,4	4,0	4,3	4,3
	Rg	17,0	16,3	15,6	15,2	14,3	15,0	16,2	17,0	15,2	15,9	14,9	14,6	15,6
Maracay	BS	5,1	4,1	4,0	3,6	3,6	3,9	5,2	5,9	3,8	4,4	3,6	3,7	4,2
	Rg	15,3	14,7	15,0	14,3	13,7	14,0	15,5	16,4	14,3	15,0	13,4	13,2	14,6
Paraguaicito	BS	5,5	4,6	4,2	3,8	3,8	4,1	5,1	5,4	3,8	4,4	4,0	4,1	4,4
	Rg	16,8	16,2	16,4	15,9	14,5	14,9	16,1	16,4	15,6	15,8	14,6	14,0	15,6
La Sirena	BS	4,0	3,4	3,0	3,0	3,0	3,5	4,5	5,2	3,5	3,7	3,1	3,6	3,6
	Rg	13,2	12,8	12,8	12,9	12,7	13,2	14,3	15,1	13,2	12,8	11,8	12,0	13,1
Manuel Mejía	BS	5,1	4,7	4,2	3,9	4,0	3,5	5,4	6,3	4,2	4,6	3,6	4,4	4,5
	Rg	16,0	16,1	16,2	15,8	14,8	14,8	16,1	17,3	15,2	16,2	14,1	14,9	15,6
Jorge Villamil	BS	4,2	3,3	2,7	2,8	2,6	3,0	2,8	3,3	3,4	3,5	3,2	3,3	3,2
	Rg	15,3	14,1	13,2	13,8	13,2	14,2	13,9	14,4	15,0	14,7	14,3	13,9	14,2
Ospina Pérez	BS	4,4	3,9	3,5	3,7	3,7	4,4	5,2	6,1	4,6	5,1	4,3	4,4	4,4
	Rg	14,9	14,3	14,3	14,5	14,2	13,9	15,5	16,7	15,7	16,6	15,3	14,9	15,1



la altitud, la radiación disminuye entre un 10% a un 12%. Las nubes tienen una influencia importante en la cantidad de radiación solar que recibe la superficie terrestre, siendo las nubes densas las que bloquean más radiación que las nubes delgadas (Ideam, 2005).

Relación entre la radiación directa y la difusa

Al estudiar la radiación solar es necesario conocer las proporciones diarias de la radiación directa y difusa que inciden en una región, para su aplicación en la productividad de los cultivos o para la utilización en el diseño de secadores de productos agrícolas y sistemas de calentamiento del aire y del agua, entre otros usos.

Para las condiciones de la sabana de Bogotá-Colombia, Aragón *et al.* (1996), calcularon las expresiones para estimar la radiación difusa a partir de los valores de transmisividad (Figura 28).

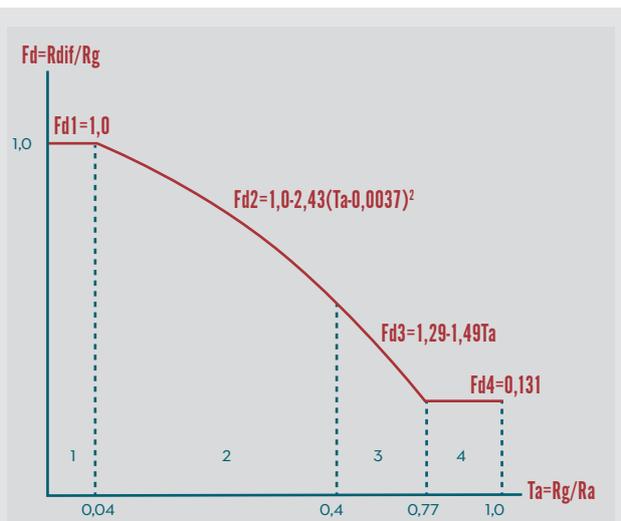


Figura 28. Relación entre la fracción de radiación difusa (R_{difusa}/R_{global}) y la transmisividad atmosférica ($R_{global}/R_{astronómica}$) para las condiciones de Colombia (Aragón *et al.*, 1996).

Como se observa la proporción de la radiación difusa puede presentar relaciones de tipo lineal o cuadrático, dependiendo del rango de transmisividad atmosférica que se presente en el día. Estas expresiones pueden ser utilizadas para las condiciones de la región Andina de Colombia.

Balances de radiación solar y de energía en una cuenca hidrográfica

La radiación solar es empleada por las comunidades vegetales principalmente en evaporar el agua, calentar el aire, calentar el suelo y una poca proporción en el proceso de la fotosíntesis, entre otros.

Las tasas de evapotranspiración son mayores en un bosque que en un área deforestada, se estima que la cuenca hidrográfica del río Amazonas la evapotranspiración emplea alrededor del 50% de la radiación solar y en situaciones particulares puede utilizar el 80%. Se considera que por una tala masiva del bosque, según la proporción anterior la cantidad de lluvia decrecería entre un 10% y 20%, generando cambios sustanciales en el régimen hidrológico de la Amazonia y de las áreas circunvecinas.

En el interior de un bosque el calentamiento del aire es menor, debido a que la radiación es reflejada por la parte superior y absorbida en las capas superficiales de la parte aérea (95%), quedando una proporción muy pequeña de radiación solar disponible para calentar el aire y el suelo, explicando así las menores diferencias entre la temperatura registrada en el día y en la noche.

En las superficies sin vegetación, la mayor proporción de la radiación solar se emplea en calentar el suelo y el aire, ocurriendo grandes diferencias entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, por ejemplo, en un desierto, la temperatura del aire puede variar

desde 2°C en la noche a 45°C en el día. En estas condiciones se utiliza alrededor del 93% de la radiación solar incidente.

Balance de radiación solar en los cultivos

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo está determinada en primer término por el macroclima de la región, las condiciones de nubosidad que a su vez determinan las cantidades de radiación directa y difusa, y por las propiedades del follaje como son el tamaño y disposición de las hojas, estructura de la planta, distancia de siembra, que determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo.

Un balance de radiación dentro de un cafetal a libre exposición solar indica que el 15% de la radiación es reflejada por el cultivo (albedo), un 75% es retenido por la planta y un 10% incide en la superficie del suelo. Las proporciones anteriores varían con el manejo del cultivo, las distancias de siembra, entre otras variables. Los valores encontrados para cafetales a libre exposición solar son semejantes a los medidos en otros cultivos como papa, pasto, caña de azúcar (Montieth, 1969) y los medidos en bosques, manzanos y cítricos (Jarvis *et al.*, 1976; Landsberg *et al.*, 1973; Proctor *et al.*, 1972; Stanhill, *et al.*, 1966) los cuales se hallan entre el 10% y 20%.

Las comunidades vegetales presentan un sistema de capas sucesivas de hojas parcialmente superpuestas y sombreadas unas con otras. La luz incidente es absorbida progresivamente al pasar a través de las capas. Debido a la heterogeneidad de la arquitectura de la planta, el estudio de la transferencia de radiación solar dentro del follaje es difícil de explicar y por tal razón se tiende a considerar simplificaciones; una generalización muy aceptada considera el follaje horizontal uniforme y establece que las características de su

disposición foliar y de radiación no cambian dentro de las capas horizontales y solamente dependen del índice de área foliar (Jaramillo, 1986) (Figura 29).

Uno de los primeros modelos utilizados para explicar la radiación solar dentro de los cultivos fue el propuesto por Monsi y Saeki (Saeki, 1993), el cual considera que el logaritmo de la radiación relativa a una determinada altura dentro de la comunidad vegetal decrece linealmente con el incremento del índice de área foliar acumulado (Ecuación <13>).

$$I_a = -dl/dL = [1,0-\alpha] * I_o * e^{-k * L} <13>$$

Donde:

I_a: radiación fotosintéticamente activa (RFA) dentro de la planta, hasta un índice de área foliar acumulado desde la parte superior de la planta ($Jm^{-2}hoja s^{-1}$).

dl/dL: flujo de radiación fotosintéticamente activa por unidad de área foliar.

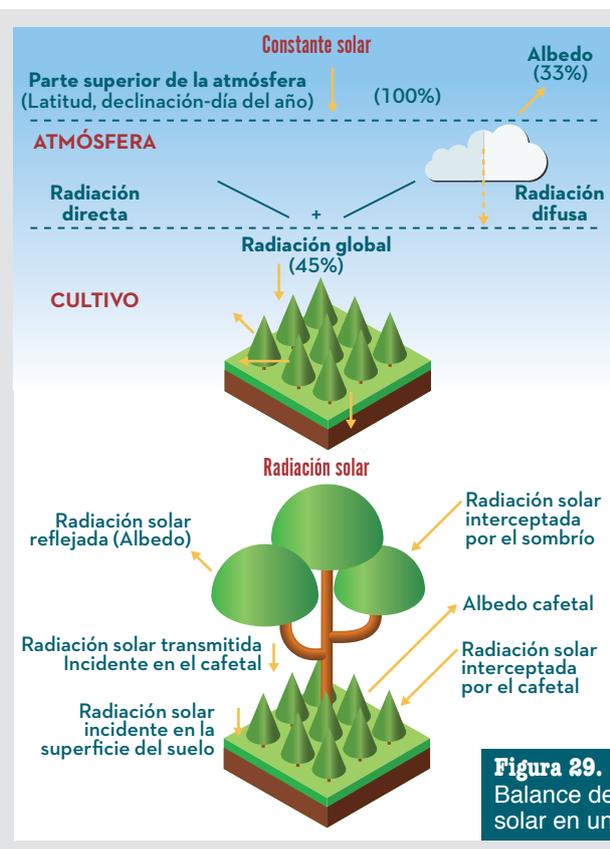


Figura 29. Balance de radiación solar en un cafetal.

- α : albedo.
- I_o : radiación fotosintéticamente activa incidente en la parte superior del cultivo, ($Jm^{-2} \text{ hoja } s^{-1}$).
- L : índice de área foliar del cultivo ($m^2 \text{ hojas} \cdot m^{-2} \text{ suelo}$).
- K : coeficiente de extinción o tasa de absorción solar de la radiación por la planta.

En la Figura 30, se observa el comportamiento de la radiación solar dentro de un árbol de café de la variedad Catuai.

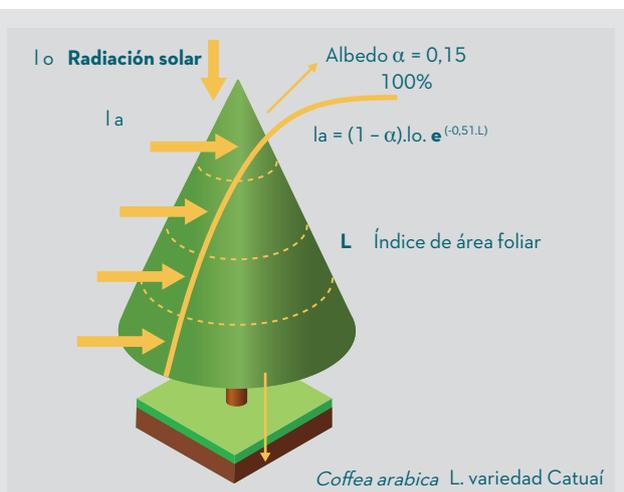


Figura 30. Variación de la radiación solar en el árbol de café (Jaramillo y dos Santos, 1980).

El coeficiente de extinción (k) de un cultivo determina la tasa a la cual la radiación solar es absorbida por unidad de área foliar. Existen diferentes coeficientes de extinción para la *radiación directa y difusa* (Castillo *et al.* 1996, 1997).

En caso de tener plantas distribuidas en el campo, cuyos doseles no son continuos, se emplea el modelo de Jackson y Palmer, citado por Castillo *et al.* (1996) como se presenta en la Ecuación <14>:

$$T = T_i + [1 - T_i] e^{-k} * L' <14>$$

- Donde:
- T : transmisividad total.
- T_i : flujo de RFA transmitida directamente al suelo, entre los árboles.
- $1 - T_i$: radiación transmitida a través del dosel.
- L : índice de área foliar (área de hojas/ área de terreno).
- L' : $L / [1 - T_i]$

La tasa de absorción de energía debida al follaje (coeficiente de extinción, k) estimado en el modelo de Monsi y Saeki, tiende a ser mayor en especies de hoja ancha y relativamente horizontales (k entre 0,6 y 0,9) y a presentar menores valores en especies de hojas pequeñas y erectas (k entre 0,3 y 0,5).

En árboles de café de la variedad Catuai y para las condiciones de Brasil, Jaramillo y dos Santos, (1980) encontraron un valor para el coeficiente de extinción de 0,51. En observaciones realizadas en Chinchiná - Colombia- Castillo *et al.* (1997), aplicaron el modelo de Monsi y Saeki para la Radiación Fotosintéticamente Activa (400 a 700 nm, RFA) estimando coeficientes de extinción (k), entre 0,41 y 0,60 para la radiación difusa y valores de 0,51 a 0,72 para la radiación directa (Tabla 14).

La proporción de radiación solar retenida por los árboles de café está próxima al 75% para valores diarios. La transmisividad e interceptación de la radiación solar están modificados por las ramas y los frutos presentes en el árbol, por el grado de defoliación, el estado vegetativo, la edad de la planta, la disposición de hojas y ramas y la distancia de siembra. Para densidades de siembra de 10.000 plantas/ha de café variedad Colombia de 3,5 años se encontró una interceptación del 97% (Castillo *et al.*, 1997).

La capa externa de hojas en un árbol de café absorbe la mayor proporción de la radiación solar incidente, por ejemplo, en árboles de café de la variedad Borbón amarillo el primer estrato de hojas interceptó el 93% de la radiación incidente en la parte externa (Jaramillo y dos Santos, 1980).

La proporción de radiación incidente en la superficie del suelo de una plantación de café con alta densidad de siembra y cobertura total sobre el terreno es muy baja, los valores medidos varían entre 6% y 16% del total de la radiación incidente en la parte externa del cultivo.

Balance de energía en un cultivo

El balance de energía en el cultivo permite conocer la manera como las plantas o el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta en sus diferentes componentes. Los balances de radiación son aplicables a la atmósfera, la superficie terrestre, la superficie del océano, en la planta o en la hoja. La expresión que representa un balance de energía se presenta en la Ecuación <15> (Rosenberg, 1974):

$$Rn = H + \lambda E + G + P + M \quad <15>$$

Rn: radiación neta.

H: flujo de calor sensible, energía radiante utilizada en calentar el aire.

λE : flujo de calor latente, energía que se emplea para la evaporación del agua (λ , Calor latente de evaporación. *E*, es la cantidad de agua evaporada).

G: flujo de calor en el suelo. Energía que se utiliza para calentar el suelo.

P, *M*: representa la energía para la fotosíntesis y otros intercambios energéticos (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta).

La radiación neta en un cultivo se usa principalmente en el calentamiento del aire (flujo de calor sensible, *H*), en evapotranspiración (flujo de calor latente, λE , λ es el calor latente de vaporización del agua que equivale a 2.442 J g⁻¹ a 25°C) y en el calentamiento del suelo (flujo de calor en el suelo, *G*). Se incluyen además los componentes de la productividad primaria como son la fotosíntesis (*F*) y la respiración (*R*). En el proceso de la fotosíntesis las plantas utilizan una proporción muy pequeña del total de la radiación neta (aproximadamente entre 1% a 5%).

Tabla 14.
Coeficientes de extinción (*k*) de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RAF) en *Coffea arabica* L. para diferentes densidades de siembra (Castillo *et al.*, 1997)

Plantas/ha	Coeficiente de extinción		
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación global
2.500	0,51	0,41	0,46
5.000	0,56	0,47	0,48
7.500	0,72	0,57	0,60
10.000	0,63	0,60	0,60
12.500	0,61	0,60	0,61

El componente *calor sensible* se utiliza para describir el proceso de transferencia de calor de un medio a otro por conducción y convección. El calor es transferido de un medio más caliente a un medio más frío; debido a que el aire es un mal conductor de calor, la convección es mucho más importante que la conducción para transferir calor dentro de la atmósfera.

El calor latente o el calor de cambio de estado es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Para el agua el calor de fusión es de 0,33 MJ kg⁻¹ (80 cal g⁻¹) a 0°C y el de vaporización de 2,50 MJ kg⁻¹ (539 kcal kg⁻¹) a 100°C.

En ambientes húmedos donde el agua no limita la evapotranspiración, la mayoría de la radiación neta es usada para evaporar el agua; para las regiones desérticas con disponibilidad de agua limitada, la radiación se emplea en su mayor proporción en calentar el aire o el suelo. Los balances de energía realizados en la región amazónica en la estación cálida y húmeda indican que entre el 80% y 90% de la radiación solar se utiliza en el proceso de evapotranspiración (Schubart y Salati, 1982).

En medidas realizadas en Cenicafé dentro de cafetales de *Coffea arabica* L., se estimó que

un 67% de la radiación neta se emplea en la evapotranspiración, un 30% en calentar el aire circundante y un 3% en calentar el suelo (Escobar y Jaramillo, 1983, Jaramillo, 1986; Jaramillo y Escobar, 1984) (Figura 31).

En la Tabla 15 se presentan los porcentajes de energía empleada para diferentes coberturas del suelo (pasto, cafetal y bosque). Los valores de evapotranspiración hallados están entre el 64% y 71%, el calentamiento del aire próximo al 26% y el calentamiento del suelo entre 3% y 10%. Los diferentes valores encontrados en los balances de energía estimados están indicando condiciones de ambiente húmedo (Ramírez y Jaramillo, 2009).

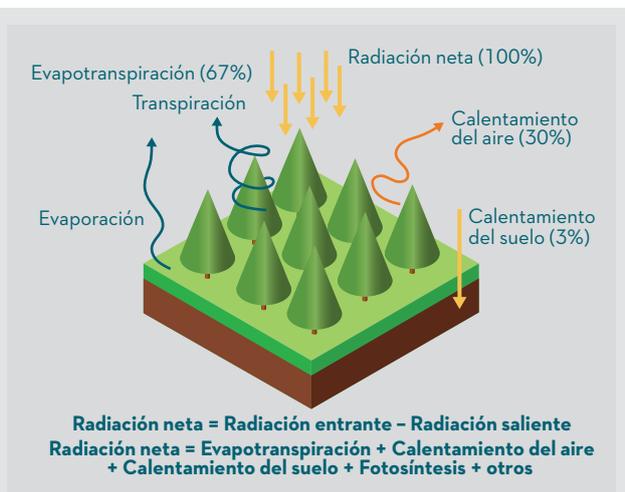


Figura 31. Balance de energía en un cafetal. (Jaramillo y Escobar, 1984).

Índice Normalizado de Vegetación

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés), es una relación usada para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición con sensores remotos, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético de la vegetación.

La reflectancia en la vegetación viva es mucho más baja en la región del rojo (580 – 680 nm) que en el infrarrojo cercano (730 – 1.100 nm), mientras que la reflectancia en la vegetación muerta o el suelo desnudo, es más alta en el rojo y más baja en el infrarrojo cercano (Figura 32).

Estas diferencias permiten distinguir estos dos tipos de cobertura terrestre con relativa facilidad y además estimar variables de interés ecológico como son la biomasa, la productividad, el índice de área foliar y el porcentaje de cobertura vegetal (China, 2002), mediante el Índice Normalizado de Diferencias en la Vegetación (NDVI) según la Ecuación <16>:

$$NDVI = (Infrarrojo\ cercano - rojo) / (Infrarrojo\ cercano + rojo) <16>$$

El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el 0 y el 1,0; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. Los valores de este índice

Tabla 15. Balances de energía asociados a diferentes coberturas (Ramírez y Jaramillo, 2009).

Cobertura	Porcentaje de energía empleada		
	Evapotranspiración	Calentamiento del aire	Calentamiento
Pasto	64	26	10
Cafetal	70	27	3
Bosque	71	26	3

varían entre $-1,0$ y $+1,0$; en general, las áreas con vegetación verde presentan valores altos, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a mostrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo presentan valores cercanos a cero.

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación

del índice debe así mismo considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores.

Para las condiciones de Colombia el Índice Normalizado de Vegetación presenta una alta correlación (0,7 a 0,9) con el Índice de Oscilación del Sur, indicando una disminución de la actividad vegetal durante los eventos de El Niño (Poveda *et al.*, 2000, 2001).

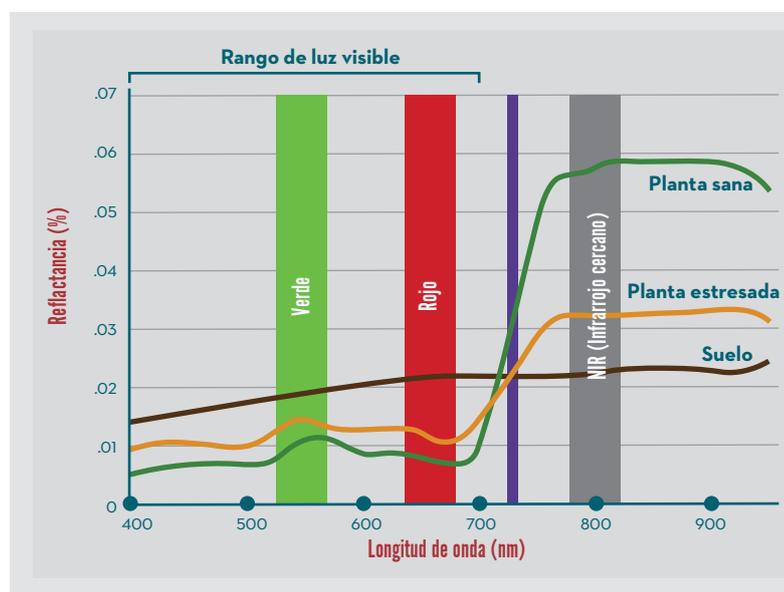


Figura 32. Reflectancia de plantas sana, con estrés y en el suelo.



La temperatura





El calentamiento de la atmósfera es el resultado del balance entre la radiación entrante y saliente de la superficie terrestre y el balance de la propia atmósfera. La mayor cantidad de la radiación solar incidente es absorbida por la parte superficial del suelo, y como consecuencia, el aire en contacto con ella se calienta. Por la noche, una cantidad considerable de calor se emite desde la superficie del suelo y origina un enfriamiento en la parte más superficial del mismo.

Entre los factores que afectan la temperatura del aire están la latitud, la altitud, la distribución de los continentes y los océanos, las corrientes oceánicas, los vientos dominantes, la nubosidad, las barreras montañosas, la naturaleza de la superficie, el relieve, la convección y la turbulencia entre otras (Murthy, 2002).

Algunas de las grandes masas atmosféricas que predominan en diversas regiones de la Tierra son:

Marítima tropical: Se originan sobre los océanos tropicales, son calientes y húmedas.

Continental polar: Se originan sobre las altas latitudes continentales, cerca de los 60° Norte, son masas frías y secas.

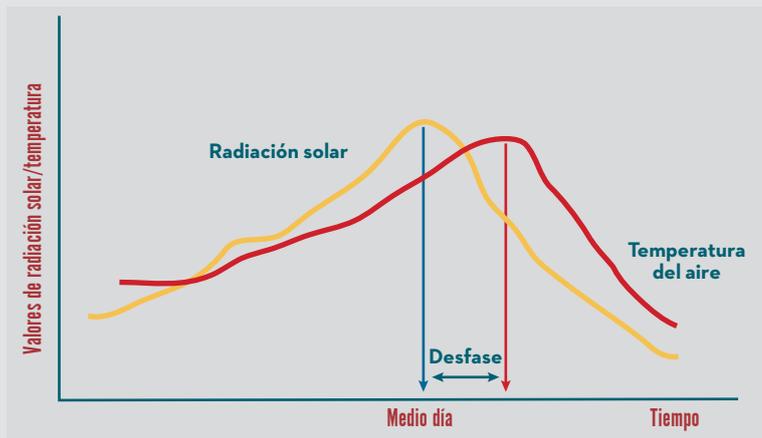
Marítima polar: Se originan sobre las latitudes medias y altas del océano. Son masas de aire frías y húmedas.

El ciclo diario del calentamiento y enfriamiento del suelo bajo la acción de la radiación del sol, así como la mezcla de masas de aire, modifican la temperatura del aire en función de la altura. La tendencia de la variación diaria de la temperatura del aire sigue de cerca al ciclo del balance de radiación, pero con un desfase temporal (Figura 33). La temperatura máxima se observa después del mediodía y la mínima un poco antes de la salida del sol.

Las horas de entrada de la temperatura mínima y máxima dependen de las condiciones de radiación y nubosidad, entre otros. Como ejemplo, en la Figura 34

Figura 33.

La radiación solar y la respuesta de la temperatura del aire durante el día.



se presenta la hora de ocurrencia de las temperaturas máxima y mínima registradas en el 2011 en Cenicafé-Manizales-Caldas: Las horas de ocurrencia de la temperatura mínima presentan su mayor frecuencia entre las 5:00 y 6:00 de la mañana, sin embargo, estas pueden ocurrir desde la 1:00 a las 9:00 de la mañana. La hora de mayor frecuencia de la temperatura máxima ocurre a las 15:00 horas, pero pueden registrarse temperaturas máximas entre las 9:00 de la mañana y las 5:00 de la tarde, dependiendo de los niveles de radiación solar.

En las estaciones climáticas la temperatura del aire se mide dentro de casetas ventiladas (pantallas de Stevenson) a 2 m de altura, sobre una superficie de pasto verde de altura uniforme y cubriendo totalmente la superficie del suelo (Allen *et al.*, 2006).

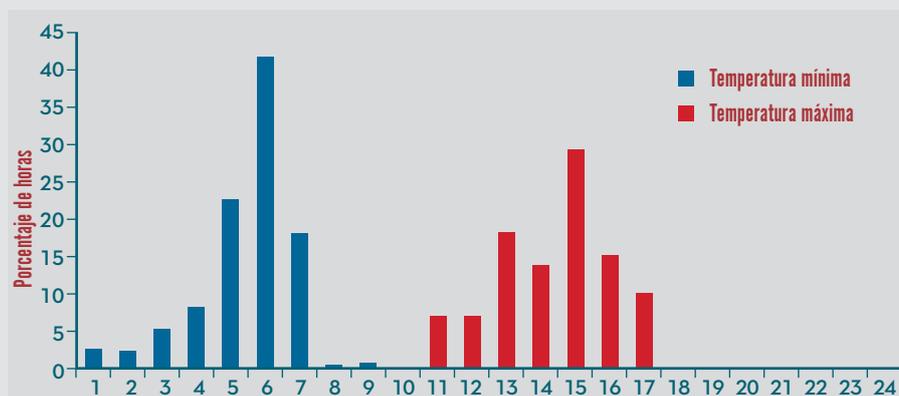
Variación de la temperatura con la latitud

Entre la región Ecuatorial y los polos se presenta una variación latitudinal de la temperatura relacionada con la disponibilidad de la radiación solar. El gradiente latitudinal de la temperatura no es significativo en la zona tropical, presenta un valor cercano a 1°C por 1.000 km de arco de latitud y es particularmente válido para la franja comprendida entre los 5° Sur y 10° Norte; en las zonas subtropicales esta variación está alrededor de 5°C por 1.000 km.

En Colombia, entre los 3° y 7° de latitud Norte se localiza una franja denominada el Ecuador

Figura 34.

Horas de ocurrencia de la temperatura mínima y máxima en Cenicafé, año 2011.



climático, región que determina una división térmica entre los hemisferios Norte y Sur (Trojer, 1968).

En la región Tropical y en ella Colombia, la temperatura del aire para una misma altitud presenta muy poca variación en el transcurso del año; la temperatura media del mes más frío difiere poco de la registrada en el mes más caliente. En la Tabla 16 se presentan la temperatura media, máxima media, mínima media y la amplitud térmica para algunas localidades de la zona cafetera de Colombia.

Variación de la temperatura con la altitud

La temperatura del aire varía con la altitud, a mayor altitud la temperatura es menor. Los gradientes altitudinales estimados de las temperaturas media, máxima media y mínima media para las diferentes regiones de Colombia se presentan en las Tablas 17 y 18.

En Colombia, para una misma altitud la temperatura media del aire de las vertientes orientadas hacia las grandes llanuras (Atlántica, Pacífica, Llanos Orientales) es inferior a la registrada en los valles interandinos; los gradientes de temperatura para la región Andina presentan un mayor valor (0,61°C por 100 m) cuando se comparan con las regiones Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia (0,55 a 0,58°C por 100 m).

Para Colombia los gradientes altitudinales por cada 100 m para la temperatura media varían entre 0,55 y 0,61°C, para la temperatura máxima entre 0,54 y 0,62°C y para la temperatura mínima entre 0,59 y 0,61°C.

Las expresiones anteriores permiten para un lugar determinado, calcular con gran confiabilidad la temperatura media, máxima media y mínima media, a partir de la altitud sobre el nivel del mar, para las cinco grandes regiones naturales de Colombia: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia.

Al comparar la temperatura media para una misma altitud de las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena con la vertiente Caribe es más fría en -1,1°C, las vertientes Amazónica y Orinoquia en -1,6°C y la región Pacífica en -1,9°C. La observación anterior concuerda con lo reportado por Cortés (1989) y Stanescu y Díaz, (1971), quienes encontraron que las regiones Atlántica, Pacífica y Llanos Orientales presentan para una misma altitud, una temperatura media entre 1,5 y 2,0°C más baja que la registrada en los valles interiores de la zona Andina (Chaves y Jaramillo, 1998).

Amplitud térmica

La amplitud térmica se refiere a la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima del día y su magnitud varía con las condiciones de la radiación solar que se presenten (Figura 35).

En algunas regiones de la zona andina pueden presentarse amplitudes diarias medias hasta de 13°C (Bertha-Moniquirá-Boyacá), con valores frecuentes por encima de los 9°C. Un ejemplo de la variación de la amplitud térmica con la altitud se observa en la vertiente Occidental de la cordillera Central, en la cuenca del río Chinchiná, donde los mayores cambios entre el día y la noche ocurren en la zona baja, a una altitud de 1.000 m con 11,3°C, mientras que en la zona alta a 3.684 m la amplitud térmica es de 6,5°C (Figura 36).

Inversión térmica

Normalmente, la temperatura del aire disminuye con la altura, este sería el gradiente térmico normal; pero bajo determinadas condiciones orográficas y climatológicas este gradiente puede alterarse, de tal manera que a una determinada altura la temperatura del aire es mayor con la altura (Figura 37). El problema que esto crea es impedir la dispersión vertical de los humos y de otros contaminantes enviados a la atmósfera por las industrias, calefacciones, motores de explosión y actividades urbanas.

Tabla 16.

Temperatura del aire (°C) para algunas localidades de la zona cafetera de Colombia (Cenicafé, 2017).

Estación	Municipio	Temperatura (°C)				
		Altitud (m)	Máxima	Mínima	Media	Amplitud térmica
Antioquia						
El Trapiche	Bolívar	1.277	28,6	17,3	21,8	11,3
Cocorná	Cocorná	1.344	25,8	17,3	21,2	8,5
Piamonte	Fredonia	1.330	25,9	15,9	20,5	10,0
Jardín	Jardín	1.800	21,1	13,4	16,2	7,7
Miguel Valencia	Jardín	1.621	25,7	14,9	19,1	10,8
Virgen de Oro	Támesis	1.656	24,3	16,3	20,1	7,9
El Rosario	Venecia	1.635	24,9	16,2	20,1	8,8
Boyacá						
Bertha	Moniquirá	1.677	26,1	13,1	18,7	13,0
Caldas						
Cenicafé	Chinchiná	1.310	27,6	16,8	21,0	10,9
Naranjal	Chinchiná	1.381	26,8	16,6	20,9	10,3
El algarrobo	Manizales	1.202	28,3	16,8	21,5	11,5
Planalto	Manizales	1.413	26,6	16,6	20,8	10,0
Llanadas	Manzanares	1.420	25,7	15,7	19,8	10,0
Santa Helena	Marquetalia	1.395	24,0	17,1	20,2	7,0
Granja Luker	Palestina	1.031	29,3	17,9	22,9	11,4
Santágueda	Palestina	1.026	29,7	17,8	22,9	11,8
Rafael Escobar	Supía	1.307	27,8	17,4	22,0	10,4
Cauca						
Manuel Mejía	El Tambo	1.735	24,0	14,3	18,5	9,7
La Trinidad	Piendamó	1.671	24,7	15,0	19,1	9,7
La Florida	Popayán	1.850	24,3	13,0	17,7	11,3
Cesar						
Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	27,2	15,6	21,0	11,6
Cundinamarca						
Mesitas de Sta Inés	Cachipay	1.340	25,1	16,7	20,4	8,4
Santa rosita	El Peñón	1.437	25,8	16,5	20,3	9,3
Misiones	Mesitas del Colegio	1.540	23,8	17,2	20,0	6,6
Santa Bárbara	Sasaima	1.478	25,5	16,1	20,2	9,4
Granja Tibacuy	Tibacuy	1.538	24,0	15,5	19,3	8,4
Montelíbano	Yacopí	1.365	25,1	17,0	20,4	8,1
Huila						
Jorge Villamil	Gigante	1.420	24,5	16,2	19,7	8,3
Magdalena						
Jirocasaca	Santa Marta	710	27,8	19,8	22,9	8,0
La Victoria	Santa Marta	1.100	26,7	19,8	22,1	7,0

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Temperatura (°C)				
		Altitud (m)	Máxima	Mínima	Media	Amplitud térmica
N. de Santander						
Blonay	Chinácota	1.250	26,1	15,7	20,0	10,4
G M Barriga	Convención	1.261	25,4	17,0	20,4	8,4
Francisco Romero	Salazar	903	27,8	17,6	21,9	10,2
Nariño						
Ospina Pérez	Consacá	1.603	25,0	15,1	19,2	9,8
El Sauce	La Unión	1.609	25,7	16,1	19,9	9,6
Quindío						
Apto el Edén	Armenia	1.204	28,0	16,5	22,2	11,5
El Sena	Armenia	1.550	24,0	14,1	18,6	9,9
Paraguaicito	Buenavista	1.203	28,1	16,9	21,7	11,2
La Bella	Calarcá	1.449	25,7	16,0	20,4	9,6
El Agrado	Montenegro	1.275	28,0	16,9	21,7	11,2
La Esperanza	Pijao	1.667	24,3	15,3	19,3	9,0
Maracay	Quimbaya	1.402	26,6	16,3	20,7	10,3
Risaralda						
Ospirma	Guática	1.661	25,1	15,4	19,2	9,7
Apto Matecaña	Pereira	1.242	27,5	16,2	21,9	11,3
El Pílamó	Pereira	1.113	29,0	17,8	22,4	11,2
La Bohemia	Pereira	950	30,2	18,1	23,6	12,0
La Catalina	Pereira	1.321	27,2	17,3	21,5	9,9
La Joya	Pereira	1.250	28,3	16,4	21,6	12,0
El Jazmín	Santa rosa	1.635	24,5	15,4	19,4	9,1
Santander						
San Antonio	Floridablanca	1.539	23,8	16,9	19,6	6,9
El Roble	Los Santos	1.646	24,8	14,6	19,2	10,2
Alberto Santos	Socorro	1.499	26,7	15,9	20,6	10,8
Tolima						
El Limón	Chaparral	990	29,4	18,3	22,8	11,1
La Montaña	Dolores	1.296	25,1	17,0	20,8	8,2
Tricontinental	Fresno	1.269	25,6	17,9	21,4	7,6
Chapetón	Ibagué	1.353	25,6	16,1	20,4	9,5
La Primavera	Ibagué	1.300	26,5	18,1	21,9	8,4
La Trinidad	Líbano	1.456	24,6	16,4	20,1	8,2
Los Andes	Planadas	1.405	25,3	16,9	20,4	8,4
El Tucuy	Villarrica	1.452	25,6	17,4	20,6	8,3
Valle						
Arturo Gómez	Alcalá	1.259	27,4	16,6	21,3	10,8
Venecia	Caicedonia	1.168	28,7	17,5	22,4	11,2

Continúa...



...continuación

Estación	Municipio	Temperatura (°C)				
		Altitud (m)	Máxima	Mínima	Media	Amplitud térmica
Albán	El Cairo	1.510	25,0	15,6	19,5	9,3
Julio Fernández	Restrepo	1.381	25,7	16,4	19,9	9,3
Heraclio Uribe	Sevilla	1.540	23,9	15,6	19,2	8,3
La Sirena	Sevilla	1.519	25,3	16,7	20,3	8,6
Manuel M. Mallarino	Trujillo	1.331	26,2	16,8	20,9	9,4

Tabla 17.

Relación entre la temperatura media del aire (T_m , °C) y la altitud (A , m) en algunas regiones de Colombia (Chaves y Jaramillo, 1998).

Región		Expresión	Rango altitud (m)
Pacífica	< 3° N	$T_m = 26,97 - 0,0057 A$	2 - 1.181
	3° - 5° N	$T_m = 27,11 - 0,0059 A$	7 - 1.850
	5° - 8° N	$T_m = 27,08 - 0,0056 A$	2 - 1.790
Nudo de los Pastos - Meseta de Popayán		$T_m = 29,45 - 0,0062 A$	880 - 3.087
Oriente de Colombia (Amazonia y Orinoquia)	< 3° N	$T_m = 27,51 - 0,0062 A$	200 - 3.600
	3° - 5° N	$T_m = 27,37 - 0,0058 A$	150 - 2.500
	>5° N	$T_m = 27,35 - 0,0058 A$	120 - 4.000
Cuenca del río Cauca	2° - 5° N	$T_m = 29,40 - 0,0061 A$	915 - 4.200
	5° - 7° N	$T_m = 29,38 - 0,0061 A$	120 - 4.400
Cuenca del río Magdalena	3° - 4° N	$T_m = 29,56 - 0,0061 A$	231 - 4.482
	4° - 7° N	$T_m = 29,46 - 0,0061 A$	100 - 2.825
Región Cundinamarca/Boyacá		$T_m = 29,35 - 0,0061 A$	250 - 3.000
Región Atlántica		$T_m = 27,72 - 0,0055 A$	2 - 4.000

Tabla 18.

Gradientes altitudinales de la temperatura media, máxima y mínima (°C) para las cinco grandes regiones de Colombia (Chaves y Jaramillo, 1998).

Región	Expresión	Rango de altitud (A), (m)
Andina	$T_m=29,42 - 0,0061A$ $T_{max}=33,97 - 0,0058A$ $T_{min}=23,97 - 0,0059A$	100 a 4.480
Amazonia y Orinoquia	$T_m=27,37 - 0,0057A$ $T_{max}=32,13 - 0,0054A$ $T_{min}=22,63 - 0,0059A$	120 a 4.000
Atlántica	$T_m=27,72 - 0,0055A$ $T_{max}=33,06 - 0,0062A$ $T_{min}=23,10 - 0,0061A$	2 a 4.000
Pacífica	$T_m=27,05 - 0,0057A$	2 a 1.850

El fenómeno de inversión térmica se presenta cuando en las noches despejadas el suelo ha perdido calor por radiación y las capas de aire cercanas a él se enfrían más rápido que las capas superiores de aire; esto provoca que la capa de aire caliente quede atrapada entre las dos capas de aire frío sin poder circular.

La inversión térmica se presenta normalmente en las mañanas frías sobre los valles de escasa circulación de aire, en todos los ecosistemas terrestres. Este fenómeno también se presenta en las cuencas cercanas a las laderas de las montañas en noches frías, debido a que el aire frío de las laderas desplaza al aire caliente de la cuenca, provocando el gradiente positivo de temperatura.

La temperatura del suelo

La superficie del suelo, con o sin vegetación, es el principal receptor de la radiación solar, siendo a la vez un emisor de radiación de onda larga. La temperatura del suelo está influenciada por los elementos meteorológicos y por factores del suelo, como son: la radiación solar, el viento, la evaporación, la condensación, la lluvia, la textura del suelo, la materia orgánica, la labranza del suelo y la humedad del suelo.

La temperatura del suelo influye en el crecimiento de los cultivos; está relacionada con los procesos como la toma de agua y de nutrientes, controla la actividad microbiana, la germinación de las semillas, el crecimiento de las raíces, la presencia de la materia orgánica, la velocidad de las reacciones y, por lo tanto, la meteorización (Murthy, 2002).

La temperatura del suelo dentro de los bosques en condiciones tropicales presenta poca estacionalidad y escasa fluctuación diaria; gran parte del efecto amortiguador de la cobertura forestal en la temperatura del suelo se debe a la capa de hojarasca.

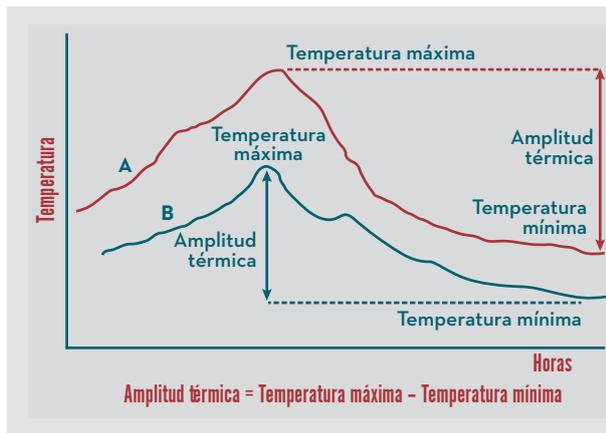


Figura 35. Amplitud térmica.

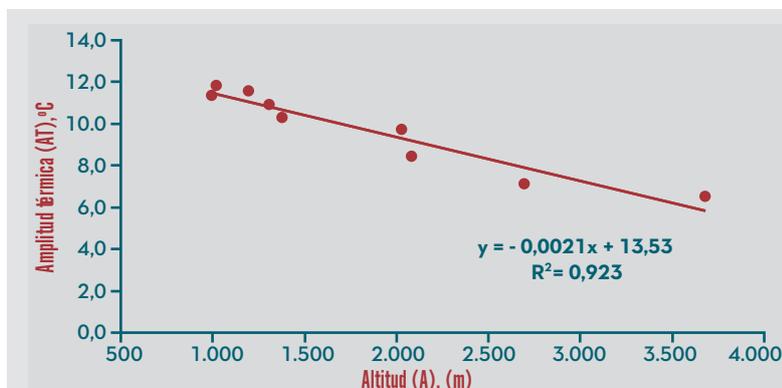


Figura 36. Variación de la amplitud térmica con la altitud para la cuenca del río Chinchiná-Caldas.

La temperatura interanual del suelo. Durante el año, la temperatura del suelo sigue un comportamiento similar a la temperatura del aire, como se observa en el comportamiento de las temperaturas máxima y la mínima, a 10 cm de profundidad (Figura 38).

Variación de la temperatura del suelo con la profundidad

La temperatura del suelo, tal como sucede con el aire, presenta variaciones diurnas apreciables desde la superficie hasta 25 cm de profundidad, determinadas por la radiación solar disponible, la cantidad y

Figura 37. Condición normal y de inversión térmica (<http://www.comet.ucar.edu/>)

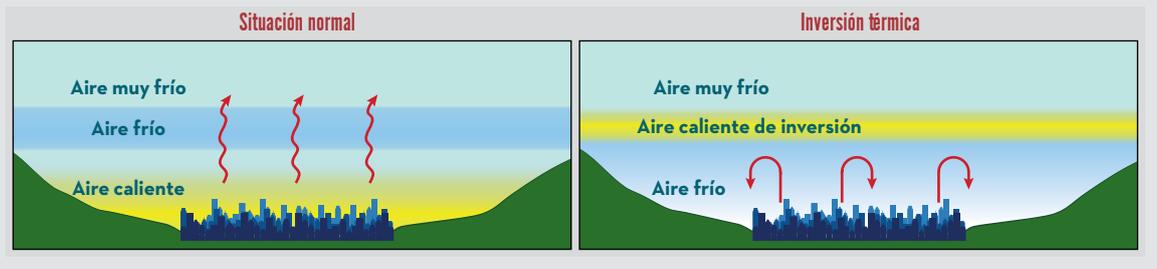


Figura 38. Comportamiento de la temperatura máxima y mínima del suelo, a 10 cm de profundidad (Jaramillo y Gómez, 1974).

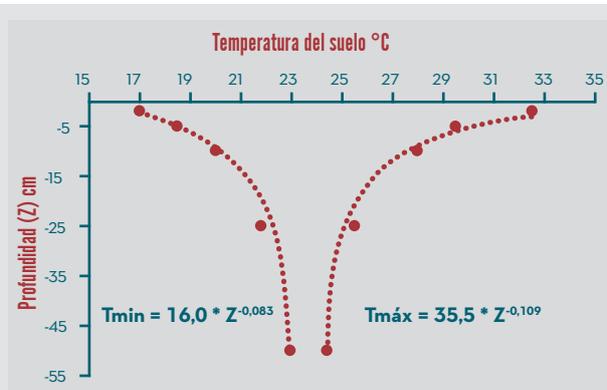
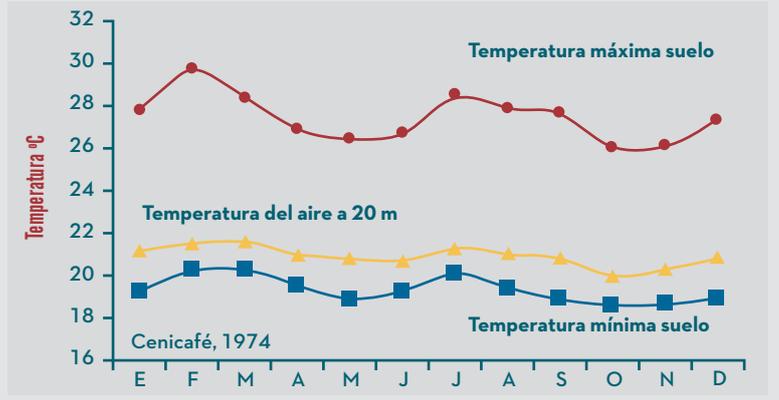


Figura 39. Variación de las temperaturas máxima y mínima del suelo con relación a la profundidad (Jaramillo y Gómez, 1974).

distribución de la lluvia, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y las propiedades físicas del suelo. En la Figura 39 se muestra el comportamiento de la temperatura mínima y la temperatura máxima del suelo con la profundidad, para las condiciones de Cenicafé.

La temperatura de la planta

Como una consecuencia de los balances de radiación y de energía en las plantaciones se presentan diferencias de temperatura entre la planta y el aire circundante. Las diferencias térmicas dependen de la cantidad de radiación incidente durante el día, de tal forma que las mayores diferencias ocurren en tiempo cálido y seco. En un tiempo lluvioso y frío las temperaturas entre la planta y el aire circundante tienden a ser iguales.

Las diferencias entre la temperatura del aire y la hoja dependen de la especie y del contenido de agua en la hoja. Las diferencias de la temperatura de las hojas para las diferentes especies y variedades pueden explicarse por la cantidad de radiación recibida, la morfología, la fisiología y la anatomía de la hoja, el grosor de la lámina foliar, la tasa de transpiración y la hidratación de la hoja.

Para *Coffea arabica* L., variedad Caturra, la temperatura de la superficie de la hoja observada hacia el amanecer y en las primeras horas del día son iguales o inferiores a la temperatura del aire en 1,0 a 2,0°C. Al aumentar la radiación solar, las hojas externas elevan su temperatura por encima de la del aire hasta unos 10°C, debido al cierre de los estomas que ocurre cuando la temperatura del aire es superior a los 26°C. Las hojas sombreadas presentan temperaturas similares a las del aire. En el cafeto, las ramas siguen durante el día un comportamiento semejante al de las hojas, pero se mantienen más calientes un mayor número de horas. Las ramas presentan temperaturas máximas más altas que las hojas y un enfriamiento más lento. Los frutos del cafeto siguen un comportamiento térmico similar al de las ramas (Figuras 40 y 41).

El calentamiento y el enfriamiento de los diferentes órganos de la planta, así como las diferencias en la velocidad del viento dentro de las plantaciones de café, están relacionadas con los aumentos o las disminuciones de la temperatura del aire adyacente. Por ejemplo, al comparar la temperatura del aire registrada dentro de un cafetal a libre exposición solar con la temperatura observada en la estación climática adyacente, se observa que en días de alto brillo solar se presentan diferencias hasta de 2,0°C, y durante la noche las diferencias están próximas 1,0°C. En días lluviosos o de alta nubosidad las diferencias son muy bajas o no se presentan (Jaramillo y Gómez, 1989; Schroeder, 1951).

En observaciones de la temperatura del aire realizadas desde la superficie del suelo hasta 15 m de altura, en cafetales bajo sombrío de guamo (*Inga* sp.) se encontró que los valores más altos se presentan en las copas de los árboles de sombrío y siguen el mismo comportamiento que la temperatura observada en la estación climática. La temperatura disminuye debajo de las copas de los árboles y en la parte baja de los cafetos y es más alta en la zona correspondiente a los tallos. Las diferencias, sin embargo, son poco apreciables, tanto para la temperatura

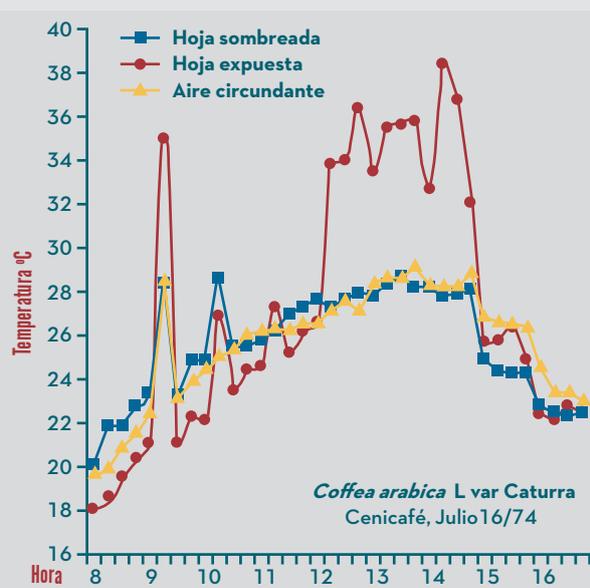


Figura 40. Variación de la temperatura en hojas de café (Gómez y Jaramillo, 1974).

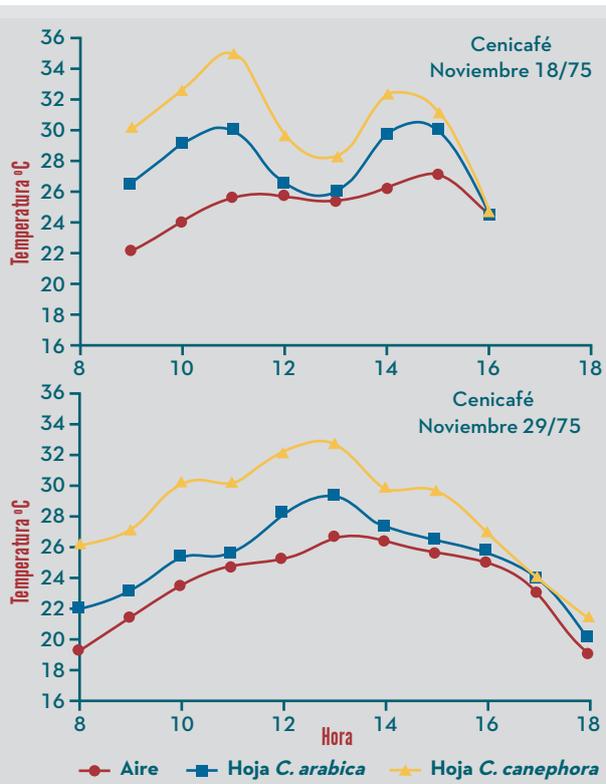


Figura 41. Influencia del riego sobre la temperatura de la hoja en *Coffea arabica* y *C. canephora* (Orozco y Jaramillo, 1978).

mínima como para la temperatura media. La mayor variación se observa en el perfil de la temperatura máxima (Bonilla, 1952 a, 1952b).

Las variaciones de la temperatura del aire en el interior de un cafetal bajo sombrero difieren con la altura sobre el nivel del suelo y permanecen más frías las capas interiores; las mayores diferencias se encuentran entre la superficie del suelo y un metro de altura, estas diferencias son hasta de 4,0°C en las horas de mayor radiación. Entre 2 y 4 m de altura las diferencias en temperatura son más pequeñas, con valores entre 1,0 y 1,5°C (Jaramillo, 1976).

La influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de la planta

Todo organismo se desarrolla dentro de un rango térmico determinado. La dependencia de la tasa de desarrollo por la temperatura fue reconocida por el naturalista francés René A. Réaumur en 1735, cuando planteó un modelo lineal de la temperatura para el análisis del desarrollo.

Los organismos para su crecimiento y desarrollo requieren de una cantidad constante de calor denominado Tiempo Fisiológico, el cual se expresa mediante el Tiempo Térmico (TT).

El Tiempo Térmico está dado por el área comprendida entre la curva de la temperatura

diaria y las temperaturas base para el organismo. Para su cálculo se tienen en cuenta la temperatura máxima (T_{mx}), la temperatura mínima (T_{mn}), la temperatura base inferior (T_b) y la temperatura base superior (T_B), estas dos últimas corresponden a los límites de adaptación del organismo (Figura 42).

La expresión más simple para el cálculo del Tiempo Térmico (TT) se presenta en la Ecuación <17>:

$$TT = \sum (T_m - T_b) \quad <17>$$

Donde:

T_m : temperatura media, °C

T_b : temperatura base inferior, °C

La temperatura base inferior es aquella por debajo de la cual no ocurre actividad fisiológica en el cultivo. En la mayoría de los cultivos tropicales su valor está entre 10 y 12°C (Murthy, 2002).

Según Villa Nova, citado por Silveira *et al.* (1976), para el cálculo del Tiempo Térmico diario (TTd) deben considerarse los siguientes casos:

Caso 1. Cuando la temperatura base inferior es menor que la temperatura mínima (Ecuación <18>).

$$TTd = (T_{mn} - T_b) + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \quad <18>$$

Caso 2. Cuando la temperatura base inferior es mayor o igual a la temperatura mínima y menor que la temperatura máxima (Ecuación <19>).

$$TTd = \frac{(T_{mx} - T_b)^2}{2(T_{mx} - T_{mn})} \quad <19>$$

Caso 3. Cuando la temperatura base inferior es mayor que la temperatura máxima.

En este caso el Tiempo Térmico es igual a cero ($TTd = 0$)

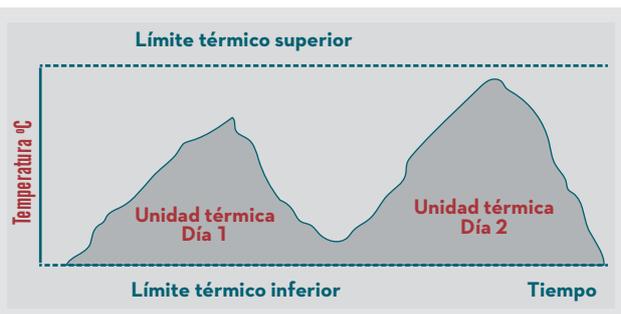


Figura 42. Unidades térmicas (área bajo la curva, °C día⁻¹)

Caso 4. Temperatura base superior

En los tres casos considerados se tiene en cuenta la temperatura base inferior (T_b). Con frecuencia la actividad de un organismo vivo también es limitada por una temperatura base superior (T_B). En este caso al Tiempo Térmico calculado en los Casos 1 y 2 deberá restarse un factor de corrección (C) como se presenta en la Ecuación <20>:

$$C = \frac{(T_{mx} - T_B)^2}{2(T_{mx} - T_{mn})} \quad <20>$$

La utilización de la temperatura media diaria puede introducir errores en el cálculo del tiempo térmico, debido a que una localidad puede presentar una misma temperatura media que otra, pero presentar diferentes amplitudes térmicas; el problema es evidente cuando se comparan regiones secas (mayor amplitud térmica) con regiones húmedas (menor amplitud térmica). La estimación del tiempo térmico sería aplicable en regiones con igual amplitud térmica (Loomis y Connor, 1992).

Islas de calor – temperatura de las ciudades

Las áreas urbanas se distinguen de las demás regiones geográficas por las construcciones y por las diferencias en las características térmicas debidas a la intervención del hombre. Materiales de construcción como el ladrillo y el concreto absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo y la vegetación de las áreas rurales, produciendo durante el día un aumento de la temperatura del aire desde la periferia de la ciudad hacia el centro urbano. Este calentamiento diferencial origina vientos locales desde el exterior hacia el interior, obligando al ascenso del aire en el centro cálido, y si el aire es muy húmedo se puede generar convección y lluvias en torno a este centro cálido. Cuando el Sol se oculta, el área urbana continúa irradiando calor desde los edificios y las superficies pavimentadas. El aire cálido de la ciudad asciende y crea un domo caliente, este fenómeno es llamado *efecto de isla de calor*, en el cual la ciudad emite calor durante toda la noche (Figura 43).

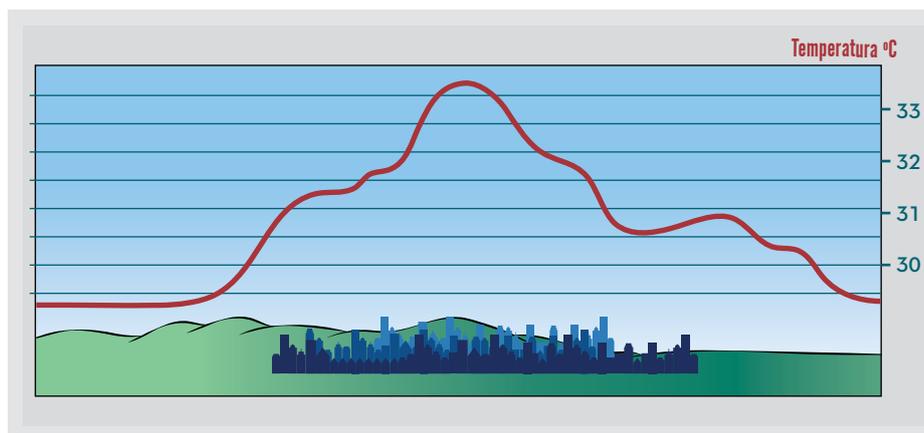
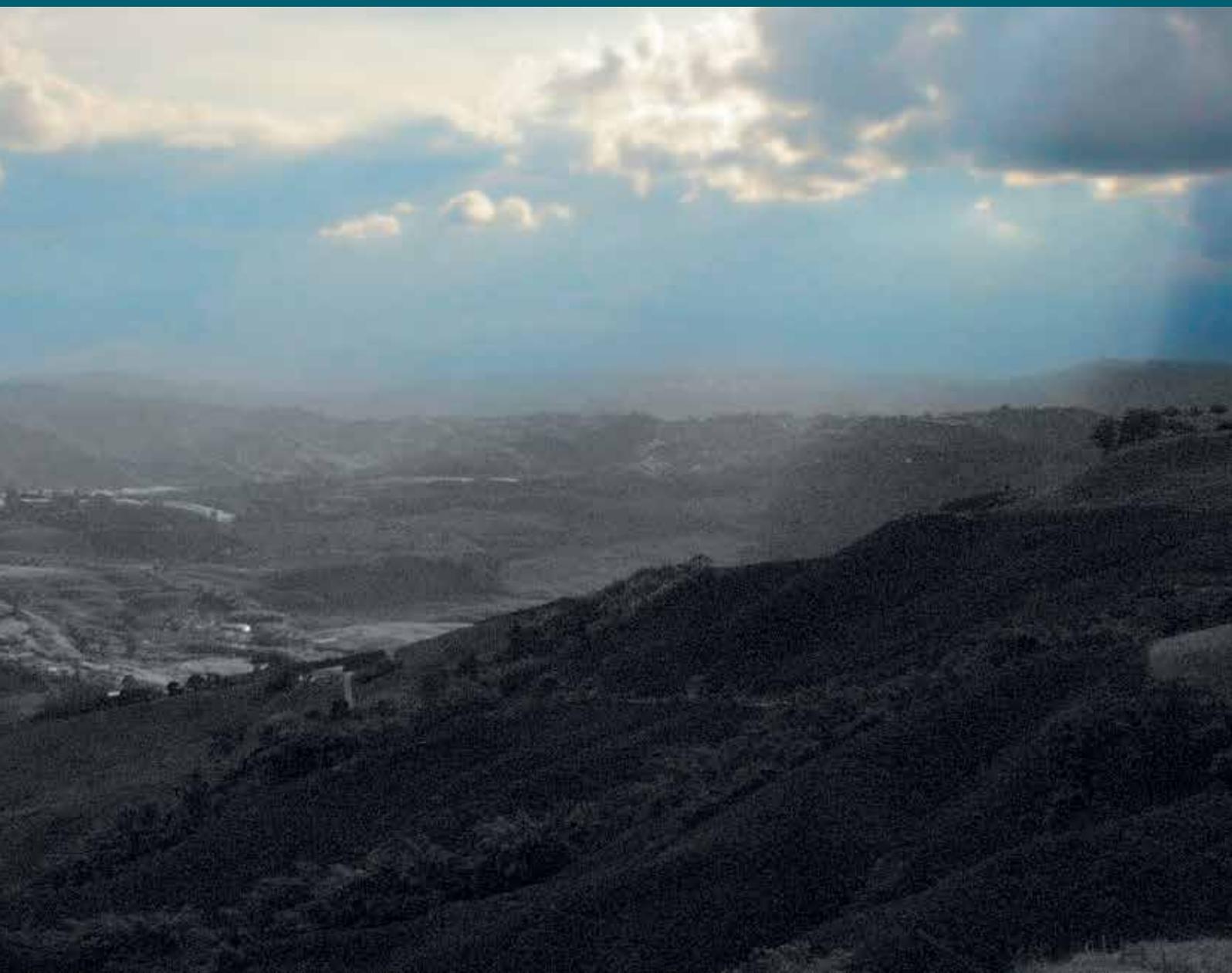
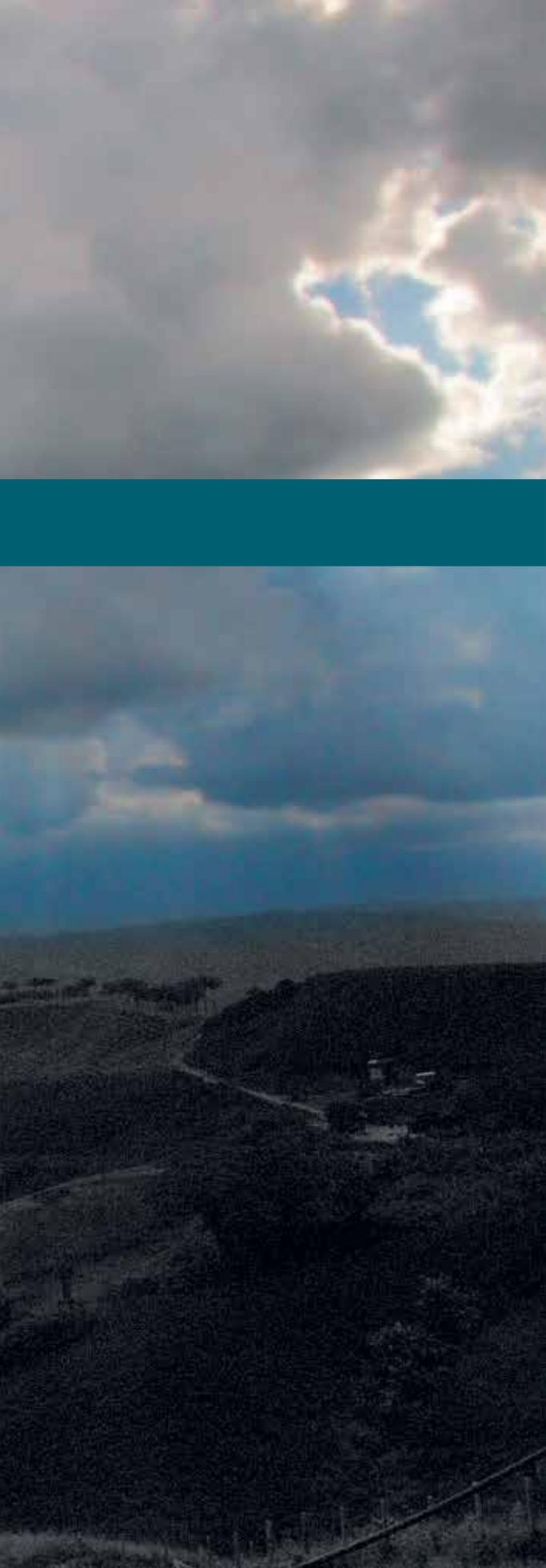


Figura 43.
Isla de calor urbana
(<http://www.comet.ucar.edu/>).



La humedad del aire





En la atmósfera el agua puede estar presente en tres estados: Como vapor de agua (un gas invisible), como gotas de agua y como cristales de hielo (fases visibles). El vapor de agua ingresa a la atmósfera por evaporación (desde el océano, ríos, lagos), transpiración desde las plantas y sublimación del hielo y la nieve.

La humedad atmosférica tiene un papel significativo en la producción de las plantas, a través de sus efectos en el potencial hídrico y en la evapotranspiración; una alta o baja humedad atmosférica puede favorecer o desfavorecer la incidencia de enfermedades en las plantas que son causadas por hongos o bacterias.

Uno de los constituyentes del aire es el vapor de agua, se caracteriza por ser variable en cantidad según las disponibilidades de agua y de energía. Representa hasta un 4% en volumen del aire, este volumen es determinado por las condiciones de temperatura del ambiente, a mayor temperatura del aire hay mayor capacidad de retención de humedad.

El vapor de agua por ser un gas ejerce una presión que contribuye a la presión atmosférica, su presión parcial se llama *presión de vapor* y es independiente de la presión de los otros gases atmosféricos (Figura 44).

La humedad atmosférica puede expresarse de diferentes formas (Allen *et al.*, 2006; Linacre, 1992, Loomis y Connor, 1992):

- ♦ **Presión de saturación (es)**, es la presión parcial de vapor de agua correspondiente a la máxima cantidad de vapor de agua que el aire puede incorporar a una temperatura determinada. El valor de la presión de vapor se incrementa exponencialmente con la temperatura.
- ♦ **Presión real (er)** es la presión ejercida sobre una superficie por las moléculas de agua en forma gaseosa. Es independiente de la presencia de otros gases y por lo

tanto se puede utilizar para expresar la humedad atmosférica.

- ♦ **Déficit de saturación**, se define como la diferencia entre la presión de saturación y la presión real del vapor de agua a la misma temperatura.
- ♦ **Humedad relativa** es la relación entre la presión real (e_r) del vapor de agua y la presión del vapor saturado (e_s) a la temperatura del bulbo seco. La humedad relativa se incrementa cuando el aire se enfría o cuando se agrega vapor de agua al aire.
- ♦ **Humedad absoluta**, es la masa de vapor de agua por volumen de aire. Representa la densidad del vapor de agua en el aire (g cm^{-3}).
- ♦ **Humedad específica**, es la relación de masa de vapor contenida en una masa de aire húmedo (g kg^{-1}).

Las relaciones entre la presión del vapor y la temperatura se presentan en la Figura 45.

Expresiones para la estimación de la humedad atmosférica a partir de las medidas del

termómetro seco (t_s) y del termómetro húmedo (t_h) del psicrómetro (Allen *et al.*, 2006, Jensen *et al.*, 1990):

- ♦ Presión de vapor saturante, e_s en milibares (Ecuación <21>)

$$e_s = 6,11 \times 10^{[7.5t_h / (237,3 + t_h)]} \quad <21>$$

- ♦ Presión de vapor real, e_r , Ecuación <22>

$$e_r = e_s - \gamma(ts - th) \quad <22>$$

γ Coeficiente psicrométrico = $0,57 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$

- ♦ Humedad relativa (%), Ecuación <23>

$$HR = (e_r / e_s) \times 100 \quad <23>$$

- ♦ Déficit de saturación, milibares (Ecuación <24>)

$$DS = e_s - e_r \quad <24>$$

- ♦ Humedad específica (q , kg kg^{-1}), Ecuación <25>

masa de vapor/ masa de aire húmedo

$$q = 0,622e_r / (P - 0,378e_r) \quad <25>$$

P, es la presión atmosférica, milibares

- ♦ Humedad absoluta (a , g m^{-3}), Ecuación <26>

masa de vapor/volumen de aire húmedo

$$a = 288,9e_r / T \quad <26>$$

T temperatura absoluta $T = 273 + t_s$

Algunas consideraciones sobre la humedad del aire:

- ♦ La humedad absoluta es mucho mayor en el Ecuador geográfico y mínima en los Polos.
- ♦ La humedad relativa es máxima en la noche y mínima al medio día.
- ♦ La humedad relativa diaria sigue un comportamiento opuesto a la temperatura

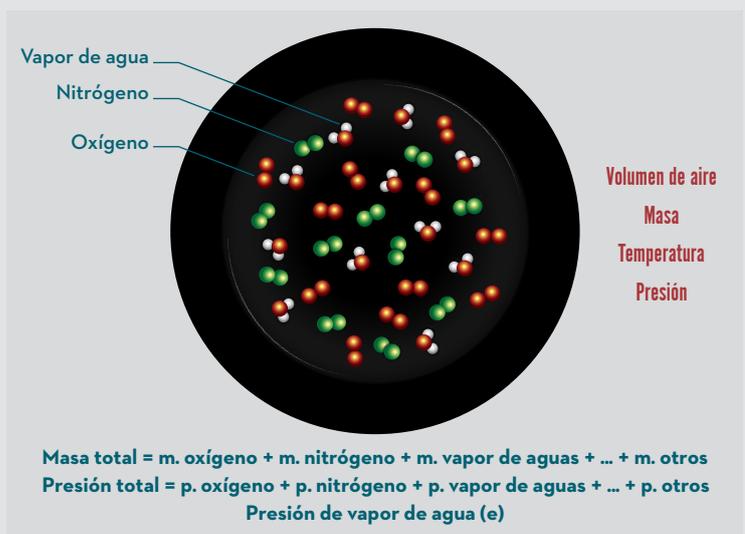


Figura 44.
Presión del vapor de agua.

del aire, al aumentar la temperatura la humedad relativa baja y viceversa.

- ♦ El nivel de saturación del vapor de agua se incrementa con el aumento de la temperatura (Figura 46). La cantidad de vapor de agua es mayor en una masa de aire caliente saturado (40°C, 100%) que en una masa de aire frío saturado (10°C, 100%).

Temperatura del Punto de Rocío (Tr). La temperatura de rocío se expresa por medio de la siguiente expresión (Ecuación <27>):

$$T_r = 118,91 + 237,31 e_r / (16,78 - 1 e_r) \quad <27>$$

El rocío se refiere al depósito de agua líquida producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que ocurre sobre la superficie; esta presenta una temperatura igual o inferior a la temperatura del punto de rocío. En el ejemplo de la Figura 47, para las condiciones de temperatura y humedad del aire, cuando

se presenta una temperatura igual o inferior a 14,9°C empieza a condensarse el vapor de agua formando gotas sobre la superficie.

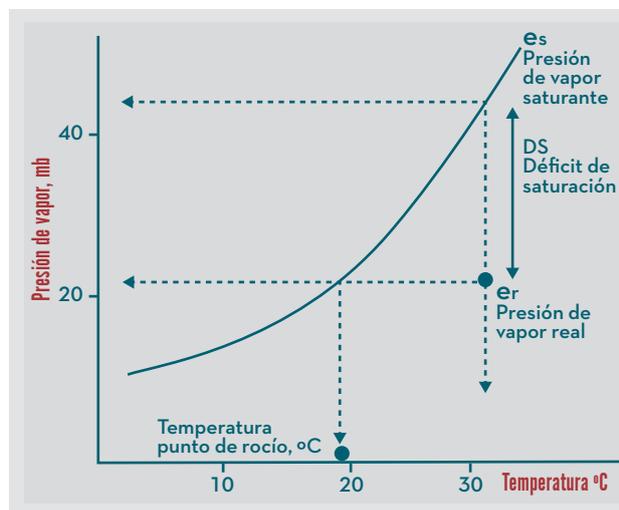


Figura 45. Relaciones entre la presión del vapor y la temperatura.

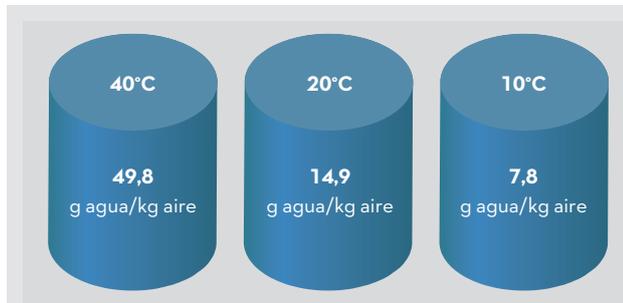


Figura 46. Capacidad de retención de humedad a saturación (100% humedad relativa) de una masa de aire con la temperatura.



Figura 47. Formación del rocío y la temperatura del punto de rocío.



La evaporación y la evapotranspiración





La *evaporación* es el proceso físico en el cual una masa líquida es transformada en vapor (vaporización) y removida desde la superficie que evapora; para el agua la cantidad de energía requerida para la evaporación es de $2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ ó 585 cal g^{-1} .

La tasa de evaporación está influenciada por la energía suministrada al sistema o al subsistema de referencia, por las temperaturas tanto de la superficie que evapora como del aire, la tensión del vapor y la tasa del movimiento del aire. La evaporación es determinante en el ciclo hidrológico y es un elemento del clima importante del microclima y del balance de energía de los agroecosistemas.

La transpiración es la evaporación del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y liberada hacia la atmósfera a través de los estomas de las hojas (Figura 48). La tasa de transpiración depende de la humedad contenida en el suelo, de la fisiología del cultivo y del estado de desarrollo de la planta.

La evapotranspiración es la suma de la evaporación y de la transpiración, procesos que ocurren de manera simultánea y, en la práctica, no son fáciles de cuantificar por separado.

La evaporación y la evapotranspiración están determinadas por los elementos del clima, las características de cultivo, las condiciones de manejo y por aspectos ambientales:

Condiciones del clima: los principales elementos meteorológicos que afectan la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad del aire y la velocidad del viento.

Características de cultivo: para idénticas condiciones meteorológicas la evapotranspiración varía con el tipo de cultivo, la variedad, el estado de desarrollo del cultivo y las diferencias en la reflexión de la radiación solar.

Manejo y condiciones ambientales: factores como la salinidad del suelo, la baja fertilidad del suelo, la presencia de horizontes

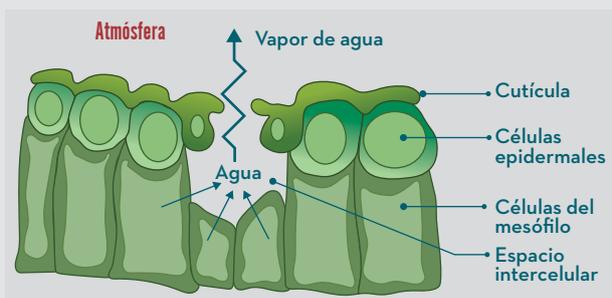


Figura 48.

Esquema del proceso de la transpiración a través de los estomas (Allen *et al.*, 2006).

endurecidos en el suelo y la ocurrencia de plagas y enfermedades reducen el desarrollo del cultivo y, por lo tanto, la evapotranspiración. Además, prácticas como el riego, las barreras rompevientos y las distancias de siembra, alteran el microclima del cultivo modificando las tasas de evapotranspiración.

Algunos términos que se relacionan con la evaporación y la evapotranspiración son los siguientes (Allen *et al.*, 2006, Doorenbos y Kassam, 1988):

Evaporación potencial: es la cantidad máxima de vapor de agua que puede ser emitida por una superficie de agua libre, por ejemplo, la que ocurre desde un lago o un río.

Evapotranspiración potencial: es la cantidad máxima de agua que puede evaporarse de una capa de vegetación continua, que cubre todo el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo. El cultivo debe estar libre de plagas y enfermedades, bien fertilizado y bajo condiciones óptimas de suelo.

Evapotranspiración de referencia: es la cantidad de agua evaporada desde una superficie cubierta totalmente de pasto, con una altura entre 8 y 10 cm, sin restricciones de agua y de nutrientes. Los únicos elementos que afectan la evapotranspiración de referencia son los climáticos y, por lo tanto, puede calcularse a partir de los datos meteorológicos. El

método de Penman-Monteith es el único método recomendado para determinar la evapotranspiración de referencia de cualquier localidad, tiene bases físicas sólidas e incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

Evapotranspiración real: es la cantidad de agua evaporada desde el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas presentes. En estas últimas se incluye el tipo de cultivo y sus fases de crecimiento y desarrollo.

Medida de la evapotranspiración

La evapotranspiración se cuantifica con equipos especializados de alta precisión o determinando el balance hidrológico del lugar, midiendo la precipitación, la humedad del suelo y la percolación *in situ* con el uso de lisímetros.

Los métodos para la determinación de la evapotranspiración son (Jensen *et al.*, 1990; Rosenberg, 1974):

Métodos de medida directa

Tanque de evaporación Clase A. El tanque de evaporación Clase "A" es de hierro galvanizado, de forma circular, con un diámetro de 121 cm y una profundidad de 25,5 cm. Se encuentra sobre una plataforma de madera a 15 cm sobre el nivel del suelo. El nivel del agua del tanque debe mantenerse entre 5,0 cm y 7,5 cm del borde.

El tanque de evaporación permite estimar los efectos combinados de radiación solar, temperatura, humedad y viento sobre la evaporación de una superficie de agua libre. De un modo análogo, la planta responde a las mismas variables climáticas. El método del tanque de evaporación permite relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia (*ET_o*).

Evapotranspirómetros y lisímetros. Un lisímetro es un dispositivo instalado en el suelo, con el mismo suelo del lugar y con vegetación. La medida de la evapotranspiración es determinada cuantificando el balance hídrico del sistema.

Método hidrológico. La evapotranspiración se estima a partir del balance de agua (mm), Ecuación <28>

$$ET = (LL + R) - (P + E \pm \Delta S) \quad <28>$$

Donde:

ET: evapotranspiración

LL: lluvia

R: riego

P: percolación

E: escorrentía

ΔS : variación de la humedad en el suelo

Métodos micrometeorológicos

Método del balance de energía (Método de la relación de Bowen). La estimación de la evapotranspiración mediante el balance de energía se resume en la siguiente expresión (Ecuaciones <29> y <30>)

$$\lambda E = R_n - H - G \quad <29>$$

Donde:

λE : evapotranspiración, mm

λ : calor latente de vaporización de agua, $J \text{ kg}^{-1}$ (2.257 kJ kg^{-1})

R_n : flujo de radiación neta, $\text{kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

H : flujo de calor sensible, utilizado en calentar el aire, $\text{kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

G : flujo de calor en el suelo, $\text{kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 - \beta} \quad <30>$$

Donde β es la relación de Bowen y relaciona los flujos de calor sensible y latente, considerando que los coeficientes de intercambio turbulento de calor y de humedad atmosférica son similares (Ecuación <31>).

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\delta T}{\delta e} \quad <31>$$

Donde

γ : es el coeficiente psicrométrico, $\text{mb}^\circ\text{C}^{-1}$

T y e : Son la temperatura del aire ($^\circ\text{C}$) y la tensión del vapor (mb) medidas a diferentes alturas dentro del cultivo.

Método aerodinámico

El método aerodinámico se utiliza para determinar los flujos verticales de vapor de agua dentro de una comunidad vegetal, mediante la expresión (Ecuación <32>)

$$\lambda E = -\lambda \rho_a k^2 \frac{(q_2 - q_1)(u_2 - u_1)}{[\ln(z_2 / z_1)]^2} \quad <32>$$

Donde:

λE : evapotranspiración, mm

λ : calor latente de vaporización de agua (J kg^{-1}).

ρ_a : densidad del aire (kg m^{-3}).

k : constante de von Karman igual a 0,41.

q : humedad específica (kg kg^{-1}).

u : velocidad del viento (m s^{-1}).

z : altura de medida (m).

1, 2: niveles de medida dentro del cultivo.

Método de Penman-Monteith

La evapotranspiración de referencia puede estimarse mediante fórmulas, siendo una de las más precisas y recomendada la de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) (Ecuación <33>):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_r)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad <33>$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

G : flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T : temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$)

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_r : presión de vapor real (kPa)

Δ : pendiente de la curva de saturación de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

La evaporación en Colombia

En la región Andina de Colombia para una misma altitud las cantidades de evaporación varían muy poco entre un mes y otro, lo que se explica por la baja variabilidad en el transcurso del año de los elementos meteorológicos que la controlan, como son la radiación solar global, la temperatura del aire, la tensión de vapor y la velocidad del viento (Frere *et al.*, 1978).

Evapotranspiración de referencia

La variación mensual de la evapotranspiración de referencia se observa en la Tabla 19, para cinco estaciones situadas en altitudes entre 775 m (La Cristalina en Támesis, Antioquia) y 3.684 m (Letras en Manizales, Caldas), localizadas en la cuenca del río Cauca. Para una misma altitud hubo poca variación entre los valores de evaporación mensual, con un promedio de los coeficientes de variación de 6,4% y valores extremos entre 5,7% para Naranjal (Caldas) y 7,1% en Agronomía (Caldas), debido a la baja variabilidad a nivel tropical de los elementos meteorológicos que controlan el proceso de evaporación como son la radiación solar global, la temperatura del aire, la tensión de vapor y la velocidad del viento.

La variación mensual de la evaporación de referencia presenta una onda doble con los valores máximos en los meses de marzo y agosto, y los mínimos en mayo y octubre.

La relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o , mm día⁻¹) estimada mediante la expresión de Penman-Monteith y la altitud (m) para las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, se presenta en la Figura 49.

Evaporación de tanque A y su relación con la evapotranspiración de referencia (ET_o)

La variación mensual de la evaporación de tanque para las localidades de Cenicafé y Naranjal (Caldas) se presenta en la Tabla 20. La evaporación media mensual en Cenicafé es de 3,5 mm día⁻¹ con un valor mínimo de 3,0 mm día⁻¹ (octubre) y un valor máximo de 3,8 mm día⁻¹ (julio). Para Naranjal la evaporación tuvo un valor medio de 3,6 mm día⁻¹ con un valor mínimo de 3,3 mm día⁻¹ (octubre) y un máximo de 3,8 mm día⁻¹ (julio y agosto). Los menores valores se registraron durante los períodos de lluvia, que para esta región corresponden a los meses de abril-mayo y octubre-noviembre.

La evaporación de tanque y la ET_o están influenciadas por los mismos procesos físicos como son la disponibilidad de energía y la transferencia de masa, por lo tanto, pueden relacionarse mediante un coeficiente de proporcionalidad empírico. La relación lineal entre la evaporación del tanque clase A (Ev) y la evapotranspiración de referencia (ET_o), al agrupar la información para Cenicafé y Naranjal (Ecuación <34>):

$$Ev = 1,071 ET_o (R^2 = 0,65 \ n = 24) \text{ <34>}$$

Tabla 19.

Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) a diferente altitud para estaciones de la cuenca del río Cauca, en la región Andina de Colombia (Jaramillo, 2006).

Estación	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Anual
Letras	3.684	69	78	75	67	67	67	72	78	70	66	64	65	70
Agronomía	2.088	90	84	96	85	84	81	92	100	85	88	79	84	87
Naranjal	1.381	101	96	109	97	95	93	104	106	98	96	90	96	98
Santágueda	1.026	114	108	121	110	104	103	114	121	111	111	102	106	110
La Cristalina	775	118	114	128	116	114	113	123	131	118	116	107	106	117

Tabla 20.

Valores medios mensuales de la evaporación de Tanque A y la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm.día⁻¹), para Cenicafé y Naranjal (Caldas), en el período 1975 a 1989 (Jaramillo, 2006).

Estación	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Cenicafé												
Tanque A	3,9	3,9	3,9	3,2	3,1	3,2	3,8	3,7	3,5	3,0	3,2	3,3
ET_0	3,5	3,6	3,6	3,3	3,1	3,2	3,5	3,5	3,4	3,1	3,1	3,2
Naranjal												
Tanque A	3,8	3,9	3,9	3,4	3,2	3,3	3,8	3,8	3,7	3,3	3,3	3,5
ET_0	3,3	3,4	3,6	3,2	3,1	3,1	3,4	3,4	3,3	3,1	3,0	3,1

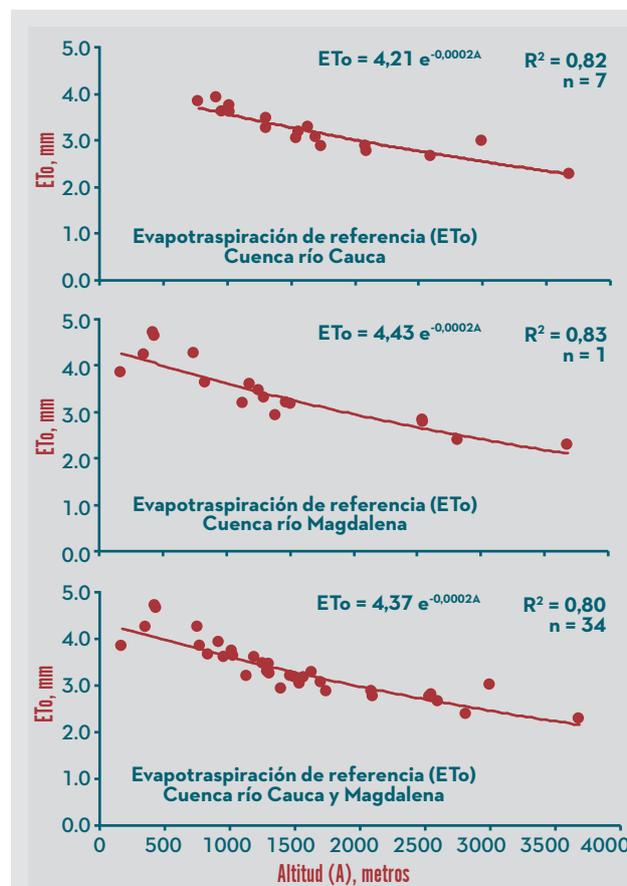
En la expresión anterior se observa que la evaporación del tanque clase A es 7,1% superior a la evapotranspiración de referencia estimada por el método de Penman-Monteith. Las mayores tasas de evaporación del tanque según Allen *et al.*, (2006), pueden explicarse por varios factores, entre los cuales está un mayor calentamiento del tanque, el cual genera una evaporación adicional durante la noche, mientras que en la mayoría de los cultivos solamente ocurre transpiración durante el día. También deben tenerse en cuenta las modificaciones en la turbulencia, la temperatura y la humedad del aire, que presentan diferencias en la superficie del tanque y en la vegetación.

La evapotranspiración de referencia y la evaporación para las regiones cafeteras

Conocidas las relaciones entre la evapotranspiración de referencia (ET_0) con la altitud y la relación entre la ET_0 y la evaporación de tanque A, se estimaron los valores para 118 estaciones climáticas situadas en las regiones del cultivo del café en Colombia (Tabla 21).

Para las estaciones estudiadas la evapotranspiración de referencia registró

una mayor frecuencia de 3,3 mmdía⁻¹, con valores extremos entre 2,9 mmdía⁻¹ (Bremen, Circasia-Quindío) y 3,9 mmdía⁻¹ (La Blanquita,

**Figura 49.**

Relación entre la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm día⁻¹) y la altitud (m) para las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena (Jaramillo, 2006).

Tabla 21.

Valores estimados de evapotranspiración de referencia (ETo) y la evaporación de tanque A, para algunas estaciones de la región cafetera de Colombia (Jaramillo, 2006).

Estación	Municipio	Altitud (m)	ETo día (mm)	ETo año (mm)	Evaporación tanque A (mm día ⁻¹)
Antioquia					
Bariloche	Fredonia	1.748	3,1	1.124	3,3
La Blancquita	Fredonia	570	3,9	1.423	4,2
Miguel Valencia	Jardín	1.621	3,2	1.153	3,4
El Rosario	Venecia	1.635	3,2	1.150	3,4
Boyacá					
Bertha	Moniquirá	1.677	3,1	1.141	3,3
Caldas					
Cuatro Esquinas	Aguadas	1.900	3,0	1.091	3,2
Guaymaral	Aguadas	1.600	3,2	1.158	3,4
Cenicafé	Chinchiná	1.310	3,4	1.227	3,6
La Francia	Chinchiná	1.267	3,4	1.238	3,6
Naranjal	Chinchiná	1.381	3,3	1.210	3,6
La Selva	Manizales	1.312	3,4	1.227	3,6
Agronomía	Manizales	2.088	2,9	1.051	3,1
Java	Manizales	1.778	3,1	1.118	3,3
Llanadas	Manzanares	1.420	3,3	1.201	3,5
El Descanso	Marmato	1.803	3,1	1.112	3,3
Santa Helena	Marquetalia	1.395	3,3	1.207	3,5
La Argentina1	Palestina	1.354	3,3	1.217	3,6
Granja Luker	Palestina	1.031	3,6	1.298	3,8
Santágueda	Palestina	1.026	3,6	1.299	3,8
El Recreo	Palestina	1.430	3,3	1.198	3,5
La Argentina2	Riosucio	1.420	3,3	1.201	3,5
La Manuelita	Riosucio	1.460	3,3	1.191	3,5
Rafael Escobar	Supía	1.307	3,4	1.228	3,6
La Pastorita	Victoria	1.122	3,5	1.274	3,7
Cauca					
Manuel Mejía	El Tambo	1.735	3,1	1.127	3,3
La Trinidad	Piendamó	1.671	3,1	1.142	3,4
Instituto Técnico	S Quilichao	1.058	3,5	1.291	3,8
Mondomo	S Quilichao	1.380	3,3	1.210	3,6
Cesar					
Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	3,5	1.271	3,7
Cundinamarca					
Mesitas Santa Inés	Cachipay	1.340	3,3	1.220	3,6
El Refugio	La Mesa	1.250	3,4	1.242	3,6
Secretaría Agricultura	La Palma	1.250	3,4	1.242	3,6

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	ETo día (mm)	ETo año (mm)	Evaporación tanque A (mm día ⁻¹)
Misiones	El Colegio	1.540	3,2	1.172	3,4
Santa Bárbara	Sasaima	1.478	3,3	1.187	3,5
Pinar del Río	Silvania	1.752	3,1	1.124	3,3
Granja Tibacuy	Tibacuy	1.538	3,2	1.173	3,4
Montelíbano	Yacopí	1.365	3,3	1.214	3,6
Huila					
Jorge Villamil	Gigante	1.420	3,3	1.201	3,5
Conc. Desarrollo	Timaná	1.141	3,5	1.270	3,7
Norte de Santander					
Blonay	Chinácota	1.250	3,4	1.242	3,6
Gabriel María Barriga	Convención	1.261	3,4	1.239	3,6
Francisco Romero	Salazar	903	3,7	1.331	3,9
Nariño					
Ospina Pérez	Consacá	1.603	3,2	1.158	3,4
El Sauce	La Unión	1.609	3,2	1.156	3,4
Quindío					
El Sena	Armenia	1.550	3,2	1.170	3,4
Tucumán	Armenia	1.250	3,4	1.242	3,6
La Pradera	Armenia	1.350	3,3	1.218	3,6
Paraguaicito	Buenavista	1.203	3,4	1.254	3,7
La Esperanza	Buenavista	1.428	3,3	1.199	3,5
La Bella	Calarcá	1.449	3,3	1.194	3,5
Quebradanegra	Calarcá	1.500	3,2	1.182	3,5
Bremen	Circasia	2.028	2,9	1.063	3,1
La Ilusión	Circasia	1.442	3,3	1.195	3,5
Mónaco	Córdoba	1.350	3,3	1.218	3,6
Villa Horizaba	Génova	1.470	3,3	1.189	3,5
La Argentina	La Tebaida	1.200	3,4	1.255	3,7
La Miranda	La Tebaida	1.193	3,4	1.256	3,7
Sorrento	Montenegro	1.203	3,4	1.254	3,7
El Agrado	Montenegro	1.275	3,4	1.236	3,6
Vivero	Quimbaya	1.330	3,4	1.223	3,6
Maracay	Quimbaya	1.402	3,3	1.205	3,5
Risaralda					
La Tribuna	Balboa	1.580	3,2	1.163	3,4
Ingenio Risaralda	Balboa	908	3,6	1.330	3,9
El Bosque	Dosquebradas	1.458	3,3	1.192	3,5
Ospirma	Guática	1.661	3,1	1.144	3,4
Buenos Aires	Guática	1.814	3,0	1.110	3,3
La Palmera	Marsella	1.450	3,3	1.194	3,5

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	ETo día (mm)	ETo año (mm)	Evaporación tanque A (mm día ⁻¹)
Combia	Pereira	1.173	3,5	1.262	3,7
Los Cábulos	Pereira	1.189	3,5	1.257	3,7
Planta Tratamiento	Pereira	1.487	3,3	1.185	3,5
Hiroshima	Pereira	1.340	3,3	1.220	3,6
La Catalina	Pereira	1.321	3,4	1.225	3,6
El Cedral	Pereira	2.120	2,9	1.044	3,1
La Oriental	Quinchía	1.730	3,1	1.129	3,3
El Diamante	Quinchía	1.550	3,2	1.170	3,4
El Jazmín	Santa Rosa de Cabal	1.635	3,2	1.150	3,4
Los Naranjos	Santuario	1.580	3,2	1.163	3,4
Santander					
Ceylan	Bucaramanga	1.304	3,4	1.229	3,6
Villanueva	Charalá	1.450	3,3	1.194	3,5
Cuchicute	Curití	1.600	3,2	1.158	3,4
Miporal	Floridablanca	1.237	3,4	1.245	3,7
Bonanza	Girón	1.250	3,4	1.242	3,6
Chochos	Hato	1.400	3,3	1.206	3,5
La Laguna	Páramo	1.550	3,2	1.170	3,4
Las Flores	Pinchote	1.700	3,1	1.135	3,3
La Cumbre	Puente Nacional	1.691	3,1	1.137	3,3
Cocal	Rionegro	700	3,8	1.387	4,1
Los Cocos	Rionegro	1.300	3,4	1.230	3,6
Santa Rita	San Gil	1.600	3,2	1.158	3,4
Aguasblancas	San Vicente	964	3,6	1.315	3,9
Cielo Roto	Suaita	1.504	3,2	1.181	3,5
El Mesón	Valle San José	1.330	3,4	1.223	3,6
Tolima					
Totarito	Alvarado	1.250	3,4	1.242	3,6
Janiyof	Anzoátegui	1.720	3,1	1.131	3,3
El Limón	Chaparral	990	3,6	1.309	3,8
La Montaña	Dolores	1.296	3,4	1.231	3,6
El Ocaso	Dolores	1.000	3,6	1.306	3,8
Palocabildo	Falan	1.500	3,2	1.182	3,5
La Cimarrona	Fresno	1.400	3,3	1.206	3,5
Chapetón	Ibagué	1.353	3,3	1.217	3,6
La Trinidad	Líbano	1.456	3,3	1.192	3,5
Montefrío	Natagaima	1.500	3,2	1.182	3,5
Guadualito	Santa Isabel	1.620	3,2	1.154	3,4
Luis Bustamante	Villarrica	1.616	3,2	1.155	3,4

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	ETo día (mm)	ETo año (mm)	Evaporación tanque A (mm día ⁻¹)
Valle					
Arturo Gómez	Alcalá	1.259	3,4	1.240	3,6
Bellavista	Ansermanuevo	1.550	3,2	1.170	3,4
El Placer	Ansermanuevo	1.744	3,1	1.125	3,3
Santiago Gutiérrez	Argelia	1.530	3,2	1.175	3,5
Venecia	Caicedonia	1.168	3,5	1.263	3,7
El Berrión	Cartago	1.166	3,5	1.263	3,7
Santa Marta	El Águila	1.764	3,1	1.121	3,3
Albán	El Cairo	1.510	3,2	1.179	3,5
La Selva	Ginebra	1.805	3,1	1.112	3,3
Campanella	Palmira	1.512	3,2	1.179	3,5
Julio Fernández	Restrepo	1.381	3,3	1.210	3,6
La Sirena	Sevilla	1.519	3,2	1.177	3,5
Manuel M. Mallarino	Trujillo	1.331	3,4	1.222	3,6
El Recreo	Ulloa	1.421	3,3	1.200	3,5

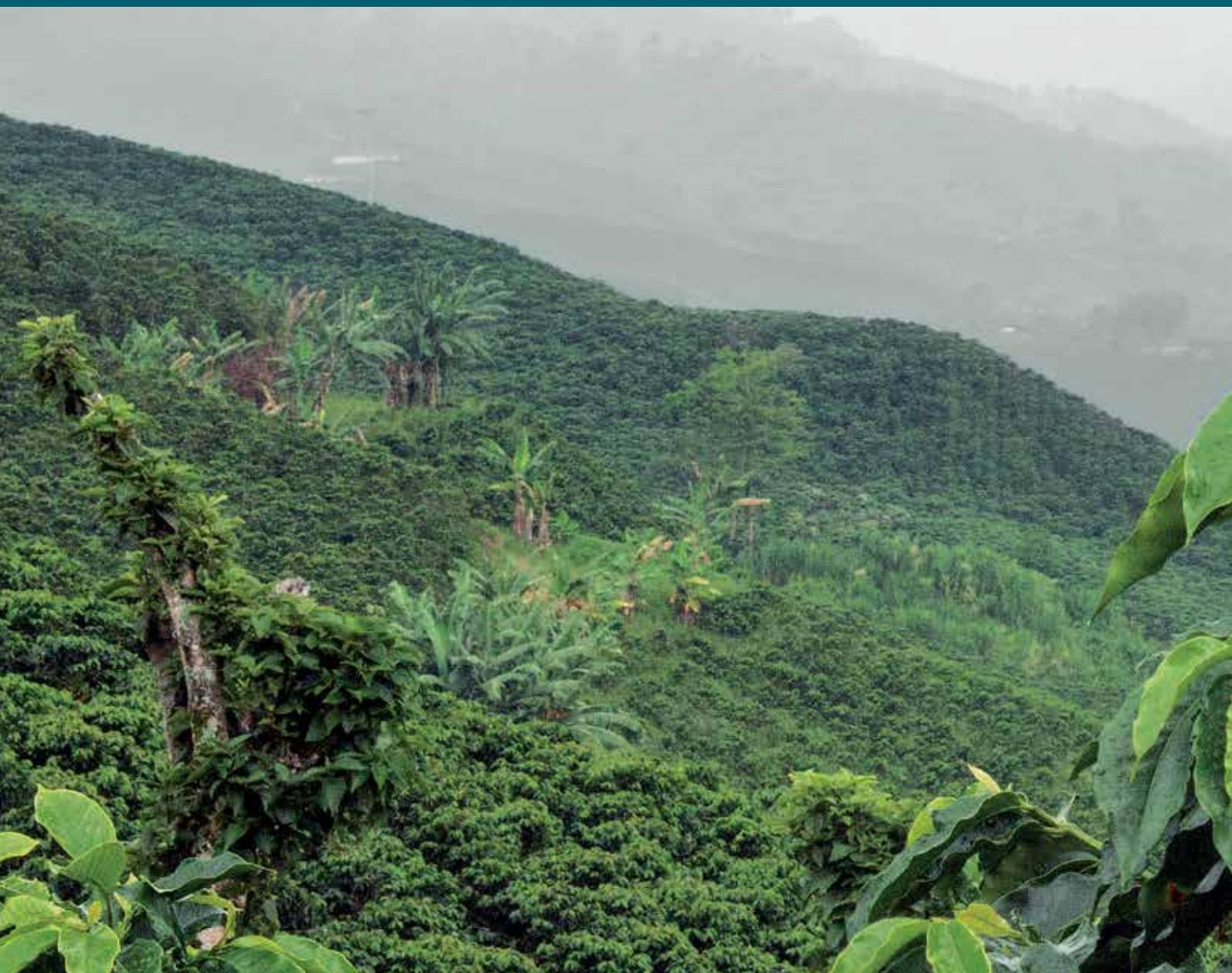
Fredonia-Antioquia). La evaporación de tanque tuvo una mayor frecuencia de 3,6 mm día⁻¹. Para el rango altitudinal de las zonas de cultivo del café entre los 1.000 y los 2.000 m la evapotranspiración media diaria varió entre 3,6 y 2,9 mm día⁻¹, respectivamente.

Para las condiciones climáticas de Colombia la evapotranspiración varía con la altitud, con valores que están próximos a 4,6 mm día⁻¹ al nivel del mar y 2,3 mm día⁻¹ a los 3.500 m. Para el rango altitudinal de las zonas de

cultivo del café, entre los 1.000 y los 2.000 m, la evapotranspiración media varía entre 3,7 y 3,1 mm día⁻¹, respectivamente (Tabla 21).

Los valores de evaporación anual para las regiones de cultivo del café en Colombia varían entre 1.400 mm y 1.100 mm para las zonas bajas y altas, respectivamente. Las cantidades de evaporación anual para las condiciones de Colombia están alrededor de 800 mm (región Pacífica) y 2.300 mm (La Guajira).

La precipitación





En meteorología la precipitación hace referencia al depósito de agua sólida o líquida proveniente de la atmósfera y, por lo tanto, es aplicable a la lluvia, nieve, granizo, rocío y neblina. La lluvia se refiere al depósito del agua líquida y su cantidad se expresa en milímetros (mm).

1 mm de lluvia equivale a 1 L m^{-2}

$1 \text{ mm ha}^{-1} = 10.000 \text{ L ha}^{-1} = 10 \text{ t ha}^{-1}$

Por ejemplo,

Para una lluvia anual de 2.000 mm en una hectárea equivaldría a

20 millones de $\text{L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

$20.000 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

Para que una nube se forme se necesita que el aire ascienda y el vapor de agua se condense. Las gotas de agua o cristales de hielo, según la temperatura del medio, crecen progresivamente hasta que se precipitan debido a su peso por acción de la gravedad.

Las lluvias pueden clasificarse en:

Lluvias convectivas, se originan cuando por un calentamiento local de una masa de aire que al elevarse, se enfría y se condensa el vapor de agua, produciendo la lluvia.

Lluvias orográficas, ocurren cuando las masas de aire que avanzan horizontalmente y se encuentran un obstáculo, se ven obligadas a ascender por una montaña, lo que genera condensación del vapor de agua y la ocurrencia de lluvia en las vertientes expuestas al viento.

Lluvias convergentes, se producen a escala continental por la confluencia de los vientos provenientes de latitudes más altas, por ejemplo, en Colombia se forman por el encuentro de los vientos Alisios del Noreste (NE) con los Alisios del Sureste (SE).

Localmente la cantidad de precipitación está determinada por los sistemas de nubosidad

asociados a la circulación local de cada vertiente, que a su vez está condicionada por la altitud, la orientación de montañas y la actividad convectiva del lugar.

Las características de la lluvia en Colombia

La presencia de las montañas de la región Andina de Colombia influye sobre el comportamiento de la Zona de Confluencia Intertropical; en ellas se originan las circulaciones locales de valle - montaña durante el día, y de montaña - valle en la noche. Estos vientos locales aumentan o disminuyen su acción afectando la dinámica de la precipitación regional, reforzando la influencia de los procesos o sistemas meteorológicos y determinando el período del día en el cual se presenta una mayor precipitación.

En la región Andina de Colombia la lluvia aumenta con la altitud hasta un nivel máximo que varía de acuerdo con la vertiente, pero en general, la máxima lluvia ocurre entre los 1.300 m y los 1.500 m, a partir de este nivel la lluvia comienza a disminuir con el aumento de la altura. En la Figura 50 se

presenta un ejemplo de la variación de la cantidad de lluvia anual en la cuenca del río Chinchiná-Caldas, entre los 1.000 y 4.200 m de altitud.

En el trópico se diferencian varios niveles altitudinales de condensación. El primer nivel de condensación está situado alrededor de los 1.800 m; el segundo nivel de condensación depende de la configuración del nivel inmediatamente inferior y según la disponibilidad de vapor de agua está situado a una altura alrededor de 2.700 m y avanza hasta el límite superior del bosque, entre 3.200 y 3.500 m de altitud, donde produce lluvias (Mora y Sturm, 1994).

Los patrones de la lluvia en Colombia

La distribución intra-anual de la lluvia en Colombia puede ser de tipo unimodal (con un pico máximo de lluvia en el año) o bimodal (con dos picos máximos de lluvia en el año) (Bernal *et al.*, 1987; Eslava, 1993; Eslava *et al.*, 1986; Jaramillo y Chaves, 1997; Lasso *et al.*, 1969; Montealegre, 1986; Oster, 1979).

Los regímenes con un solo período de lluvias en el año se presentan en los Llanos Orientales y la región Amazónica con máximos de lluvia en los meses de junio y julio; en regiones de influencia directa de los vientos Alisios del Norte como son las llanuras del Caribe, La Guajira, la región del río Catatumbo, tienen distribución unimodal y un período seco definido entre diciembre y marzo, con las mayores cantidades de lluvia en los meses de octubre y noviembre.

Las distribuciones de tipo bimodal se presentan en las regiones por donde se mueve la Zona de Convergencia Intertropical en dos épocas del año, en los meses de abril - mayo y octubre - noviembre; especialmente entre los 4° y los 7° de latitud Norte, en los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío, Tolima y Cundinamarca.

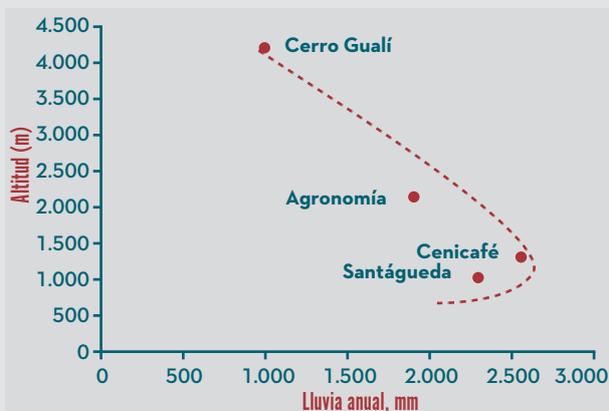


Figura 50. Variación de la cantidad de lluvia con la altitud. Cuenca del río Chinchiná-Caldas (Jaramillo, 2005b).

Distribución de la lluvia para diferentes regiones de Colombia

Región Pacífica

El litoral Pacífico de Colombia es considerado como uno de los sitios más lluviosos del mundo, con valores de lluvia media anual de 12.717 mm en Lloró-Chocó y valores extremos de 26.871 mm en 1974, registrados en Vigía de Curvaradó – Chocó, mientras que en Barbacoas-Nariño se han presentado hasta 363 días con lluvia en un año (Eslava, 1994). En la Figura 51 se presenta la distribución de la lluvia para dos localidades de la región Pacífica de Colombia.

Región Atlántica

En la región Atlántica se encuentra el semidesierto de La Guajira con lluvias inferiores a 250 mm al año. En la región de la Sierra Nevada de Santa Marta se registran hasta 3.000 mm anuales. Al Sur de la región llegan

también los vientos Alisios que al ascender por las estribaciones de las cordilleras Central y Occidental descargan gran cantidad de lluvia. Se estima que en el Nudo de Paramillo, en el Norte de Antioquia, se registran alrededor de 6.000 mm de lluvia al año (Figura 52).

Región de los Llanos Orientales y la Amazonia

La humedad que se genera en la cuenca Amazónica es transportada por los vientos Alisios del Sureste hasta la cordillera Oriental, donde se registran más de 4.000 mm.año⁻¹ en Villavicencio y otros sectores del Piedemonte. En la Amazonía tienen su origen las masas de aire que llegan a la sabana de Bogotá, Llanos Orientales, Caquetá, Putumayo, una parte del Huila, Tolima, Nariño, Macizo Colombiano y la Bota Caucana (Figura 53).

Región Andina

Los patrones de tiempo de la región Andina dependen de las influencias de los vientos Alisios que ingresan por el Atlántico, de las masas de aire que ingresan desde el océano

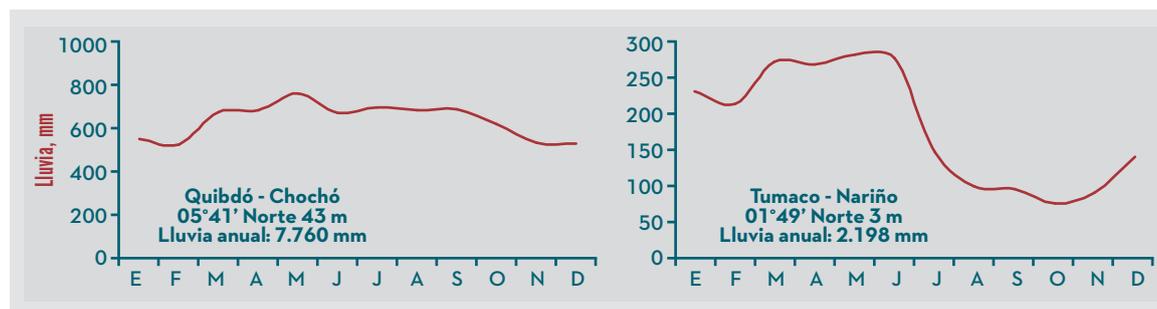


Figura 51. Distribución de la lluvia en la región Pacífica de Colombia.

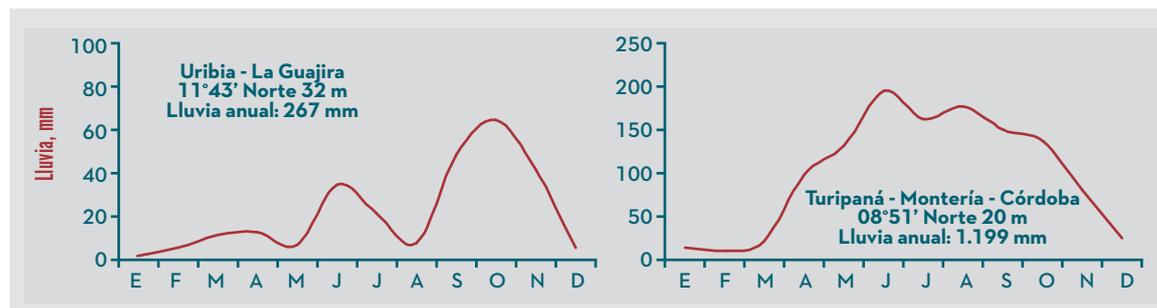
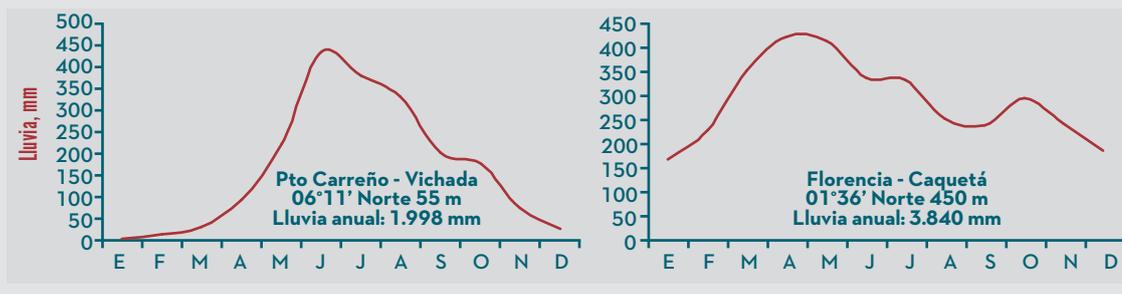


Figura 52. Distribución de la lluvia en la región Atlántica de Colombia.

Figura 53.
Distribución de la lluvia en las regiones de la Orinoquia y la Amazonia de Colombia.



Pacífico y los aportes de humedad procedentes desde el Amazonas.

La distribución intra-anual de la precipitación en la región Andina de Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de dos períodos secos y dos lluviosos en el año; los meses de mayor lluvia son abril, mayo, octubre y noviembre, determinados por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual condiciona el tiempo de alta nubosidad y gran cantidad de lluvia. En los extremos Norte, Sur y Oriente se presenta una tendencia unimodal, con una sola estación lluviosa en el año.

La zona Norte (mayor de 7° de latitud Norte) presenta una estación seca pronunciada de diciembre a marzo (abril) y una estación lluviosa de mayo a noviembre, con una ligera disminución en julio, como se presenta en la localidad de Pueblo Bello - Cesar (Figura 54).

La zona Central Andina (latitudes desde 3° a 7° Norte) presenta dos períodos lluviosos: marzo - junio y septiembre - diciembre, y dos períodos menos lluviosos: enero - febrero y

julio - agosto, un ejemplo se observa en R. Escobar – Caldas (Figura 55).

La zona Sur (latitudes inferiores a 3° Norte) presenta una estación marcadamente seca desde mediados de junio a mediados de septiembre y una estación lluviosa de octubre a junio, como en el caso de Ospina Pérez – Nariño (Figura 56).

Las cantidades anuales de lluvia para la región Andina, en las zonas de cultivo del café varían entre los 1.000 y los 4.800 mm, y una mayor frecuencia con cantidades superiores a los 2.000 mm (Tabla 22). Las estaciones más secas se observan en El Roble – Los Santos – Santander (1.006 mm año⁻¹); Restrepo – Valle (1.067 mm año⁻¹) y Tibacuy – Cundinamarca (1.102 mm año⁻¹). Los mayores valores de lluvia registrados se reportan en Cocorná – Antioquia con 4.814 mm; Samaná – Caldas (7.354 mm año⁻¹) y Pensilvania – Caldas (5.527 mm año⁻¹). Lluvias superiores a 2.800 mm año⁻¹ se presentan en El Limón- Tolima (2.866 mm) y Llanadas-Caldas (2.851 mm); lluvias anuales cercanas a 2.700 mm año⁻¹ se tienen en las localidades de Montelíbano – Cundinamarca (2.698 mm), F. Romero – Norte de Santander (2.760 mm), Naranjal – Caldas (2.711 mm) y El Cedral – Risaralda (2.709 mm).

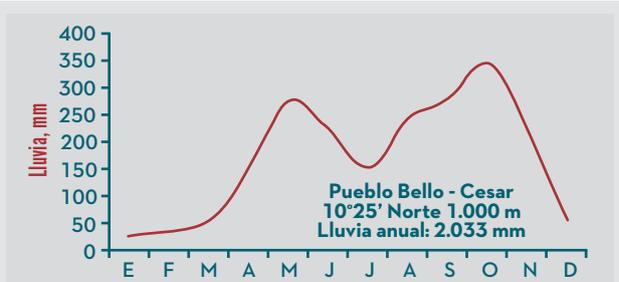


Figura 54.
Distribución de la lluvia en la región Andina, Norte de Colombia.

Distribución de la lluvia

La distribución de la lluvia se refiere a la disponibilidad de ella a través del año. El conocimiento en una región de la distribución de la lluvia, expresada como la ocurrencia de los períodos secos y húmedos, permite la planificación de las labores agrícolas,

entre ellas, las épocas para las siembras, desyerbas, fertilizaciones, planificación del riego, establecimiento de prácticas para la conservación del suelo y control de la erosión hídrica. En el caso del café permite conocer las épocas de floración (y en consecuencia la distribución de la producción durante el año) y épocas de controles fitosanitarios, entre otras labores.

Ciclo diurno de la precipitación

Algunas características de las lluvias de la zona cafetera se presentan en la Tabla 22, en la cual se describe la proporción de la lluvia diurna y nocturna y el número de días de lluvia. El número de días con lluvia presenta un valor medio de 211 días con un valor mínimo de 151 en Pueblo Bello-Cesar y un máximo de 251 días en M. Valencia-Antioquia (Tabla 23).

El ciclo diurno varía durante el año, presentando comportamientos unimodales, bimodales, trimodales o multimodales en los valores máximos porcentuales de lluvia. La menor precipitación se presenta en horas de la mañana. La distribución de los valores máximos muestra alta variabilidad en el transcurso del año. Los mecanismos físicos que explican esta dinámica están asociados con el ciclo diurno de calentamiento radiativo, dinámica de los complejos convectivos de meso-escala, interacción suelo-atmósfera y factores de circulación atmosférica regional y local. El ciclo diurno está influenciado por la altitud de los valles interandinos. En las vertientes del río Cauca las lluvias de madrugada son más frecuentes en las zonas bajas y a medida que se asciende altitudinalmente la lluvia tiende a presentarse en las horas de la tarde (Poveda *et al.*, 2002).

Las estaciones cercanas al nacimiento de los ríos Cauca y Magdalena, generalmente presentan un comportamiento multimodal de la lluvia del día y la noche, con máximos de lluvia horaria que ocurren en gran parte de la tarde y las horas al final del día. Las



Figura 55. Distribución de la lluvia en la región Andina Central de Colombia.

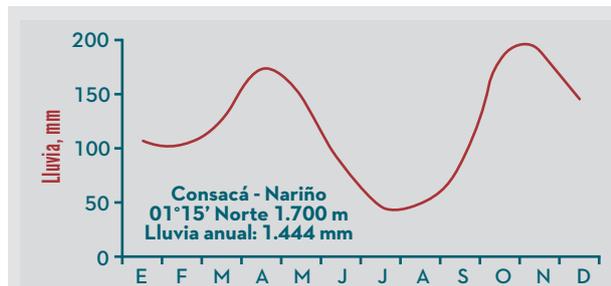


Figura 56. Distribución de la lluvia en la región Andina Sur de Colombia.

estaciones ubicadas en la vertiente Oriental de la cordillera Central son las que evidencian menos variaciones anuales en la fase del ciclo diurno y las que presentan más variabilidad son las estaciones pertenecientes a la vertiente Occidental de la cordillera Oriental (Poveda *et al.*, 2002).

Se ha encontrado una fuerte asociación entre El Niño y La Niña y el ciclo diurno de la lluvia en los Andes tropicales de Colombia. Durante El Niño se disminuye la intensidad de los aguaceros a escala horaria y lo contrario para La Niña. En promedio, para las estaciones analizadas, durante La Niña se presenta un incremento en la cantidad diaria de precipitación del 20,0% mientras que durante El Niño se presenta una disminución del 21,3% (Poveda *et al.*, 2005).

La alta variabilidad espacial de la lluvia diurna por diferencia en las dinámicas locales no permite realizar generalizaciones. Se considera que factores como la orografía, circulaciones

Tabla 22.

Cantidad de lluvia mensual (mm) en la zona cafetera de Colombia (probabilidad del 75%). (Cenicafé, 2017).

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
Cesar																
El Helechal	Pueblo Bello	1.447	17	16	98	223	360	190	191	256	280	374	290	103	2.397	12
Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	20	30	57	155	286	214	153	237	284	325	228	62	2.052	57
Magdalena																
La Victoria	Santa Marta	1.100	14	12	23	133	309	299	260	319	375	386	243	63	2.436	58
Norte de Santander																
Blonay	Chinácota	1.250	53	63	79	168	158	90	78	89	141	234	211	101	1.463	60
Gabriel M Barriga	Convención	1.261	38	35	46	104	118	93	98	113	168	169	135	74	1.190	20
Francisco Romero	Salazar	903	132	120	146	294	278	94	86	144	254	471	421	249	2.688	56
Santander																
Ceylan	Bucaramanga	1.304	100	127	163	129	122	77	66	60	115	164	158	95	1.377	33
Chapa (El Nogal)	Charalá	1.560	86	137	220	330	333	232	184	215	244	335	260	108	2.683	34
Villanueva	Charalá	1.450	131	151	286	326	343	212	183	235	283	354	299	186	2.989	17
Cuchicute	Curití	1.600	12	47	67	150	160	172	163	150	141	120	98	34	1.313	17
Miporal	Floridablanca	1.237	59	98	127	112	166	115	112	113	124	143	126	58	1.353	17
San Antonio	Floridablanca	1.539	92	109	134	127	170	125	126	122	145	151	143	79	1.524	18
Bonanza	Girón	1.250	111	139	157	154	189	92	72	85	130	245	244	99	1.716	15
Chochos	Hato	1.400	64	100	170	273	253	165	148	183	247	296	239	103	2.241	17
El Roble	Los Santos	1.646	39	84	87	92	113	78	57	77	96	136	105	44	1.006	10
Las Delicias	Palmas del Socorro	1.450	68	95	152	205	248	208	178	218	239	282	198	62	2.152	12
La Laguna	Páramo	1.550	30	68	115	199	234	216	204	211	224	229	153	47	1.930	17
Las Flores	Pinchote	1.700	26	61	114	175	195	163	174	172	193	207	131	43	1.654	17
La Cumbre	Puente Nacional	1.691	81	107	183	315	320	187	147	136	207	297	249	126	2.353	32
Cocal	Rionegro	700	102	106	164	120	133	63	53	74	121	190	162	86	1.374	17
El Silencio	Rionegro	1.120	122	154	179	238	230	149	142	147	157	243	199	144	2.103	17
Los Cocos	Rionegro	1.300	105	128	165	168	181	88	70	79	137	212	200	98	1.630	17
Palestina	Rionegro	1.350	99	110	166	155	197	76	87	115	115	192	203	117	1.632	10
Santa Rita	San Gil	1.600	21	55	84	161	198	173	175	168	184	191	116	41	1.568	32
Aguasblancas	San Vicente	964	84	134	184	217	219	136	114	154	154	229	197	96	1.917	33
Casa de Teja	San Vicente	960	123	174	252	240	262	189	181	166	253	381	282	175	2.678	17
Alberto Santos	Socorro	1.499	35	62	113	197	196	150	143	143	178	211	157	58	1.645	17
La Chapola	Socorro	1.731	41	73	149	187	188	173	175	174	198	214	156	46	1.775	16
La Plazuela	Socorro	1.672	35	79	133	193	206	165	155	169	193	222	177	54	1.780	17
El Mesón	Valle de San José	1.330	35	83	146	215	241	207	190	209	199	232	185	53	1.995	17
Boyacá																
Bertha	Moniquirá	1.677	56	77	151	245	273	191	152	157	190	245	167	87	1.992	58
Cundinamarca																
San Luis	Arbeláez	1.700	87	98	142	159	151	101	61	63	75	179	165	125	1.405	17
Mesitas Sta Inés	Cachipay	1.340	92	106	145	173	148	76	56	61	124	213	198	131	1.522	45

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
Santa Rosita	El Peñón	1.437	193	217	341	353	265	153	112	102	170	334	295	255	2.791	17
Granada	Guaduas	1.524	86	62	187	262	153	80	82	53	64	230	197	106	1.562	6
Honduras	La Mesa	1.077	133	135	200	206	187	97	46	58	83	236	251	184	1.816	17
Canaima	La Palma	1.594	103	131	225	288	234	165	108	104	162	266	261	142	2.189	20
Misiones	El Colegio	1.540	94	109	157	178	143	65	50	58	101	171	176	118	1.420	33
Icalí	Sasaima	1.328	213	237	268	299	229	106	76	89	143	328	316	236	2.539	35
Santa Bárbara	Sasaima	1.478	228	289	280	283	206	116	61	75	137	321	315	250	2.559	23
Pinar Del Río	Silvania	1.752	136	117	164	208	178	132	89	94	121	192	184	125	1.740	17
Granja Tibacuy	Tibacuy	1.538	70	83	114	122	101	57	41	38	70	148	160	99	1.103	59
La Vistosa	Topaipí	1.374	268	266	490	457	462	260	233	203	300	488	461	299	4.187	13
Cerinza	Vergara	1.450	178	200	263	281	204	117	61	67	133	334	266	175	2.278	17
La Florida	Vergara	1.400	156	203	244	258	206	96	77	70	129	312	307	170	2.229	25
El Jardín (El Clavel)	Yacopí	1.245	109	149	238	342	341	250	200	171	228	281	199	150	2.657	14
Montelibano	Yacopí	1.365	119	148	230	354	348	207	163	168	238	328	261	163	2.729	52
Tolima																
Totarito	Alvarado	1.250	88	102	173	228	254	139	100	107	183	195	166	122	1.858	29
Janiyof	Anzoátegui	1.720	117	119	195	225	217	131	95	83	185	211	194	151	1.923	28
Alto Llanadas	Casabianca	1.610	208	236	300	274	308	135	121	131	198	333	328	198	2.772	10
El Horizonte	Cunday	1.270	106	207	186	179	194	140	79	185	137	277	306	169	2.166	13
El Campín	Dolores	1.219	135	141	264	247	215	76	71	34	69	297	369	230	2.148	10
Tricontinental	Fresno	1.269	258	213	281	340	317	176	125	184	272	350	376	268	3.160	12
Chapetón	Ibagué	1.353	101	121	177	222	236	165	117	120	174	223	210	144	2.010	56
Planes	Lérida	1.223	134	129	194	276	288	158	121	139	207	237	213	126	2.222	23
El Edén	Líbano	1.373	179	171	232	303	292	143	142	150	232	292	279	155	2.571	23
La Trinidad	Líbano	1.456	122	136	182	265	272	145	103	120	220	263	216	130	2.173	39
El Inciensial	Murillo	2.400	152	168	214	269	296	148	92	92	213	242	261	181	2.327	23
El Recreo	Ortega	1.504	200	208	278	417	347	167	125	107	191	328	337	236	2.938	20
Buenos Aires	Palocabildo	1.410	283	173	260	330	311	161	143	167	218	350	387	309	3.092	10
Huila																
Guayabal	Algeciras	1.460	87	99	136	155	131	99	78	45	69	123	145	97	1.264	17
Villa Consuelo	Garzón	1.570	84	98	144	171	170	143	114	62	71	154	115	100	1.425	17
Jorge Villamil	Gigante	1.420	76	99	129	154	141	117	89	67	74	146	133	106	1.330	56
La Primavera	Gigante	1.386	88	105	120	159	157	143	119	61	89	168	149	129	1.487	25
Montenegro	Gigante	2.099	94	97	116	177	173	148	113	85	91	189	160	108	1.549	12
Corrales	Teruel	1.450	217	208	282	250	176	114	98	60	82	254	235	171	2.148	17
Conc. Desarrollo	Timaná	1.141	80	97	130	155	147	98	81	55	68	135	136	116	1.298	17
Antioquia																
Carimagua	Amagá	1.802	94	101	198	271	325	234	186	174	252	272	214	132	2.453	14
El Trapiche	Bolívar	1.277	107	148	179	243	314	234	219	177	256	227	199	152	2.456	15
Cocorná	Cocorná	1.344	294	257	411	450	486	341	329	341	482	540	503	381	4.814	14

Continúa...



...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
Bariloche	Fredonia	1.748	105	113	174	246	322	235	191	229	293	314	307	176	2.702	28
El Olvido	Fredonia	971	58	66	170	229	227	299	187	193	190	251	205	109	2.183	11
La Blanquita	Fredonia	570	68	90	126	175	253	202	149	198	237	252	222	121	2.090	27
Santa Cruz	Fredonia	1.400	89	99	151	203	266	217	167	204	258	302	277	166	2.401	18
Santa Isabel	Fredonia	1.963	120	135	203	238	276	249	183	194	300	298	295	198	2.691	12
Miguel Valencia	Jardín	1.621	89	108	170	238	243	192	162	181	214	234	189	133	2.154	58
El Porvenir	Jericó	1.906	113	126	210	255	373	244	199	188	274	294	243	211	2.730	11
La Cristalina	Támesis	775	92	112	163	199	264	204	183	166	241	280	247	159	2.310	15
Virgen de Oro	Támesis	1.656	103	131	184	237	293	242	233	209	299	333	294	222	2.780	13
El Rosario	Venecia	1.635	94	103	162	248	335	254	193	218	274	313	253	155	2.601	44
Caldas																
Cuatro Esquinas	Aguadas	1.900	65	71	124	163	215	140	123	143	192	236	225	118	1.814	28
Guaymaral	Aguadas	1.600	76	83	140	193	221	150	116	151	204	230	219	125	1.908	49
San José	Aguadas	1.663	96	126	202	237	298	196	190	177	269	313	282	187	2.573	12
El Tabuyo	Anserma	1.669	109	102	204	237	292	189	172	170	209	244	228	172	2.329	12
Santa Fé	Anserma	1.410	113	126	200	259	269	184	184	173	248	268	267	215	2.506	12
Bengala	Chinchiná	1.650	162	180	274	329	314	227	178	190	208	326	335	296	3.018	9
Cenicafé	Manizales	1.310	154	156	209	276	278	193	164	173	202	302	264	190	2.561	69
La Divisa	Chinchiná	1.590	192	195	248	277	285	210	201	197	248	288	298	206	2.845	18
La Francia	Chinchiná	1.267	141	153	239	284	293	235	225	188	192	267	255	175	2.647	34
La Romelia	Chinchiná	1.335	159	173	237	272	276	218	210	180	204	264	282	196	2.670	21
La Sierra	Chinchiná	1.440	166	166	226	269	269	200	220	195	237	262	318	207	2.735	23
Moravo	Chinchiná	1.146	147	160	247	295	307	249	225	191	216	279	312	205	2.833	14
Naranjal	Chinchiná	1.381	161	167	220	301	311	228	201	206	219	299	284	186	2.782	60
El Mirador	Filadelfia	1.650	148	136	192	229	249	165	129	129	177	258	240	187	2.236	18
La Julia	Filadelfia	1.650	114	110	165	222	239	161	115	140	176	238	244	175	2.100	24
El Socorro	La Merced	1.852	105	134	210	209	261	145	106	160	180	292	282	199	2.282	12
Agronomía	Manizales	2.088	117	135	159	207	190	117	78	98	152	259	236	154	1.903	55
El Pistacho	Manizales	1.582	137	110	208	230	201	142	120	109	175	249	247	169	2.097	21
Java	Manizales	1.778	134	122	181	201	201	117	106	113	160	254	226	150	1.965	30
La Juliana	Manizales	1.785	162	133	170	213	197	140	95	108	160	257	257	182	2.073	17
La Selva	Manizales	1.312	140	114	192	262	246	172	157	157	223	273	268	181	2.384	26
Las Colinas	Manizales	1.450	139	138	197	275	213	149	130	131	216	253	254	167	2.262	20
Planalto	Manizales	1.413	164	177	224	259	254	185	179	178	220	287	267	191	2.585	18
Santa Teresa	Manizales	1.698	156	143	193	231	212	167	109	119	200	256	287	191	2.264	20
Santa Teresita	Manizales	1.172	141	139	205	275	284	183	171	136	224	257	285	187	2.489	22
El Brisal	Manzanares	1.390	197	220	306	312	294	180	141	160	252	356	324	208	2.949	12
El Descanso	Marmato	1.803	100	101	154	174	211	129	97	120	184	212	213	150	1.845	30
La Esperanza	Marquetalia	1.463	269	279	402	326	393	251	205	200	338	417	380	261	3.721	11
Santa Helena	Marquetalia	1.395	341	337	384	383	359	178	158	207	322	443	494	459	4.064	31

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
Piamonte	Neira	1.625	173	122	185	227	253	152	119	143	155	327	281	236	2.373	12
La Cascada	Pácora	1.600	113	123	150	185	239	149	126	139	190	241	280	161	2.096	28
La Linda	Pácora	1.750	109	147	175	210	264	172	167	154	226	280	264	185	2.353	28
El Recreo	Palestina	1.430	160	138	191	300	283	216	189	187	256	260	280	167	2.628	41
Granja Luker	Palestina	1.031	111	127	169	224	264	191	155	181	212	241	230	149	2.255	47
La Argentina	Palestina	1.354	138	162	215	281	275	210	217	186	231	251	270	179	2.614	25
La Margarita	Palestina	1.436	147	159	204	227	306	204	193	146	190	256	300	188	2.521	11
La Palma	Palestina	1.165	137	181	235	285	307	232	222	203	220	280	303	179	2.784	24
Santágueda	Palestina	1.026	109	129	178	247	272	196	159	169	208	237	232	155	2.290	47
Granja Kennedy	Pensilvania	1.800	225	217	380	373	353	172	168	179	251	433	449	337	3.537	17
Hogar Juvenil	Pensilvania	1.560	412	412	496	519	599	356	313	275	472	611	551	512	5.527	22
Villaraz	Pensilvania	1.650	301	339	431	312	376	206	156	232	270	363	354	329	3.669	17
La Argentina	Riosucio	1.420	142	158	236	286	295	184	155	164	240	322	308	194	2.685	33
La Manuelita	Riosucio	1.460	111	137	182	246	252	156	154	175	224	265	238	138	2.278	40
San Lucas	Risaralda	1.105	74	142	201	264	318	203	175	185	201	235	226	188	2.412	12
La Gaviota	Salamina	1.772	90	119	228	229	196	137	122	112	190	284	272	173	2.151	12
El Tiburio	Samaná	1.403	670	406	668	627	718	423	394	382	663	857	829	716	7.354	11
La Divisa	San José	1.686	173	163	280	284	374	264	220	201	245	259	292	231	2.986	12
Rafael Escobar	Supía	1.307	108	115	169	194	221	140	116	131	190	229	235	164	2.014	40
Cuba	Victoria	1.054	312	241	351	387	373	181	170	252	387	526	576	454	4.211	22
La Pastorita	Victoria	1.122	346	304	414	413	389	179	162	257	370	596	596	482	4.507	32
Bello Horizonte	Villamaría	1.690	144	119	187	214	223	128	126	128	188	284	252	151	2.144	12
La Esmeralda	Viterbo	1.365	75	108	159	173	228	138	147	167	140	199	209	94	1.836	11
Risaralda																
La Tribuna	Balboa	1.580	117	136	206	251	263	185	140	142	187	255	286	189	2.357	30
La Elvira	Belen de Umbría	1.540	130	141	179	209	269	218	165	173	200	241	289	190	2.404	17
Los Cámbulos	Belen de Umbría	1.400	117	157	187	217	305	215	168	143	186	227	271	196	2.387	14
El Bosque	Dosquebradas	1.458	184	175	267	313	304	209	175	170	250	340	332	220	2.939	33
Las Hortensias	Dosquebradas	1.977	195	181	321	385	360	300	250	229	243	380	436	350	3.632	10
Buenos Aires	Guática	1.814	94	100	139	218	197	149	128	133	183	196	162	108	1.805	30
Ospirma	Guática	1.661	86	90	129	214	192	153	129	130	178	186	155	94	1.736	30
La Palmera	Marsella	1.450	147	145	206	292	281	216	207	227	223	261	277	169	2.650	30
El Barranco	Mistrató	1.580	72	90	123	167	160	137	121	93	133	177	165	98	1.536	17
Combia	Pereira	1.173	123	133	203	234	252	187	132	123	177	259	279	166	2.266	30
El Cedral	Pereira	2.120	209	193	250	302	253	145	99	96	164	379	336	239	2.664	50
El Pílamo	Pereira	1.113	110	140	208	243	242	190	179	136	187	236	294	230	2.396	13
La Catalina	Pereira	1.321	118	127	207	214	248	175	131	111	184	240	263	185	2.202	25
La Playa	Pereira	1.290	120	109	218	223	253	172	126	119	184	267	274	160	2.225	29
La Renta	Pereira	1.194	107	106	188	204	203	164	112	105	160	217	231	164	1.961	24
Los Cámbulos	Pereira	1.189	94	110	172	217	212	143	110	117	145	208	229	132	1.889	47

Continúa...



...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
Planta Tratamiento	Pereira	1.487	156	167	238	287	282	211	143	153	204	317	311	219	2.689	42
El Diamante	Quinchía	1.550	108	114	170	234	245	139	137	146	187	213	194	139	2.027	30
La Oriental	Quinchía	1.730	118	116	168	252	230	166	149	158	225	251	221	147	2.201	30
El Jazmín	Sta Rosa de Cabal	1.635	166	178	233	290	265	202	163	173	206	289	295	202	2.662	51
Los Naranjos	Santuario	1.580	127	132	195	273	261	169	131	135	186	282	281	172	2.345	30
Quindío																
La Pradera	Armenia	1.350	146	144	201	251	219	134	97	80	181	266	267	189	2.174	29
Tucumán	Armenia	1.250	128	119	210	251	223	162	122	112	206	279	255	176	2.242	29
La Esperanza	Buenavista	1.428	163	154	239	274	215	115	81	77	166	323	300	229	2.334	29
Paraguacito	Buenavista	1.203	140	140	213	263	212	107	80	89	154	288	288	186	2.161	48
El Jardín	Calarcá	1.365	179	156	243	264	233	124	93	79	149	338	331	239	2.428	23
La Bella	Calarcá	1.449	146	146	203	256	203	107	68	78	135	288	317	230	2.176	60
Quebradanegra	Calarcá	1.500	218	159	229	252	242	109	96	78	152	305	358	234	2.433	29
La Ilusión	Circasia	1.442	197	159	228	277	272	157	109	109	200	318	312	232	2.569	28
Mónaco	Córdoba	1.350	166	138	229	274	223	109	89	92	175	315	320	197	2.328	29
La Esperanza	Filandía	1.671	194	186	276	303	259	163	125	115	199	304	332	283	2.739	23
La Alejandría	Génova	1.600	153	120	187	204	185	84	65	60	158	263	256	172	1.906	20
La Esperanza	Génova	1.650	113	105	162	199	179	74	83	67	134	262	267	179	1.825	11
La Argentina	La Tebaida	1.200	120	107	184	250	206	128	94	98	173	259	250	170	2.038	38
La Miranda	La Tebaida	1.193	102	122	192	240	214	125	111	105	187	244	210	149	2.002	29
El Agrado	Montenegro	1.275	117	110	198	255	228	147	110	109	181	261	243	158	2.117	31
La Julia	Montenegro	1.250	145	122	211	275	273	149	109	90	206	288	262	196	2.324	25
Sorrento	Montenegro	1.203	113	112	181	246	239	158	109	96	181	234	220	145	2.033	29
El Porvenir	Pijao	1.470	135	137	209	231	192	88	88	57	141	267	302	231	2.076	21
Almacafé Vivero	Quimbaya	1.330	114	130	187	244	243	164	111	118	179	266	257	158	2.171	60
Maracay	Quimbaya	1.402	153	146	222	281	268	169	114	119	199	295	289	193	2.447	34
Valle del Cauca																
Arturo Gómez	Alcalá	1.259	105	113	179	231	241	159	100	111	162	235	225	150	2.009	45
Bellavista	Ansermanuevo	1.528	76	89	138	198	175	112	104	102	145	193	168	102	1.602	37
El Placer	Ansermanuevo	1.744	101	103	159	189	194	120	84	104	130	205	202	101	1.693	40
Santiago Gutiérrez	Argelia	1.530	69	83	120	169	160	106	93	95	123	171	146	91	1.427	39
Venecia	Caicedonia	1.168	122	119	190	231	179	98	76	67	153	240	238	161	1.875	27
El Berrión	Cartago	1.166	91	103	181	196	203	136	101	95	159	185	197	136	1.784	24
Santa Marta	El Águila	1.764	134	135	175	211	208	147	111	119	145	236	262	180	2.064	31
Albán	El Cairo	1.510	81	82	105	158	157	113	86	100	131	184	187	122	1.505	36
La Selva	Ginebra	1.805	131	123	174	204	145	73	44	45	108	210	234	169	1.659	31
Julio Fernández	Restrepo	1.381	50	59	86	132	120	86	65	66	99	145	117	71	1.097	57
La Sirena	Sevilla	1.519	124	120	202	272	214	137	115	79	169	250	253	178	2.112	21
Manuel M. Mallarino	Trujillo	1.331	94	91	143	199	189	127	87	87	144	218	216	140	1.734	42

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Total anual	No. de años
El Recreo	Ulloa	1.421	125	131	215	227	258	168	118	110	182	234	280	184	2.233	25
Cauca																
Madrigal	Caldono	1.434	168	131	165	158	152	75	62	53	74	171	229	160	1.597	14
La Suecia	El Tambo	1.693	196	183	194	238	184	97	75	62	141	272	334	299	2.275	12
Manuel Mejía	El Tambo	1.735	181	150	163	188	150	69	50	55	120	287	330	247	1.990	59
La Trinidad	Piendamó	1.671	222	181	252	254	239	122	79	73	126	234	254	215	2.249	33
Portachuelo	Rosas	1.695	298	196	241	268	198	85	51	47	108	322	430	380	2.624	31
La Esperanza	Santander Quilichao	1.608	201	175	233	253	181	110	70	79	113	293	298	258	2.264	10
Mondomo	Santander Quilichao	1.380	207	168	219	206	169	86	77	73	110	226	281	216	2.037	28
Nariño																
Ospina Pérez	Consacá	1.603	111	106	131	168	149	84	48	46	82	173	187	148	1.432	60
El Sauce	La Unión	1.609	150	152	196	231	173	85	45	42	98	232	285	195	1.885	29

Tabla 23.

Características anuales de la lluvia en la zona cafetera (Cenicafé, 2017; Jaramillo, *et al.*, 2011; Suárez, 1974).

Depto/Estación	Municipio	Altitud (m)	Lluvia anual (mm)	Lluvia nocturna (%)	Lluvia diurna (%)	No. de días de lluvia
Antioquia						
Miguel Valencia	Jardín	1.621	2.174	38	62	251
El Rosario	Venecia	1.635	2.601	31	69	230
El Trapiche	Ciudad Bolívar	1.277	2.480	22	78	222
Cocorná	Cocorná	1.344	4.761	18	82	282
Virgen de Oro	Támesis	1.656	2.638	17	83	213
La Cristalina	Támesis	775	2.312	15	85	193
Boyacá						
Bertha	Moniquirá	1.677	2.005	42	58	236
Caldas						
Planalto	Manizales	1.413	2.557	35	65	235
Almacafé Letras	Manizales	3.684	1.820	55	45	234
Llano Grande	Neira	1.414	2.178	29	71	205
Llanadas	Manzanares	1.420	2.536	28	72	194
Santa Helena	Marquetalia	1.395	4.055	25	75	224
Villaraz	Pensilvania	1.650	4.938	20	80	163
Santa Ana	Palestina	1.250	2.474	28	72	206
La Palma	Palestina	1.165	2.673	29	71	186
La Romelia	Chinchiná	1.335	2.684	32	68	231

Continúa...

...continuación

Depto/Estación	Municipio	Altitud (m)	Lluvia anual (mm)	Lluvia nocturna (%)	Lluvia diurna (%)	No. de días de lluvia
Naranjal	Chinchiná	1.381	2.785	33	67	249
La Margarita	Palestina	1.436	2.532	30	70	205
Cenicafé	Manizales	1.310	2.554	34	66	240
Agronomía	Manizales	2.088	1.899	49	51	229
Santágueda	Palestina	1.026	2.277	26	74	216
Granja Luker	Palestina	1.031	2.262	26	74	205
Rafael Escobar	Supía	1.307	2.003	25	75	189
Cauca						
La Trinidad	Piendamó	1.671	2.236	56	44	189
Manuel Mejía	El Tambo	1.735	2.033	47	53	208
Cesar						
Pueblo Bello	Valledupar	1.134	2.015	63	37	152
Cundinamarca						
Granja Tibacuy	Tibacuy	1.538	1.114	49	51	178
Misiones	El Colegio	1.540	1.422	56	44	209
Mesitas de Santa Inés	Cachipay	1.340	1.522	63	37	176
Montelíbano	Yacopí	1.365	2.732	41	59	244
Santa Bárbara	Sasaima	1.478	2.552	38	62	214
Santa Rosita	El Peñón	1.437	2.632	47	53	213
Huila						
Simón Campos	La Plata	1.754	1.738	53	47	207
Jorge Villamil	Gigante	1.420	1.345	62	38	239
Magdalena						
La Victoria	Santa Marta	1.100	2.422	85	15	158
Agroberlín	Ciénaga	1.290	2.089	90	10	197
Jirocasaca	Santa Marta	710	2.240	79	21	132
Nariño						
El Sauce	La Unión	1.609	1.902	49	51	176
Ospina Pérez	Consacá	1.603	1.422	35	65	192
Norte De Santander						
Blonay	Chinácota	1.250	1.471	44	56	184
Francisco Romero	Salazar	903	2.675	30	70	186
Gabriel M. Barriga	Convención	1.261	1.209	45	55	163
Quindío						
La Esperanza	Pijao	1.667	1.931	50	50	184
Bremen	Circasia	2.028	2.881	62	38	234
La Bella	Calarcá	1.449	2.177	42	58	201
Paraguaicito	Buenavista	1.203	2.152	41	59	200

Continúa...

...continuación

Depto/Estación	Municipio	Altitud (m)	Lluvia anual (mm)	Lluvia nocturna (%)	Lluvia diurna (%)	No. de días de lluvia
El Sena	Armenia	1.550	2.496	62	38	206
El Agrado	Montenegro	1.275	2.106	47	53	192
Maracay	Quimbaya	1.402	2.415	51	49	207
Risaralda						
El Píamo	Pereira	1.113	2.286	34	66	225
La Catalina	Pereira	1.321	2.217	44	56	221
Planta de Tratamiento	Pereira	1.487	2.717	49	51	246
El Jazmín	Sta Rosa de Cabal	1.635	2.660	42	58	249
El Cedral	Pereira	2.120	2.641	73	27	235
La Elvira	Belén de Umbría	1.540	2.351	42	58	218
Ospirma	Guática	1.661	1.717	42	58	194
Santander						
Alberto Santos	Socorro	1.499	1.602	33	67	203
El Roble	Los Santos	1.646	948	35	65	168
San Antonio	Floridablanca	1.539	1.527	50	50	215
Aguasblancas	San Vicente de Ch.	964	1.899	42	58	205
Tolima						
Tricontinental	Fresno	1.269	3.088	30	70	163
El Campín	Dolores	1.219	2.203	52	48	186
Luis Bustamante	Villarrica	1.616	1.915	66	34	239
Chapetón	Ibagué	1.353	2.022	46	54	197
La Trinidad	Libano	1.456	2.181	35	65	203
Los Andes	Planadas	1.400	2.004	44	56	160
El Limón	Chaparral	990	2.320	29	71	176
El Horizonte	Cunday	1.270	1.903	52	48	123
Valle del Cauca						
Manuel M. Mallarino	Trujillo	1.331	1.734	52	48	177
La Selva	Ginebra	1.805	1.614	59	41	194
La Sirena	Sevilla	1.519	2.098	50	50	195
El Berrión	Cartago	1.166	1.759	45	55	178
El Recreo	Ulloa	1.421	2.311	50	50	220
Arturo Gómez	Alcalá	1.259	1.997	49	51	212
Venecia	Caicedonia	1.168	1.942	42	58	179
Julio Fernández	Restrepo	1.381	1.086	51	49	189
Santiago Gutiérrez	Argelia	1.530	1.435	58	42	191
Albán	El Cairo	1.510	1.486	54	46	216



locales, la humedad atmosférica, los procesos termodinámicos que inducen alta inestabilidad, la evaporación local, la interacción suelo-atmósfera y los complejos convectivos de mesoescala presentan cambios según la época del año y afectan de manera directa la dinámica atmosférica local, provocando cambios en la fase y amplitud del ciclo diurno de precipitación.

La intensidad de la lluvia

La intensidad de la lluvia se refiere a la cantidad registrada por unidad de tiempo. La determinación de las características de la lluvia como la intensidad, la duración y la frecuencia, en una localidad, son necesarias para el correcto diseño de las obras de infraestructura, manejo de aguas, planificación

de cuencas, embalses y drenajes, y para una adecuada orientación en los planes de uso, manejo y conservación de los suelos.

La región Andina de Colombia por su ubicación en el área tropical presenta, en general, altas intensidades de lluvia, por lo que se constituye en una región de continua escorrentía, que tiene incidencia sobre los suelos, los cultivos y obras con la presencia de fenómenos erosivos, remociones en masa y sedimentación.

En la Tabla 24 se presentan las Ecuaciones <35> a la <70> para estimar la intensidad máxima (mm h^{-1}) como una función del período de retorno (T , años), y la duración de la lluvia (t , min) para tiempos de lluvias comprendidos entre 5 y 120 minutos. En la Tabla 25 se presenta la lluvia máxima en algunas localidades de la zona para un período de retorno de 10 años y para 5, 10 y 60 minutos.

Tabla 24.

Ecuaciones para la estimación de la intensidad máxima de la lluvia (mm h^{-1}) en función del período de retorno (T , años), y la duración de la lluvia (t , min) (Jaramillo y Kogson, 1994).

Estación	Municipio	Expresión	R ²
Pueblo Bello	Pueblo Bello	$I = \frac{391 \times T^{0,132}}{(t + 5)^{0,450}} <35>$	0,98
F. Romero	Salazar	$I = \frac{1682 \times T^{0,153}}{(t + 20)^{0,813}} <36>$	0,97
Blonay	Chinácota	$I = \frac{1904 \times T^{0,169}}{(t + 40)^{0,791}} <37>$	0,94
Bertha	Moniquirá	$I = \frac{5073 \times T^{0,184}}{(t + 40)^{1,068}} <38>$	0,98
Montelíbano	Yacopí	$I = \frac{1142 \times T^{0,147}}{(t + 10)^{0,270}} <39>$	0,99
Mesitas de Santa Inés	Cachipay	$I = \frac{743 \times T^{0,200}}{(t + 15)^{0,641}} <40>$	0,99

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Expresión	R ²
Tibacuy	Tibacuy	$I = \frac{1977 \times T^{0,147}}{(t + 15)^{0,963}} <41>$	0,99
Llanadas	Manzanares	$I = \frac{3653 \times T^{0,145}}{(t + 40)^{0,966}} <42>$	0,97
Agronomía	Manizales	$I = \frac{3896 \times T^{0,154}}{(t + 25)^{1,020}} <43>$	0,99
Santa Ana	Palestina	$I = \frac{987 \times T^{0,166}}{(t + 15)^{0,742}} <44>$	0,99
Santágueda	Palestina	$I = \frac{957 \times T^{0,167}}{(t + 20)^{0,731}} <45>$	0,99
Cenicafé	Manizales	$I = \frac{1092 \times T^{0,133}}{(t + 15)^{0,755}} <46>$	0,99
Naranjal	Chinchiná	$I = \frac{1035 \times T^{0,184}}{(t + 20)^{0,716}} <47>$	0,98
R. Escobar	Supía	$I = \frac{5369 \times T^{0,128}}{(t + 35)^{1,080}} <48>$	0,99
El Rosario	Venecia	$I = \frac{3733 \times T^{0,168}}{(t + 15)^{1,034}} <49>$	0,97
M. Valencia	Jardín	$I = \frac{3055 \times T^{0,160}}{(t + 30)^{1,026}} <50>$	0,99
L. Bustamante	Villarrica	$I = \frac{3732 \times T^{0,147}}{(t + 35)^{1,017}} <51>$	0,98
La Montaña	Dolores	$I = \frac{986 \times T^{0,179}}{(t + 15)^{0,740}} <52>$	0,99
Chapetón	Ibagué	$I = \frac{2475 \times T^{0,131}}{(t + 35)^{0,882}} <53>$	0,97
El Limón	Chaparral	$I = \frac{1338 \times T^{0,182}}{(t + 15)^{0,748}} <54>$	0,99
J. Villamil	Gigante	$I = \frac{3549 \times T^{0,160}}{(t + 45)^{0,973}} <55>$	0,96

Continúa...

...continuación

Estación	Municipio	Expresión	R ²
El Jazmín	Santa Rosa de Cabal	$I = \frac{1288 \times T^{0,181}}{(t + 15)^{0,798}}$ <56>	0,97
Planta Tratamiento	Pereira	$I = \frac{1038 \times T^{0,195}}{(t + 20)^{0,703}}$ <57>	0,99
El Cedral	Pereira	$I = \frac{1181 \times T^{0,175}}{(t + 15)^{0,769}}$ <58>	0,99
Bremen	Circasia	$I = \frac{2470 \times T^{0,153}}{(t + 10)^{0,991}}$ <59>	0,97
El Sena	Armenia	$I = \frac{1489 \times T^{0,153}}{(t + 20)^{0,796}}$ <60>	0,98
La Bella	Calarcá	$I = \frac{1745 \times T^{0,163}}{(t + 15)^{0,841}}$ <61>	0,99
Paraguaitico	Buenavista	$I = \frac{1285 \times T^{0,183}}{(t + 25)^{0,753}}$ <62>	0,97
S. Gutiérrez	Argelia	$I = \frac{1553 \times T^{0,176}}{(t + 15)^{0,851}}$ <63>	0,99
A. Gómez	Alcalá	$I = \frac{1090 \times T^{0,181}}{(t + 20)^{0,767}}$ <64>	0,99
H. Uribe	Sevilla	$I = \frac{1252 \times T^{0,160}}{(t + 20)^{0,754}}$ <65>	0,99
M. Mallarino	Trujillo	$I = \frac{286 \times T^{0,205}}{(t + 10)^{0,446}}$ <66>	0,94
J. Fernández	Restrepo	$I = \frac{2901 \times T^{0,200}}{(t + 25)^{0,995}}$ <67>	0,98
La Florida	Popayán	$I = \frac{2027 \times T^{0,154}}{(t + 15)^{0,945}}$ <68>	0,99
M. Mejía	El Tambo	$I = \frac{2135 \times T^{0,203}}{(t + 25)^{0,884}}$ <69>	0,99
O. Pérez	Consacá	$I = \frac{621 \times T^{0,197}}{(t + 20)^{0,648}}$ <70>	0,98

La lluvia máxima diaria absoluta presenta sus mayores niveles de ocurrencia en los meses de mayo, octubre y noviembre, y en general, puede observarse que sigue la doble onda de la distribución de la lluvia observada en la región Andina de Colombia, determinada por la Zona de Convergencia Intertropical. Trojer (1959), en sus estudios pioneros en la década de 1950, encontró que las lluvias máximas se presentaban en los meses de “transición” del período de menor lluvia al período de mayor lluvia, que para las condiciones de la zona cafetera corresponde a los meses de marzo y septiembre.

Lluvia máxima en 24 horas

Los valores de la lluvia máxima en 24 horas para diferentes períodos de retorno en estaciones climáticas con registros de pluviógrafo, se presentan en la Tabla 26.

Los mayores valores absolutos de la lluvia en 24 horas se han registrado en Francisco Romero-Salazar de las Palmas - Norte de Santander (269 mm), Santa Helena - Marquetalia - Caldas (234 mm) y La Montaña - Dolores - Tolima (200 mm), El Jazmín - Santa Rosa de Cabal - Risaralda (184 mm), Ospirma - Guática - Risaralda (183 mm), Blonay - Chinácota - Norte de Santander (166 mm).

En Colombia los valores absolutos más altos de lluvia máxima en 24 horas se registran en la región Norte del Pacífico colombiano (cuencas de los ríos Baudó, San Juan y Atrato) con un

valor próximo a 900 mm (Eslava, 1994), que equivale a una cantidad de cuatro veces por encima a los encontrados en la zona cafetera de Colombia. La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2009), reporta como valor máximo de lluvia en 24 horas un total de 1.825 mm en Foc Foc, Isla Reunión, en el océano Índico, registrados entre el 15 y 16 de marzo de 1952.

Sistemas convectivos de mesoescala (SCM)

Por sus características geográficas y topográficas en Colombia se presenta una alta proporción de precipitación originada por mecanismos de convección profunda. Los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) son una clasificación que se da a un conjunto de tormentas y lluvias que producen precipitación a escala horizontal, de aproximadamente 100 km; estas clasificaciones permiten realizar caracterizaciones para el entendimiento del origen, desarrollo y vida de sistemas organizados de tormentas. A pesar de que los eventos con SCM solamente representan el 10% del total de los eventos de lluvia, estos aportan casi el 70% del volumen total de la lluvia, lo que muestra su gran importancia en las tormentas que ocurren en los trópicos. Se observan diferencias en la ocurrencia de estos eventos a través de los años, mostrando que están fuertemente influenciados por procesos de mayor escala como el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (Poveda *et al.*, 2004).

Tabla 25.

Intensidades máximas de lluvia en la zona cafetera (mm min⁻¹). Período de retorno 10 años (Jaramillo y Kogson, 1994).

Estación	Tiempo, minutos		
	5	10	60
Pueblo Bello	20	50	93
Francisco Romero	16	60	64
Blonay	11	52	80
Bertha	11	44	57
Yacopí	18	49	62
Mesitas de Santa Inés	16	53	74
Tibacuy	12	39	45
Llanadas	12	44	64
Agronomía	15	42	55
Santa Ana	15	43	62
Santágueda	16	49	59
Cenicafé	14	41	59
Naranjal	16	47	68
Rafael Escobar	12	43	50
El Rosario	21	56	79
Miguel Valencia	11	33	40
Luis Bustamante	11	36	54

Estación	Tiempo, minutos		
	5	10	60
La Montaña	14	46	61
El Limón	20	59	82
El Jazmín	14	54	65
P. Tratamiento	17	49	70
El Cedral	16	49	66
Gigante	11	41	61
Bremen	18	49	66
El Sena-Armenia	12	50	65
La Bella	16	54	71
Paraguaicito	15	47	72
Santiago Gutiérrez	15	45	62
Arturo Gómez	12	42	58
Heraclio Uribe	14	49	69
Manuel Mallarino	13	44	65
Julio Fernández	13	46	63
La Florida	15	41	47
Manuel Mejía	18	48	69
Ospina Pérez	11	39	60

Tabla 26.

Intensidades máximas de lluvia (mm) en 24 horas para la zona cafetera de Colombia. Cenicafé-FNC.

Depto/Estación	Municipio	Año Inicial	Año Final	Media	Desviación estándar	Máx. absoluta	Lluvia máxima Período de retorno, años				
							10	25	50	75	100
Antioquia											
El Trapiche	Ciudad Bolívar	1996	2012	65	16	129	65	80	91	97	102
Cocorná	Cocorná	1997	2017	95	19	124	93	110	122	129	134
Miguel Valencia	Jardín	1953	2017	58	13	98	52	62	70	75	78
Virgen de Oro	Támesis	1998	2017	78	18	97	75	91	102	109	114
La Cristalina	Támesis	1996	2017	75	20	150	73	91	104	111	117
El Rosario	Venecia	1967	2017	80	20	128	74	91	103	110	115
Boyacá											
Bertha	Moniquirá	1953	2017	63	16	126	57	69	79	84	88
Caldas											
Naranjal	Chinchiná	1956	2017	83	19	124	76	91	102	109	113
Cenicafé	Manizales	1942	2017	85	20	152	75	90	102	109	114

Continúa...

...continuación

Depto/Estación	Municipio	Año Inicial	Año Final	Media	Desviación estándar	Máx. absoluta	Lluvia máxima Período de retorno, años				
							10	25	50	75	100
Agronomía	Manizales	1956	2017	74	20	134	66	82	94	101	106
Llanadas	Manzanares	1956	1998	86	21	164	81	98	111	118	124
Santa Helena	Marquetalia	1980	2017	138	35	234	125	154	175	188	197
Santa Ana	Palestina	1967	2006	80	19	134	75	91	103	110	115
Santágueda	Palestina	1964	2017	78	18	114	70	85	96	102	106
Rafael Escobar	Supía	1971	2017	70	18	130	65	79	90	96	101
Cauca											
Manuel Mejía	El Tambo	1953	2017	82	23	124	72	91	104	112	118
La Trinidad	Piendamó	1978	2017	79	21	135	72	89	102	109	115
Cesar											
Pueblo Bello	Pueblo Bello	1958	2017	91	27	139	83	104	120	129	136
Cundinamarca											
Mesitas Sta Inés	Cachipay	1966	2017	78	22	152	68	86	99	107	112
Las Granjas	El Colegio	1962	1989	58	17	85	54	69	80	86	91
Misiones	El Colegio	1978	2017	68	19	127	61	77	89	96	101
Santa Rosita	El Peñón	1994	2017	78	21	132	80	99	112	120	126
Santa Bárbara	Sasaima	1988	2010	92	26	152	89	112	128	138	145
Granja Tibacuy	Tibacuy	1952	2017	57	17	95	50	63	73	79	83
Montelíbano	Yacopí	1960	2017	84	20	140	76	92	104	111	116
Huila											
Jorge Villamil	Gigante	1955	2017	59	16	103	50	63	72	78	82
Simón Campos	La Plata	2005	2017	65	19	86	66	84	98	105	111
Magdalena											
La Victoria	Santa Marta	1951	2017	87	26	180	83	104	120	129	136
Nariño											
Ospina Pérez	Consacá	1953	2017	59	17	130	53	66	76	81	85
La Unión	La Unión	1961	1981	73	20	111	70	88	101	109	115
El Sauce	La Unión	1982	2017	76	22	132	71	89	103	111	116
Norte de Santander											
Blonay	Chinácota	1951	2017	92	27	166	75	97	113	122	129
G. M. Barriga	Convención	1991	2017	61	17	100	55	70	82	88	93
F. Romero	Salazar	1955	2017	136	40	269	121	153	177	191	201
Quindío											
El Sena	Armenia	1962	1996	93	25	142	85	107	123	132	138
Paraguaitico	Buenavista	1963	2017	83	22	137	77	95	109	117	122
La Bella	Calarcá	1951	2017	87	24	154	80	99	113	121	127
Bremen	Circasia	1970	2008	87	22	133	81	99	112	120	126
El Agrado	Montenegro	1980	2017	77	19	125	71	87	99	106	111

Continúa...



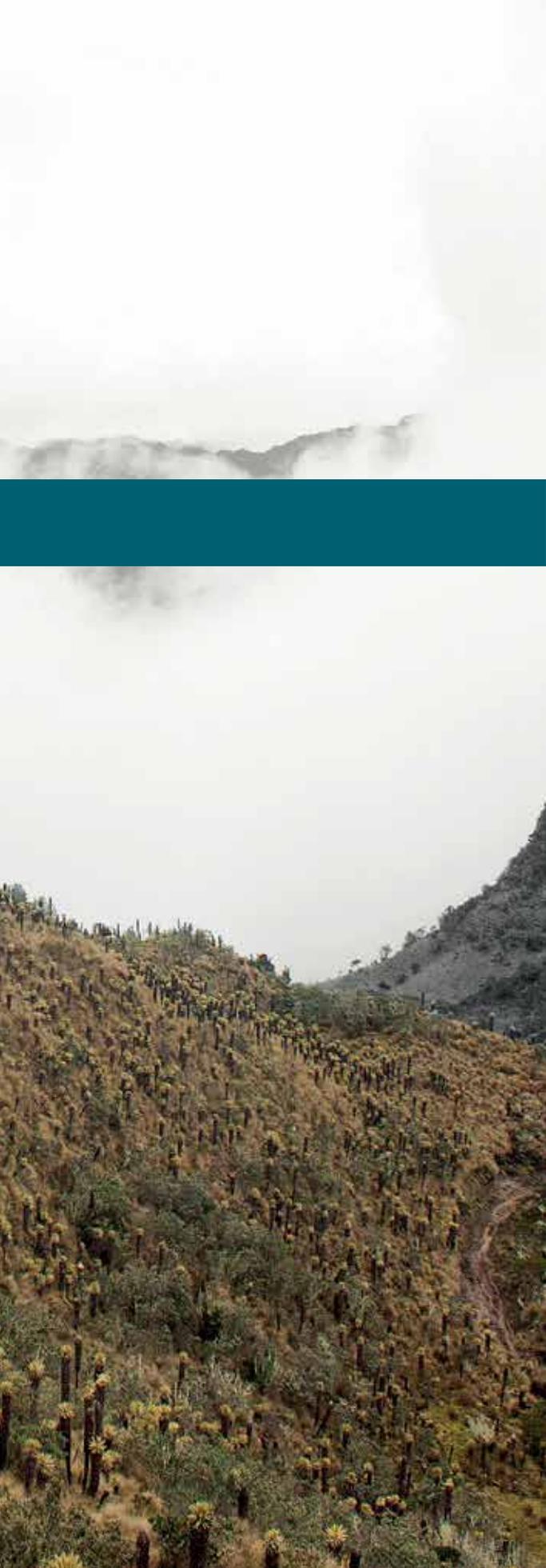
...continuación

Depto/Estación	Municipio	Año Inicial	Año Final	Media	Desviación estándar	Máx. absoluta	Lluvia máxima Período de retorno, años				
							10	25	50	75	100
Maracay	Quimbaya	1977	2017	89	22	161	80	98	112	120	125
Risaralda											
Ospirma	Guática	1981	2017	61	16	183	55	68	78	84	88
La Catalina	Pereira	1986	2017	77	18	129	71	87	98	105	109
P de Tratamiento	Pereira	1970	2017	85	20	160	77	94	106	113	118
El Jazmín	Sta Rosa de C.	1960	2017	85	21	184	77	93	106	113	118
Santander											
El Roble	Los Santos	2001	2017	52	15	88	50	64	74	80	85
Aguasblancas	San Vicente Ch.	1963	2017	94	26	300	83	105	121	130	136
Alberto Santos	Socorro	1994	2017	70	19	101	65	82	94	101	106
Tolima											
La Montaña	Dolores	1964	2000	100	30	200	88	113	132	143	150
Tricontinental	Fresno	1999	2016	101	26	136	104	129	146	157	164
La Trinidad	Líbano	1973	2017	94	24	164	82	102	116	125	131
Luis Bustamante	Villarrica	1964	2004	76	21	162	66	84	96	104	109
Valle del Cauca											
Arturo Gómez	Alcalá	1967	2017	73	18	121	67	82	93	100	104
Santiago Gutiérrez	Argelia	1972	2017	54	14	95	49	61	69	74	78
Venecia	Caicedonia	1984	2014	83	21	125	76	94	107	115	121
El Berrión	Cartago	1988	2017	77	20	135	70	87	99	106	112
Albán	El Cairo	1975	2017	54	14	96	48	60	68	73	76
La Selva	Ginebra	1980	2017	74	21	121	68	86	99	106	112
Julio Fernández	Restrepo	1954	2017	47	13	77	42	52	60	64	67
Heraclio Uribe	Sevilla	1953	1991	79	20	119	71	88	100	108	113
La Sirena	Sevilla	1990	2017	77	19	110	73	90	102	109	114
M. M. Mallarino	Trujillo	1969	2017	72	20	119	67	83	95	102	107
El Recreo	Ulloa	1987	2017	79	20	106	76	93	106	114	119



El balance hídrico





El ciclo hidrológico

El agua es esencial para la vida, forma parte de la estructura y el metabolismo de los seres vivos, es moderador del clima, es fuente de energía e interviene directa o indirectamente en numerosas actividades humanas.

La cantidad total de agua de la Tierra es constante y así ha permanecido por millones de años. El agua está distribuida en el océano, en la Tierra y en la atmósfera. El mayor depósito de agua es el océano con 97,41% del agua del planeta, un 2,59% permanece en los casquetes polares, glaciares y agua subterránea, y un 0,014% permanece en lagos, ríos, humedad del suelo y en la atmósfera.

Las cantidades de agua redistribuidas en el sistema pueden cuantificarse mediante un proceso de cálculo similar a una contabilidad, llamado balance hídrico, el cual permite conocer la disponibilidad de agua a nivel regional y la duración de los períodos secos y húmedos.

El ciclo hidrológico en una región está conformado por componentes que constituyen entradas y salidas de agua de un sistema, como son la lluvia, la evaporación y la transpiración (evapotranspiración), el agua interceptada por la parte aérea de la planta, la escorrentía y el agua almacenada en el suelo. La clase de cobertura de la superficie del suelo es determinante en la magnitud de cada uno de esos componentes (Figuras 57 y 58).

Balance hídrico en la zona cafetera de Colombia

Los estudios sobre balance hídrico de la zona cafetera y de los cafetales se iniciaron en la década de 1980 (Jaramillo, 1982). En general, en la región Andina de Colombia se presentan altos valores de precipitación anual; sin embargo, hay regiones con limitaciones

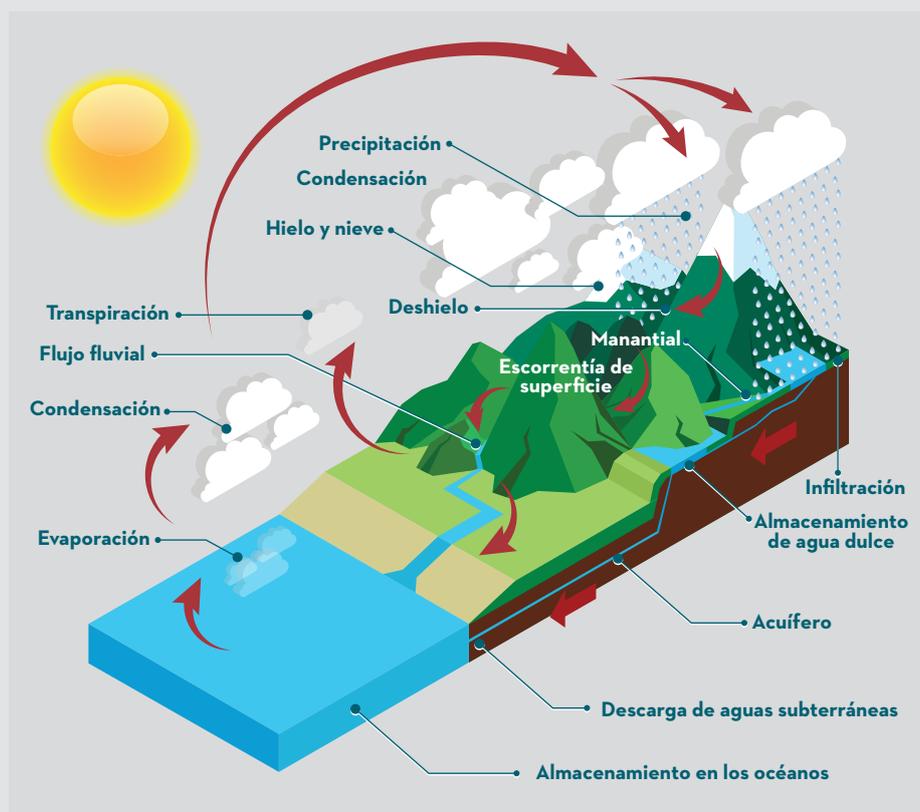


Figura 57. Componentes del balance hidrológico dentro de una cuenca.

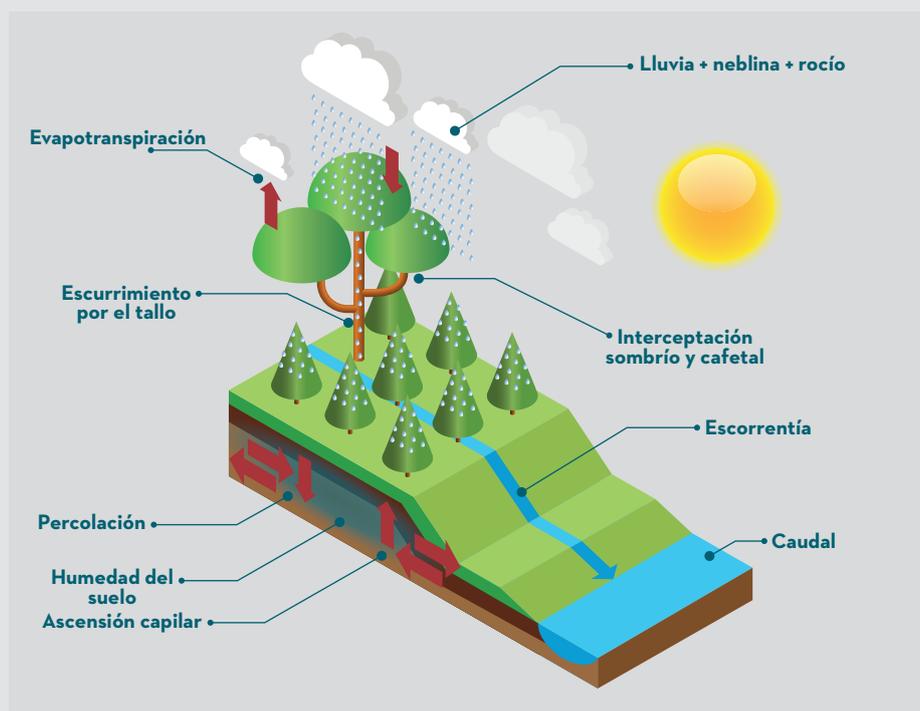


Figura 58. Componentes del balance hídrico en un agroecosistema.

de agua en algunas épocas, debido a una inadecuada distribución de las lluvias o con condiciones de alta evaporación, por lo cual la lluvia no es suficiente para suplir la demanda de agua.

La tendencia general de la zona cafetera es la de presentar dos períodos secos y dos húmedos en el año. Los meses de exceso hídrico (con cantidades de precipitación superiores a la evapotranspiración) son abril - mayo y octubre - noviembre. En las regiones Norte, Sur y Oriente del país la tendencia es a la ocurrencia en el año de una sola estación húmeda (Jaramillo, 1982, 1987; Trojer, 1954a y b).

El balance hídrico cuantifica las entradas y salidas de agua de un sistema. Un mes seco se define como aquel en el cual la lluvia es inferior a la evapotranspiración de referencia (ET_0), un mes húmedo cuando la lluvia está entre una y dos veces la ET_0 y un mes muy húmedo cuando la lluvia es dos veces superior a la ET_0 (Tabla 27).

Balance hídrico en las comunidades vegetales

Al analizar los componentes hidrológicos dentro de un ecosistema (Figura 59), la parte aérea de la vegetación tiene la propiedad de actuar como una barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su efecto y distribución bajo el área de su cobertura. Una parte de la precipitación total en un ecosistema es retenida por las copas y tallos de los árboles (interceptación), y reintegrada a la atmósfera por evaporación. Del agua que alcanza la superficie del suelo (lluvia neta), una fracción proviene del goteo de las hojas o pasa directamente a través de los espacios vacíos de la cobertura vegetal (precipitación directa), y una pequeña cantidad de agua lluvia llega al suelo al escurrirse por la superficie de los tallos. De la lluvia neta, una parte se evapora directamente y otra proporción corre superficialmente por el suelo (escorrentía); y dentro del perfil del suelo una es retenida

como humedad de suelo y otra se mueve hacia capas más profundas (percolación). El agua también es absorbida por las raíces para salir posteriormente de la planta como vapor de agua a la atmósfera, mediante el proceso de transpiración (Chow *et al.*, 1994; Hanchi y Rapp, 1997).

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se expresa como el volumen de agua contenida en un volumen de suelo hasta la profundidad de la zona de raíces, y varía con las propiedades físicas como la textura, la estructura, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica. Un ejemplo se presenta en la Figura 60.

Las medidas de balance hídrico realizadas en Cenicafé con lisímetros (Suárez de Castro y Rodríguez, 1962) muestran que la máxima evapotranspiración real se presenta cuando el suelo está cubierto con cobertura de plantas en crecimiento, con un 37% del volumen de la lluvia incidente; el menor valor se observa en suelos con cobertura muerta, con un valor del 11%. Estos datos indican que la mejor economía del agua en regiones secas o con períodos de deficiencia de agua acentuados se consigue con un suelo revestido con cobertura muerta, lo cual podría lograrse cortando las arvenses al inicio del período seco (Tabla 28).

En observaciones realizadas en la selva Amazónica por Franken *et al.* (1992), se encontró una interceptación media de 25%, una transpiración del 50% y una escorrentía del 25%. Para Raich (1983), la interceptación en el bosque Amazónico presenta una alta variabilidad explicable por variación en la intensidad de las lluvias y por la heterogeneidad de la vegetación. Para las condiciones de Bahía – Brasil, la interceptación de la lluvia en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) varía entre el 13% y 27% del total de la lluvia, estos porcentajes están en función del estado fenológico de la planta y de las características de la lluvia (Miranda, 1987).

En condiciones de bosque húmedo tropical la lluvia interceptada según estudios realizados

Tabla 27.

Meses secos (amarillo), húmedos (azul claro) y muy húmedos (azul oscuro) para la zona cafetera de Colombia (Jaramillo *et al.*, 2011).

Departamento/Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Cesar														
Pueblo Bello	Pueblo Bello	1.134	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
El Helechal	Pueblo Bello	1.447	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Magdalena														
La Victoria	Santa Marta	1.100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Norte de Santander														
Gabriel María Barriga	Convención	1.261	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Francisco Romero	Salazar	903	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Blonay	Chinácota	1.250	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Santander														
El Silencio	Rionegro	1.120	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Los Cocos	Rionegro	1.300	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Palestina	Rionegro	1.350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cocal	Rionegro	700	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ceylan	Bucaramanga	1.304	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Miporal	Floridablanca	1.237	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
San Antonio	Floridablanca	1.539	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bonanza	Girón	1.250	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
El Roble	Los Santos	1.646	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cuchicute	Curití	1.600	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Santa Rita	San Gil	1.600	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Chapa (El Nogal)	Charalá	1.560	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Villanueva	Charalá	1.450	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Chochos	Hato	1.400	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Alberto Santos	Socorro	1.499	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
La Chapola	Socorro	1.731	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
La Plazuela	Socorro	1.672	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Las Delicias	Palmas del Socorro	1.450	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
El Mesón	Valle de San José	1.330	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
La Laguna	Páramo	1.550	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Las Flores	Pinchote	1.700	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
La Cumbre	Puente Nacional	1.691	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Aguasblancas	San Vicente	964	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Casa de Teja	San Vicente	960	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Boyacá														
Bertha	Moniquirá	1.677	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cundinamarca														
El Jardín (Clavel)	Yacopí	1.245	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Montelíbano	Yacopí	1.365	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Continúa...

...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Santa Rosita	El Peñón	1.437												
Canaima	La Palma	1.594												
La Vistosa	Topaipí	1.374												
Cerinza	Vergara	1.450												
La Florida	Vergara	1.400												
Icalí	Sasaima	1.328												
Santa Bárbara	Sasaima	1.478												
San Luis	Arbeláez	1.700												
Mesitas de Santa Inés	Cachipay	1.340												
Honduras	La Mesa	1.077												
Misiones	El Colegio	1.540												
Pinar del Río	Silvana	1.752												
Granja Tibacuy	Tibacuy	1.538												
Tolima														
Tricontinental	Fresno	1.269												
La Danta	Casabianca	1.610												
Buenos Aires	Palocabildo	1.410												
El Edén	Líbano	1.373												
La Trinidad	Líbano	1.456												
Planes	Lérida	1.223												
Totalito	Alvarado	1.250												
Janiyof	Anzoátegui	1.720												
Chapetón	Ibagué	1.353												
El Recreo	Ortega	1.504												
El Horizonte	Cunday	1.270												
Luis Bustamante	Villarrica	1.610												
La Montaña	Dolores	1.219												
Huila														
Guayabal	Algeciras	1.460												
Jorge Villamil	Gigante	1.420												
La Primavera	Gigante	1.386												
Montenegro	Gigante	2.099												
Villa Consuelo	Garzón	1.570												
Concentración Desarrollo	Timaná	1.141												
Corrales	Teruel	1.450												
Antioquia														
Carimagua	Amagá	1.802												
El Trapiche	Bolívar	1.277												
Bariloche	Fredonia	1.748												
El Olvido	Fredonia	971												
La Blanquita	Fredonia	570												

Continúa...



...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Santa Cruz	Fredonia	1.400												
Santa Isabel	Fredonia	1.963												
Miguel Valencia	Jardín	1.621												
El Porvenir	Jericó	1.906												
La Cristalina	Támesis	775												
Virgen de Oro	Támesis	1.656												
El Rosario	Venecia	1.635												
Cocorná	Cocorná	1.344												
Caldas														
Cuatro Esquinas	Aguadas	1.900												
Guaymaral	Aguadas	1.600												
San José	Aguadas	1.663												
La Cascada	Pácora	1.600												
La Linda	Pácora	1.750												
La Gaviota	Salamina	1.772												
El Socorro	La Merced	1.852												
El Mirador	Filadelfia	1.650												
La Julia	Filadelfia	1.650												
Piamonte	Neira	1.625												
Agronomía	Manizales	2.088												
El Pistacho	Manizales	1.582												
Java	Manizales	1.778												
La Juliana	Manizales	1.785												
La Selva	Manizales	1.312												
Las Colinas	Manizales	1.450												
Santa Teresa	Manizales	1.698												
Santa Teresita	Manizales	1.172												
Bello Horizonte	Villamaría	1.690												
Cenicafé	Manizales	1.310												
La Divisa	Chinchiná	1.590												
La Francia	Chinchiná	1.267												
La Romelia	Chinchiná	1.335												
La Sierra	Chinchiná	1.440												
Moravo	Chinchiná	1.146												
Naranjal	Chinchiná	1.381												
El Recreo	Palestina	1.430												
Granja Luker	Palestina	1.031												
La Argentina	Palestina	1.354												
La Margarita	Palestina	1.436												
La Palma	Palestina	1.165												
Santágueda	Palestina	1.026												

Continúa...



...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
El Descanso	Marmato	1.803												
Rafael Escobar	Supía	1.307												
La Argentina	Riosucio	1.420												
La Manuelita	Riosucio	1.460												
El Tabuyo	Anserma	1.669												
Santa Fé	Anserma	1.410												
San Lucas	Risaralda	1.105												
La Divisa	San José	1.686												
La Esmeralda	Viterbo	1.365												
El Tiburio	Samaná	1.403												
Granja Kennedy	Pensilvania	1.800												
Hogar Juvenil	Pensilvania	1.560												
Villaraz	Pensilvania	1.650												
La Esperanza	Marquetalia	1.463												
Santa Helena	Marquetalia	1.395												
Llanadas	Manzanares	1.390												
Cuba	Victoria	1.054												
La Pastorita	Victoria	1.122												
Risaralda														
La Palmera	Marsella	1.450												
El Jazmín	Santa Rosa de Cabal	1.635												
El Bosque	Dosquebradas	1.458												
Combia	Pereira	1.173												
El Pílamó	Pereira	1.113												
La Catalina	Pereira	1.321												
La Playa	Pereira	1.290												
La Renta	Pereira	1.194												
Los Cábmulos	Pereira	1.189												
Planta de Tratamiento	Pereira	1.487												
El Diamante	Quinchía	1.550												
La Oriental	Quinchía	1.730												
Buenos Aires	Guática	1.814												
Ospirma	Guática	1.661												
El Barranco	Mistrató	1.580												
Los Cábmulos	Belén de Umbría	1.400												
Los Naranjos	Santuario	1.580												
Quindío														
La Esperanza	Filandia	1.671												
La Ilusión	Circasia	1.442												
Almacafé Vivero	Quimbaya	1.330												

Continúa...



...continuación

Departamento/Estación	Municipio	Altitud (m)	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Maracay	Quimbaya	1.402												
El Agrado	Montenegro	1.275												
La Julia	Montenegro	1.250												
Sorrento	Montenegro	1.203												
La Pradera	Armenia	1.350												
Tucumán	Armenia	1.250												
El Jardín	Calarcá	1.365												
La Bella	Calarcá	1.449												
Quebradanegra	Calarcá	1.500												
La Argentina	La Tebaida	1.200												
La Miranda	La Tebaida	1.193												
Mónaco	Córdoba	1.350												
La Esperanza	Buenavista	1.428												
Paraguacito	Buenavista	1.203												
El Porvenir	Pijao	1.470												
La Alejandría	Génova	1.600												
La Esperanza	Génova	1.650												
Valle														
Arturo Gómez	Alcalá	1.259												
El Recreo	Ulloa	1.421												
El Berrión	Cartago	1.166												
Venecia	Caicedonia	1.168												
La Sirena	Sevilla	1.519												
La Selva	Ginebra	1.805												
Santa Marta	El Águila	1.764												
Bellavista	Ansermanuevo	1.528												
El Placer	Ansermanuevo	1.744												
Santiago Gutiérrez	Argelia	1.530												
Albán	El Cairo	1.510												
Manuel M. Mallarino	Trujillo	1.331												
Julio Fernández	Restrepo	1.381												
Cauca														
Mondomo (El Fontanar)	Santander de Quilichao	1.380												
Madrigal	Caldono	1.434												
La Trinidad	Piendamó	1.671												
La Suecia	El Tambo	1.693												
Manuel Mejía	El Tambo	1.735												
Portichuelo	Rosas	1.695												
Nariño														
Ospina Pérez	Consacá	1.603												
El Sauce	La Unión	1.609												

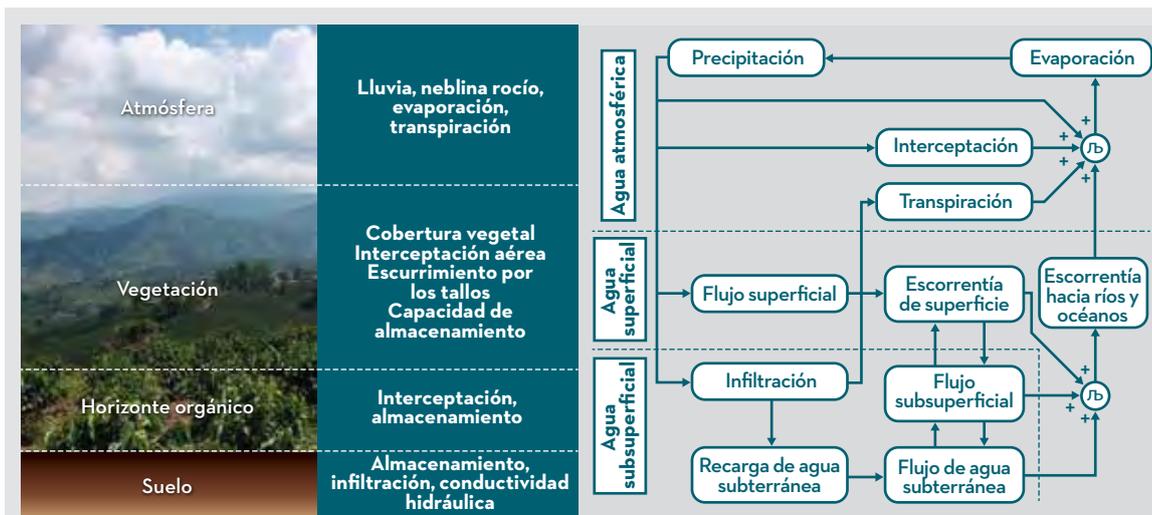


Figura 59. Componentes de un balance hidrológico en un ecosistema. (Chow *et al.* 1994).

en Nigeria y Tailandia varía entre 3% y 63%, esta variación refleja diversas condiciones climáticas, distintas intensidades de la lluvia y el gran cambio de la estructura del bosque. En la mayoría de estos estudios no se ha tenido en cuenta la alta variabilidad espacial que se presenta dentro del bosque (Clarke, 1987; Kittredge, 1948; Klassen *et al.*, 1996).

Otros autores han encontrado que las proporciones de lluvia efectiva están entre el 97% para un bosque decíduo en Nigeria (Hopkins, 1965) y el 30% para un bosque de Nueva Guinea en la estación seca (Edwards, 1982). La cantidad de lluvia que escurre por los tallos es inferior al 2% del total de la lluvia.

Veneklaas (1990), en observaciones realizadas en Colombia, para dos altitudes en un bosque montano encontró interceptaciones de la lluvia



Figura 60. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

entre el 12% y el 18%, atribuidas a la presencia de epífitas que modifican las condiciones de almacenamiento en la parte aérea de la planta y a las características de la lluvia.

Tabla 28.

Componentes del balance hidrológico (porcentaje de la lluvia) de medidas realizadas en predios de escorrentía. Cenicafé (Suárez de Castro y Rodríguez, 1962).

Cobertura del suelo	Evaporación	Escorrentía	Percolación
Añil rastrero	37%	2%	61%
Sin cobertura	20%	10%	70%
Cobertura muerta (hojas de guamo)	11%	3%	86%

La cobertura vegetal, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y otros factores influyen en la dinámica del agua en el suelo. En registros de humedad volumétrica del suelo en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrío de guamo (*Inga sp.*), como se observa en la Figura 61, se ve una clara diferencia debido a la cobertura. El sombrío tuvo un efecto notorio en la conservación del agua, especialmente en los períodos de una gran deficiencia de lluvia como cuando se presenta un evento de El Niño (en el ejemplo El Niño 1997-1998). Por el contrario, se han observado deficiencias severas de humedad del suelo en el cafetal a libre exposición solar (Poveda y Jaramillo 2000; Poveda *et al.*, 2000, 2001, 2002).

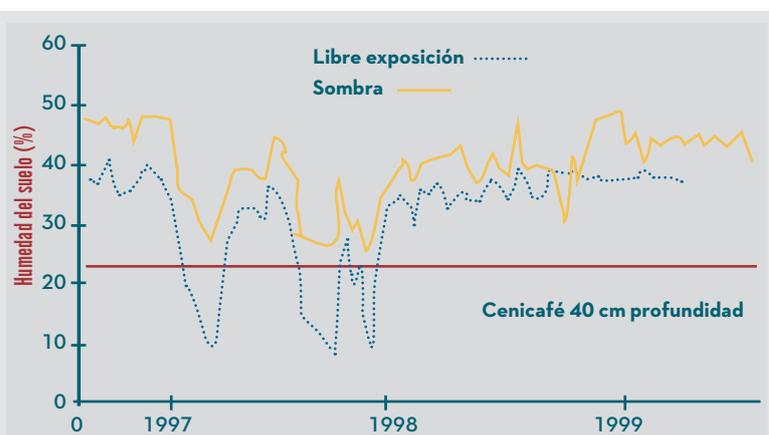


Figura 61. Variación de humedad volumétrica del suelo para dos coberturas.

El almacenamiento de agua en la parte aérea del cultivo

Los primeros estudios sobre las características de la precipitación dentro de los cafetales en Cenicafé los realizó Trojer (1955).

La vegetación ejerce un efecto significativo sobre la cantidad de agua que llega al suelo, debido a la retención que hace el follaje de la lluvia que incide en él. El almacenamiento en el follaje se refiere a la cantidad de agua que queda en la parte aérea del agroecosistema después

de parar el goteo a la superficie del suelo. Este tipo de almacenamiento está relacionado con las características morfológicas del cultivo y el índice de área foliar.

De acuerdo con el modelo de Rutter, 1975, la capacidad de almacenamiento de agua por el dosel es igual al intercepto (a) de un modelo de regresión lineal (Ecuación <71>):

$$I = a + bp \text{ <71>}$$

Donde:

I: interceptación (mm)

P: precipitación (mm)

a: capacidad de almacenamiento (mm)

b: coeficiente de regresión

El almacenamiento de agua en la parte aérea de los agroecosistemas en cafetales fue de 0,3 mm para un cafetal a libre exposición y 1,8 mm para un cafetal con guamo (*Inga sp*) a una distancia de 9 x 9 m; estos valores dependen especialmente del porcentaje de cobertura vegetal y los valores observados están dentro de los medidos en otras condiciones y regiones del mundo, los cuales para los bosques tropicales están próximos a 1,7 mm.

La lluvia neta (lluvia efectiva)

La lluvia neta se refiere a aquella proporción de la lluvia que alcanza la superficie del suelo. El total de lluvia neta proviene de la lluvia que alcanza el suelo en forma directa, del agua que ha pasado a través de la vegetación y del flujo proveniente del tallo.

La mayoría de las proporciones de lluvia neta registradas presentan valores superiores al 80%, como es el caso de mediciones en la selva amazónica de Colombia y Brasil (Lloyd y Marques, 1988). Dentro de los agroecosistemas de café analizados, las cantidades de lluvia neta que ingresan al suelo presentan proporciones más bajas, con un valor medio de 48% y valores extremos de 40% para cafetal con nogal (*Cordia alliodora*)

y 59% para cafetal con guamo (*Inga sp*) a 6 x 6 m. La situación anterior es explicable por la presencia de dos estratos de interceptación de la lluvia, el primero está constituido por la parte aérea de los árboles de sombrío y el segundo por un cafetal de alta densidad con una cobertura continua.

Para regiones con condiciones de alta precipitación durante el año, los sistemas agroforestales no tendrían limitación en cuanto a la disponibilidad de agua para los cafetos; sin embargo, las densidades de siembra del sombrío y del cafeto deben tenerse en cuenta en aquellas regiones con períodos prolongados de deficiencia de agua (3 - 4 meses) o con bajas cantidades de lluvia anual, debido a que el cultivo del café dispondría de una baja proporción de lluvia neta. Cuando se comparan cafetales con sistemas simples o donde domina un solo estrato vegetal, los valores de la lluvia neta que ingresa al suelo son mucho mayores y están próximos al 80%.

La escorrentía

La escorrentía es la cantidad de lluvia neta que se mueve sobre la superficie del suelo. Para diferentes agroecosistemas la escorrentía presenta un valor promedio de 9,4% con un valor máximo de 15,6% en el cafetal a libre exposición solar y un valor mínimo de 4,0% en el cafetal con sombrío de guamo a 12 x 12 m, y en la reserva de bosque de Cenicafé un 5,6%. En los resultados anteriores se ve la influencia de la interceptación del follaje, la cual disminuye la lluvia neta que ingresa al suelo, además los porcentajes de agua que ingresan al perfil del suelo son altos en los suelos donde se realizaron las mediciones.

La percolación

La percolación se refiere a la proporción de la lluvia neta que ingresa al perfil del suelo. Para los suelos de origen volcánico este valor representa una alta proporción y debe tenerse en cuenta en su papel para el transporte de nutrimentos hacia estratos más profundos.

Con relación al escurrimiento de agua por los tallos, en medidas realizadas en árboles de guamo (*Inga sp.*) se encontró una proporción muy baja del total de la lluvia externa, con un valor máximo de 1,3%. Relaciones de esta magnitud en el flujo por el tallo concuerdan con los hallados en diversos estudios dentro de bosques (Raich 1983; Lloyd y Marques, 1988; Tobón *et al.*, 2000).

Las relaciones entre lluvia efectiva, la escorrentía y la percolación con la lluvia externa para un bosque, un cafetal con sombrío de guamo y un cafetal al sol se observan en las Figuras 62, 63 y 64.

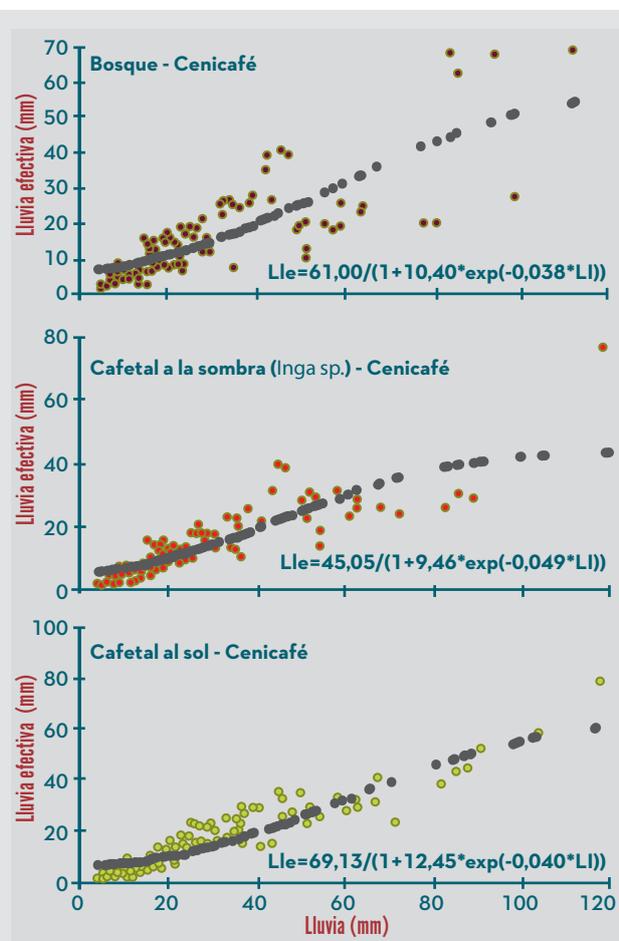


Figura 62. Relación entre la lluvia que ingresa al suelo (lluvia efectiva) y la lluvia externa, para diferentes coberturas vegetales (Jaramillo-Chaves 1998, 1999).

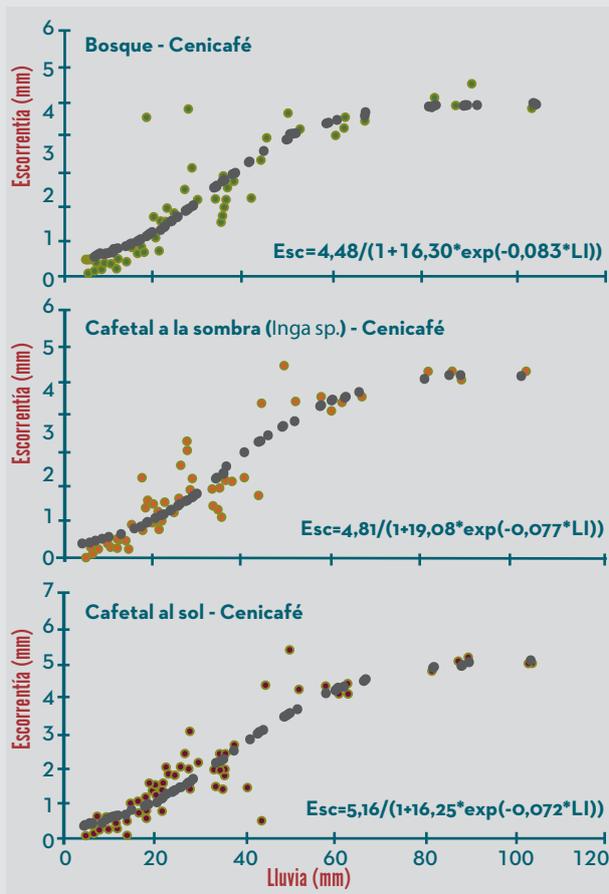


Figura 63.

Relación entre la escurrentía medida en predios en diferentes coberturas vegetales y la lluvia externa (Jaramillo-Chaves 1998, 1999).

En la Tabla 29 se presentan las proporciones de los componentes de la redistribución de la lluvia dependiendo de la cobertura vegetal del suelo para los ecosistemas de bosque secundario, cafetal bajo sombrío de guamo, cafetal a libre exposición solar y un pastizal.

El transporte de los nutrientes en los componentes del balance hídrico

Los movimientos de los elementos químicos en los ecosistemas pueden clasificarse en tres tipos: ciclos *geoquímicos*, cuando los intercambios se realizan entre los ecosistemas; ciclos *biogeoquímicos* cuando se realizan

dentro de los ecosistemas y ciclos *bioquímicos* cuando la redistribución de los elementos ocurre dentro de organismos individuales.

La salida de nutrientes desde las plantas se presenta de varias maneras: 1. Por el lavado que ocasionan las lluvias desde los diferentes órganos vegetales; 2. Por la defoliación causada por los herbívoros, lo cual incluye la remoción física de la biomasa y la aceleración del lavado por los daños en el follaje; 3. Las salidas asociadas a la reproducción; 4. La caída de hojas, ramas y cortezas de los tallos. Los ciclos de nutrientes en los bosques y, en general, en las áreas con vegetación incluyen un complejo conjunto de mecanismos de retroalimentación directos entre el suelo y las plantas. La superficie vegetal constituye un sistema abierto donde entran y salen elementos químicos de manera continua (Bruijnzeel, 1990; Likens y Bormann, 1995; Mabberley, 1992; Steinhart y Fassbender, 1979).

Los nutrientes son transferidos inicialmente de las hojas y otras partes de la planta y caen al suelo como hojarasca, donde son posteriormente lixiviados por la percolación del agua y descompuestos por los organismos. Una cantidad significativa de nutrientes también es movilizadada desde las diferentes partes de la planta al suelo, con el paso de la precipitación a través del dosel del bosque. Mediante la hojarasca se transfieren elementos adicionales directamente a la reserva de nutrientes aprovechables, sin la intervención de algún proceso de descomposición en el piso del bosque (Eaton *et al.*, 1973; Golley, 1991; Likens y Bormann, 1995).

Los nutrientes pueden lixivarse desde la hoja por el agua interceptada y ser depositados como sales en la superficie de estas por la evaporación. Aunque casi siempre hay un incremento neto en la concentración de nutrientes en el lavado foliar con relación a la precipitación original, aparentemente estos nutrientes pueden ser absorbidos por las hojas o ser tomados por la microflora presente en la superficie vegetal (Eaton *et al.*, 1973).

La concentración de elementos químicos lixiviados es mayor para lluvias de baja cantidad. Esto aparentemente está en función del tiempo de permanencia del agua en la superficie de la hoja. Para un mismo período se observa una correlación negativa entre la cantidad de precipitación y la concentración de cada elemento en el agua del lavado foliar de dicho período. Los nutrientes en los tejidos jóvenes son rápidamente metabolizados dentro de las células dificultando la lixiviación; en los tejidos viejos los nutrientes están en formas intercambiables y son lixiviados más fácilmente. Las hojas muy jóvenes las cuales aparentemente son delicadas y frágiles son menos susceptibles a la lixiviación que las hojas viejas. Hay mayor lixiviación de calcio para hojas amarillas senescentes que para las hojas verdes, resultado del incremento de la permeabilidad de la hoja (Eaton *et al.*, 1973).

Los resultados muestran que las cantidades de potasio aumentan hasta diez veces en el agua de lavado foliar en los agroecosistemas estudiados, cuando se comparan con las cantidades aportadas inicialmente por el agua lluvia (Golley, 1991). Para otros elementos como el calcio el aumento en el agua de lavado foliar con relación a la lluvia externa fue 1,5 veces mayor y para el magnesio 1,4 veces mayor. Las variaciones en las cantidades de los elementos químicos confirman lo encontrado por Beer *et al.* (1998), quienes manifiestan que el ciclo de los nutrientes está directamente afectado por las especies de sombrero debido a que estas difieren significativamente en la composición de la biomasa.

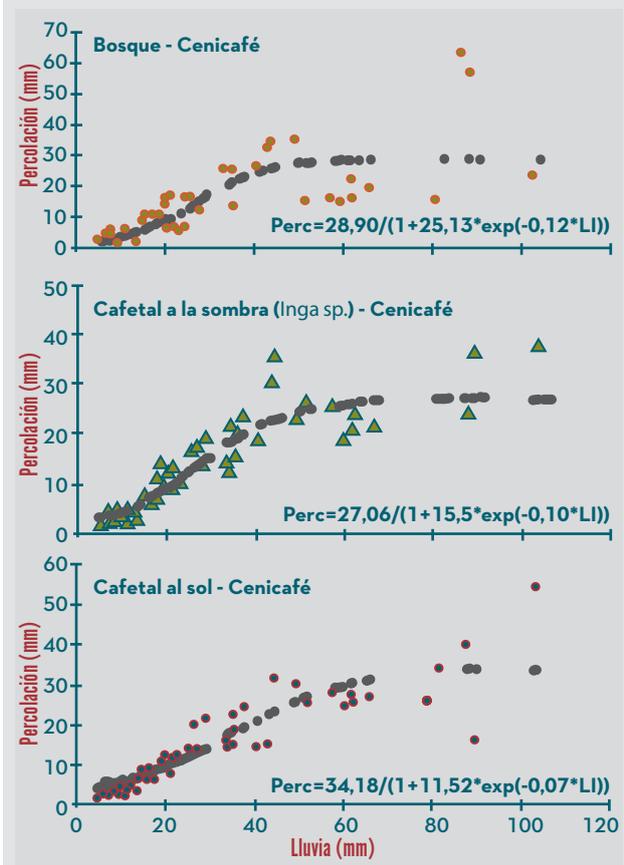


Figura 64. Relación entre la percolación y la lluvia externa para diferentes coberturas vegetales (Jaramillo-Chaves 1998, 1999).

Shaxson y Barber (2003), presentan consideraciones sobre las acciones a seguir para cuidar el suelo que implican cambios en su manejo, como son:

- ♦ Un enfoque prioritario para conservar la porosidad del suelo antes que las partículas sólidas.

Tabla 29.

Variación de las proporciones de la lluvia (100%) en los diferentes componentes del balance hídrico para diferentes ecosistemas (Velásquez y Jaramillo, 2009).

Cobertura (%)	Intercepción	Lluvia neta	Escorrentía	Percolación
Bosque secundario (79%)	8	92	3	89
Cafetal sombrío guamo (81%)	14	56	6	50
Cafetal libre exposición (68%)	8	92	3	89
Potrero (-)	3	97	6	91

- ♦ Hacer énfasis en el aumento de la capacidad de infiltración del suelo más que en la reducción de la escorrentía.
- ♦ Para minimizar la erosión, es mejor mantener una cobertura de residuos vegetales sobre el suelo que construir terrazas a través de la pendiente en la ladera.
- ♦ Cuando se observa un río crecido con mucho material en suspensión es más sensato preguntar ¿Por qué lleva tanta agua? antes que subrayar la cantidad de sedimentos que transporta.
- ♦ Pensar en los principios de qué es lo que se desea obtener primero antes de elegir una práctica específica.
- ♦ Reducir los riesgos de fracasos debidos a las sequías, en lugar de lamentarse de severidad de la sequía.
- ♦ Construir el suelo desde la superficie hacia abajo, especialmente favoreciendo la actividad biótica.

Para disminuir los efectos de la baja humedad disponible en el suelo en los cultivos Shaxson y Barber (2003), plantean las estrategias que se presentan en la Tabla 30.

Los contactos físicos entre la cobertura de residuos y la superficie del suelo obstruyen el movimiento de la escorrentía, reducen su velocidad, ofrecen más tiempo para la infiltración y de esa manera reducen el volumen de la escorrentía. Pueden distinguirse dos aspectos de la cobertura del suelo:

- ♦ **La cobertura de toda la superficie:** absorbe la energía del impacto de las gotas de lluvia y de esta manera previene la pérdida de espacios de poros en los cuales se puede infiltrar el agua.
- ♦ **La cobertura de contacto:** disminuye la escorrentía permitiendo más tiempo para la infiltración.

Las soluciones más efectivas para evitar las pérdidas causadas por la alta evaporación de agua del suelo son: las coberturas con

Tabla 30.

Posibles soluciones para los problemas de agua en el suelo (Shaxson y Barber, 2003).

Causa	Solución general	Solución específica
Baja infiltración		
a. Baja porosidad de la superficie del suelo	Proteger la superficie del suelo e incrementar la porosidad de la superficie	Agricultura de conservación: Cobertura del suelo (cobertura muerta, residuos vegetales), mínima intervención del suelo (labranza mínima o ninguna), rotación de cultivos incluyendo coberturas naturales, barbecho, bosques cerrados y de protección, plantar temporalmente pastos.
	Incrementar el período de infiltración	Estructuras físicas para detener la escorrentía: siembras en contorno, caballetes en contorno en espaciamentos estrechos, terrazas, huertos, plataformas, muros de piedra, líneas de residuos, barreras vivas
b. Baja permeabilidad del subsuelo	Mejorar el drenaje profundo	Labranza profunda / subsolar el suelo impermeable
	Construir barreras con estructuras físicas que retengan la escorrentía	Terrazas Fajas de tierra

Continúa...

...continuación

Causa	Solución general	Solución específica
Alta evapotranspiración		
a. Evaporación de agua del suelo	Reducir la evaporación desde el suelo	Cubrir el suelo y no hacer labranza Agricultura de conservación
	Incrementar la sombra en la superficie del suelo	Agricultura de conservación Mulch, coberturas de cultivos, cultivos intercalados, altas densidades de siembra.
b. Transpiración de arvenses	Control de arvenses	Cubrir con residuos Control de arvenses (mecánico/biológico/ herbicidas)
c. Excesiva transpiración del cultivo	Reducir el impacto del viento	Barreras rompevientos Cubrir el suelo, sin labranza Agricultura de conservación
Drenaje profundo del agua lluvia		
	Mejorar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo	Agricultura de conservación Agregar abonos orgánicos
	Acelerar el desarrollo de la raíz	Siembras tempranas, también es posible con agricultura de conservación
	Cambiar de uso del campo	Introducir cultivos de raíces profundas
Restricción del crecimiento de raíces		
a) Capas densas en el suelo	Incrementar la porosidad del subsuelo	Métodos biológicos: agricultura de conservación, incluyendo cultivos específicos para descompactación natural, barbecho Métodos mecánicos: Huecos profundos Subsolar
b) Deficientes condiciones químicas	Mejorar las condiciones físicas del subsuelo	Cal/yeso para neutralizar la toxicidad del aluminio y manganeso Fertilizantes para corregir las deficiencias de nutrientes Lavado para remover la salinidad.
Lluvia escasa o errática		
	Adaptar el uso del suelo a las condiciones climáticas	Ajustar el uso del campo a las características del suelo. Cultivos y variedades resistentes a la sequía.
	Incrementar en los cultivos la eficiencia en el uso del agua	Ajustar la densidad de plantas Seleccionar cultivos con eficiente uso del agua Control de arvenses Aplicación de fertilizantes Siembras tempranas Semilla seleccionada
	Conservación del agua del suelo	Agricultura de conservación Cubrir el suelo (cobertura muerta, residuos), sin labranza Barbechos que conserven el agua
	Captar agua	Líneas de piedras en contorno Caballetes de tierra en contorno Huecos, medialunas, diques de retención Estanques
	Distribuir agua	Desvío de torrentes Interceptación de flujos de agua
	Riego suplementario	Riego por aspersión Riego subsuperficial Riego por goteo

residuos de las plantas sobre la superficie del suelo, las prácticas agronómicas que aumentan la sombra sobre la superficie del suelo y las estructuras físicas que concentran el agua de lluvia favoreciendo la percolación a las capas más profundas. Las pérdidas por transpiración pueden ser el resultado de una excesiva transpiración de las arvenses o del cultivo cuando hay vientos cálidos y puede ser controlado por prácticas adecuadas de control de arvenses o por la construcción de barreras rompevientos, respectivamente.

Los residuos vegetales sobre la superficie del suelo reducen las pérdidas de agua por evaporación actuando como una capa aisladora; esto disminuye la temperatura de la superficie del suelo y elimina el efecto del viento. El calor del sol es transmitido lentamente a la superficie del suelo, desde la superficie de los residuos y a través del aire atrapado entre los mismos. Consecuentemente, la superficie del suelo permanece más fresca y la tasa de evaporación del agua del suelo reduce su intensidad. Cuanto más espesa es la capa del aire atrapado entre los residuos, mayor será el efecto aislante; la cantidad de residuos requeridos para reducir las pérdidas por evaporación es considerablemente mayor que la cantidad necesaria de residuos para asegurar que la mayor parte del agua de lluvia se infiltre en el suelo.

El uso de las coberturas de residuos para conservar la humedad en la capa superior del suelo e incrementar los rendimientos es especialmente importante en las regiones con una cantidad limitada de lluvia y con altas tasas de evaporación. También es importante para cultivos con raíces poco profundas como banano, té, café, piña y hortalizas como cebolla, lechuga, repollo y zanahoria. La cobertura de residuos también puede aportar beneficios al reducir las pérdidas de agua por evaporación de los suelos que tienen una capa freática poco profunda (menos de 1 ó 2 m), donde el agua puede subir por capilaridad desde las capas subterráneas. Tales tipos de suelos a menudo son usados en la producción de hortalizas.

La pérdida de agua del suelo a través de la transpiración de las arvenses puede reducir sensiblemente la cantidad de agua disponible para los cultivos. Por lo tanto, es esencial hacer un control oportuno y efectivo de las arvenses; la presencia de una espesa capa de residuos sobre la superficie es una forma efectiva de controlarlas. Cuando es necesario tomar medidas de control de arvenses, desde un punto de vista de la agricultura conservacionista, es preferible usar herbicidas o hacer rotaciones de cultivos adecuadas antes de proceder al control mecánico, salvo si este es efectuado sin disturbio del suelo. Los herbicidas de postemergencia dejan los residuos de las arvenses en la superficie del suelo como una cobertura de protección, mientras que la labranza deja el suelo expuesto al impacto de las gotas de lluvia y al sol, acelera el secado superficial del suelo y tiende a desorganizar y destruir la porosidad del suelo por frotación y compactación.

Con relación a la producción agrícola en regiones húmedas, Loomis y Connor (1992), plantean que el suministro del agua raras veces es el adecuado, debido a que los excesos frecuentes originan sobresaturación en los suelos y encharcamientos, los cuales requieren de trabajos de drenaje. La erosión hídrica y la pérdida de nutrimentos son mayores cuando ocurren lluvias abundantes especialmente en zonas de pendiente. En las zonas húmedas la alta frecuencia de lluvia origina problemas para realizar las labores de cultivo, se presentan mayores ataques de plagas y enfermedades, y una mayor ocurrencia y dinámica de las arvenses. La nubosidad de las regiones húmedas y la alta humedad atmosférica disminuyen la radiación solar y, por lo tanto, la productividad potencial de estas zonas es menor.

En general, los cambios en los usos del suelo influyen en los caudales, las recargas subterráneas y en la carga de sedimentos que son observables en las cuencas hidrográficas inferiores a 100 km²; mientras que los problemas de salinidad, contaminación por pesticidas y por metales pesados tienen su impacto ambiental a una mayor escala, en cuencas hasta de 100.000 km² (Tabla 31).

Tabla 31.

Influencia del cambio en el uso del suelo sobre parámetros del agua según el tamaño de la cuenca (Hamilton *et al.*, 2008).

Parámetro	Tamaño de la cuenca (km ²)						
	0,1	1	10	100	1.000	10.000	100.000
Caudal medio	x	x	x	x	o	o	o
Caudal máximo	x	x	x	x	o	o	o
Caudal base	x	x	x	x	o	o	o
Recarga subterránea	x	x	x	x	o	o	o
Carga de sedimentos	x	x	x	x	o	o	o
Nutrientes	x	x	x	x	x	o	o
Materia orgánica	x	x	x	x	o	o	o
Patógenos	x	x	x	o	o	o	o
Salinidad	x	x	x	x	x	x	x
Pesticidas	x	x	x	x	x	x	x
Metales pesados	x	x	x	x	x	x	x
Régimen termal	x	x	o	o	o	o	o

x: Influencia observada o: Influencia no observada

La disponibilidad del recurso hídrico está determinada por las variaciones en las diferentes fases del ciclo hidrológico, principalmente las relacionadas con la precipitación, la evaporación, la evapotranspiración y por las fluctuaciones de los caudales de las corrientes y de los volúmenes en los almacenamientos superficiales y subterráneos. Los cambios en el régimen de lluvias y el de evaporación, relacionados con los fenómenos de El Niño hasta ahora registrados, han traído como consecuencia alteraciones en los procesos naturales que conforman el ciclo hidrológico y han afectado la dinámica y la distribución, en el espacio y en el tiempo, de la oferta hídrica en las diferentes regiones del país, tanto en términos de cantidad como de calidad.

En Colombia la disminución de esta oferta hídrica en términos de precipitación afecta la disponibilidad del recurso en diferentes sectores. El déficit en los rendimientos hídricos alcanza en muchas regiones del territorio nacional porcentajes mayores del 30%, donde normalmente el agua es escasa. Esto afecta principalmente los abastecimientos de agua potable, la generación hidroeléctrica, los sistemas de riego para la agricultura y la navegación, entre otros.

Precipitación horizontal - Bosque de niebla

La lluvia horizontal ocurre de forma natural en los bosques localizados en zonas de gran altitud; esta se produce por el choque constante de nubes bajas o bruma con la vegetación presente en estas áreas, las plantas interceptan las gotas de agua y condensan la humedad atmosférica, las cuales se precipitan aumentando los caudales de aguas subterráneas, ríos y arroyos.

Los bosques andinos actúan como reguladores hídricos. Los bosques de niebla (alto-andinos) presentan una dinámica hídrica poco convencional, que radica principalmente en que la niebla y la lluvia son transportadas por el viento y se convierten en un aporte adicional de agua y nutrientes al sistema (González, 2000; Tobón y Arroyave, 2008).

La cantidad adicional de agua obtenida en los bosques de niebla varía de acuerdo con los patrones de lluvia, posición topográfica,

frecuencia o persistencia de la nubosidad y los vientos dominantes. El incremento puede ser del 15% al 20% para lluvias entre 2.000 y 3.000 mm al año y del 50% al 60% para localidades con baja precipitación (Hamilton *et al.*, 2008).

La cantidad de agua adicional obtenida en los bosques de niebla en Colombia por interceptación de la precipitación horizontal (lluvia transportada por el viento y niebla) varían entre 43 mm al año a 2.100 m de altitud, hasta 273 mm al año a 3.040 m de altitud (Tobón y Arroyave, 2008; Tobón *et al.*, 2000). Sin embargo, algunos autores han encontrado valores mayores en condiciones más expuestas, con cifras que están entre 143 y 796 mm al año (Cavelier *et al.*, 1997; González, 2000).

Algunos aportes por neblina (precipitación horizontal) se presentan en la Tabla 32.

La influencia de los bosques en el clima (Teoría de la Bomba Biótica)

La teoría de la Bomba Biótica fue propuesta por Makarieva y Gorshkov (2007), la cual plantea que la mayor fuerza impulsora de los vientos no es la temperatura sino la capacidad de los bosques para condensar la humedad.

En el caso de la Bomba Biótica la disminución en la presión del aire se produce por la condensación del vapor de agua, alrededor de núcleos de condensación originados por los compuestos volátiles del bosque.

De acuerdo con Makarieva y Gorshkov (2007), la teoría de la Bomba Biótica tiene componentes físicos y ecológicos. Los físicos se refieren a que los vientos soplan desde donde la tasa de condensación de vapor de agua es baja a donde es alta. Los ecológicos se relacionan con la gran superficie de evaporación de las hojas verdes la cual hace que la evaporación y, por consiguiente, la condensación, sea más intensa sobre los bosques naturales que sobre el océano. Por lo tanto, cuando el continente está cubierto de bosques y el viento sopla de mar a tierra, aporta la humedad para alimentar los procesos de precipitación y compensar la salida de agua en los caudales de los ríos (Figura 65).

El bosque natural evapora de manera activa y funciona como una bomba hidráulica, generando continuamente una menor presión atmosférica sobre su dosel y, por lo tanto, atrayendo aire húmedo desde océano (Makarieva y Gorshkov, 2007). Si el bosque es talado o destruido, el agua simplemente dejará de ser bombeada desde el océano y se agotará tierra adentro, produciendo desertificación (Figura 66).

La teoría de la Bomba Biótica ha sido aplicada por Nobre (2014), para explicar

Tabla 32.

Aportes de agua por neblina en algunas localidades (González, 2000).

Localidad	Lluvia anual (mm)	Interceptación por neblina (mm)	Total (%)
El Zumbador- Venezuela	1.983	72	4%
Sierra Madre - México	300	185	62%
Pico del Este - Puerto Rico	4.530	325	7%
Cerro Santa Ana - Venezuela	1.065	511	48%
Mauna Loa - Hawaii	1.500	750	50%
Serranía Macuira - Colombia	853	409	48%
El Tambito - Colombia	3.880	427	11%

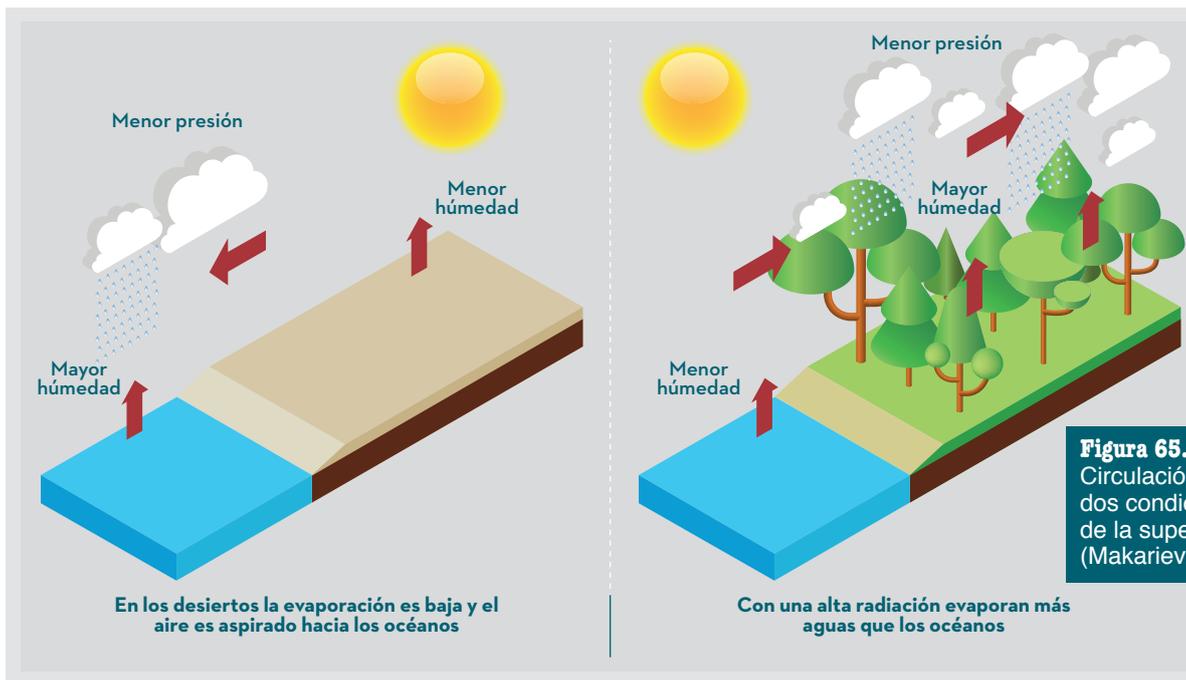


Figura 65. Circulación atmosférica para dos condiciones de cobertura de la superficie terrestre (Makarieva y Gorshkov, 2007).

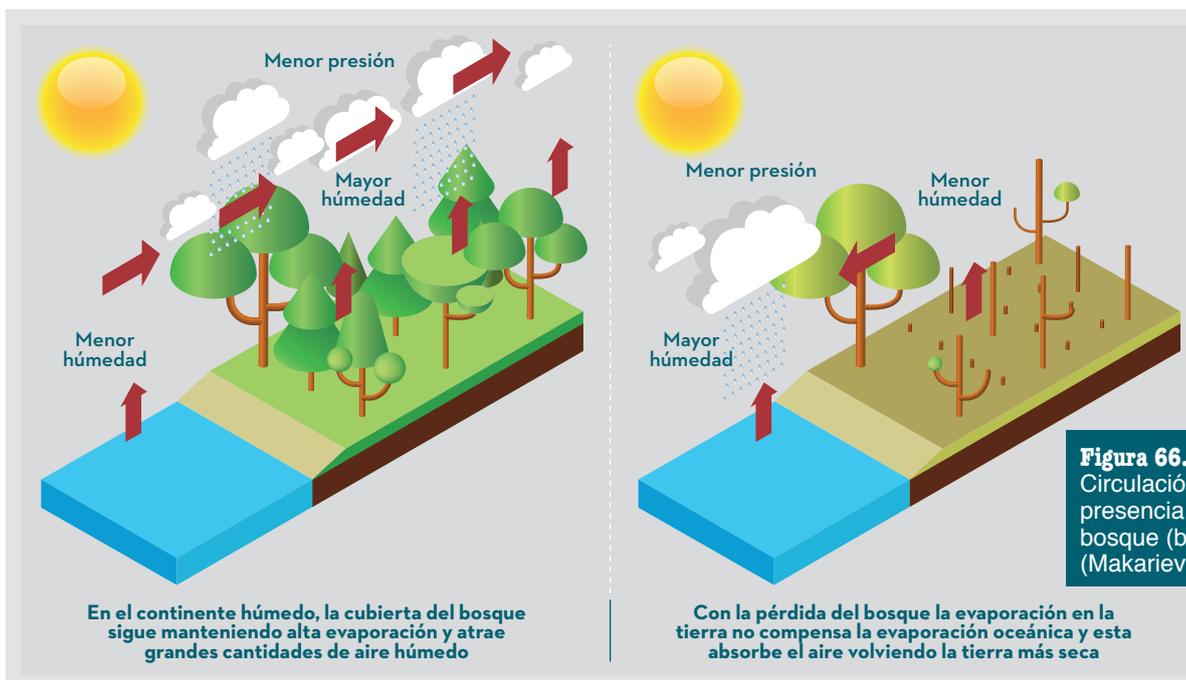


Figura 66. Circulación atmosférica con presencia del bosque y sin bosque (bosque deforestado) (Makarieva y Gorshkov, 2007).

las condiciones climáticas de la Amazonia y su influencia en las condiciones húmedas del Sur del Brasil y Norte de Argentina, las cuales por la circulación general de la

atmósfera deberían ser desérticas. Esta teoría también fue utilizada por Bunyart *et al.* (2014), para las condiciones de bosques de Costa Rica.

De acuerdo con Nobre (2014), desde Humboldt hasta nuestros días, la ciencia ha planteado las influencias de los bosques sobre los elementos del clima:

- ♦ La primera influencia del bosque y sus funciones es la capacidad que tiene para mantener húmedo el aire en movimiento, lo que permite llevar lluvia a áreas continentales alejadas de los océanos. Los árboles transfieren grandes volúmenes de agua del suelo a la atmósfera, a través de la transpiración.
- ♦ Una segunda influencia se refiere a la formación de lluvias abundantes en aire limpio. Los árboles emiten sustancias volátiles, precursoras de núcleos que ayudan en la condensación del vapor del agua; la eficiencia en la nucleación de las nubes resulta en lluvias abundantes y benignas.
- ♦ Una tercera influencia es la supervivencia de la selva amazónica ante los cataclismos climáticos y su formidable capacidad de mantener un ciclo hidrológico benéfico, incluso en condiciones externas desfavorables. Según la nueva teoría de la Bomba Biótica, la transpiración abundante de los árboles, y una condensación muy potente en la formación de nubes y lluvias –mayor que en los océanos contiguos –, lleva a una disminución de la presión atmosférica sobre el bosque, que succiona el aire húmedo del océano hacia dentro del continente, garantizando las lluvias en cualquier circunstancia.
- ♦ La cuarta influencia explica por qué la porción meridional de América del Sur,

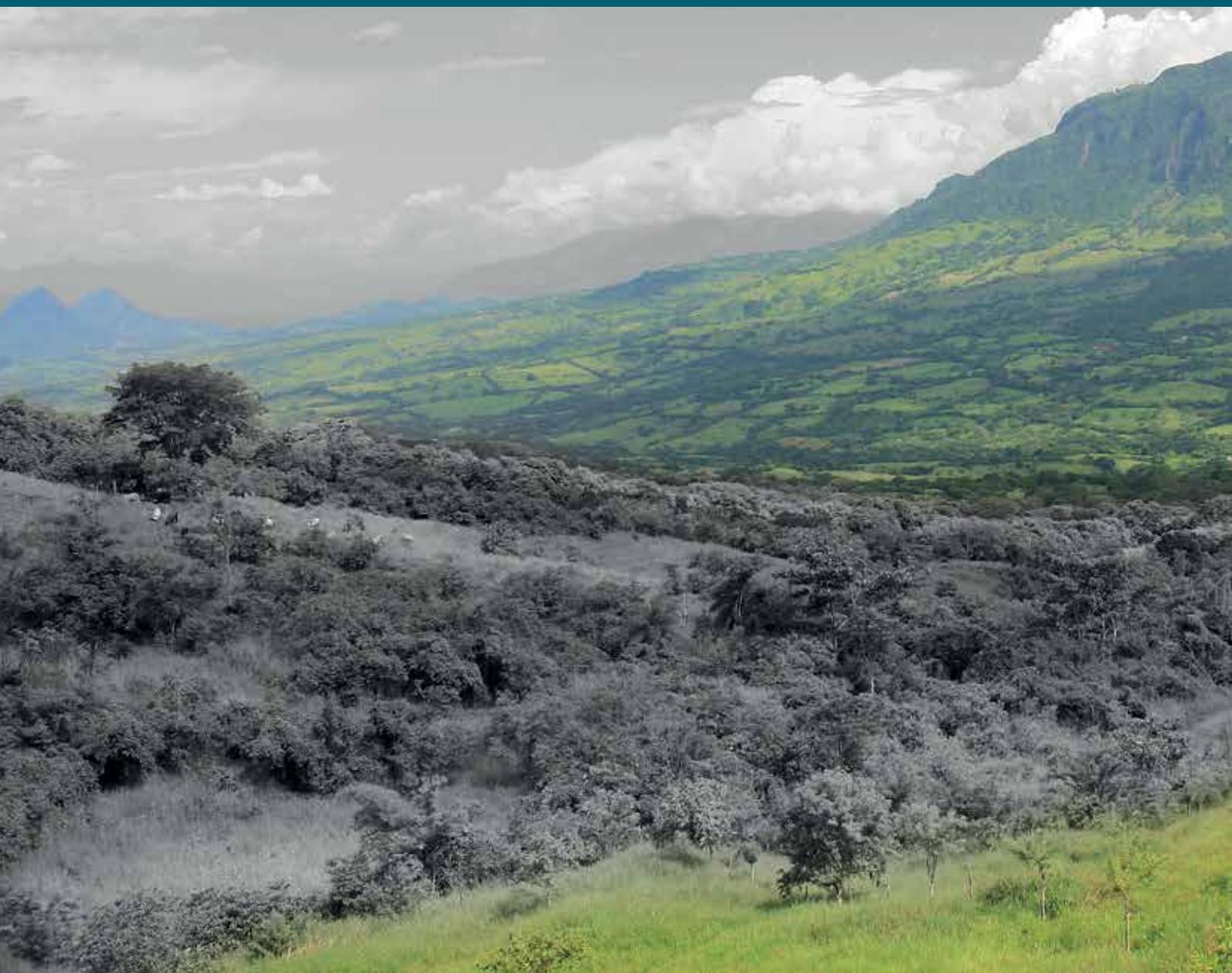
al Este de los Andes, no es desértica, al contrario de lo que ocurre en la misma latitud al Oeste de los Andes y en otros continentes. El bosque amazónico no sólo mantiene el aire húmedo para sí mismo, sino que exporta ríos aéreos de vapor que transportan el agua necesaria para las abundantes lluvias que irrigan regiones distantes en el verano hemisférico.

- ♦ La quinta influencia es el motivo por el cual la región amazónica y los océanos próximos no fomentan fenómenos atmosféricos como huracanes y extremos climáticos. La atenuación de la actividad atmosférica se explica, de un lado, por el efecto dosificador, distribuidor y disipador de la energía de los vientos que ejerce el dosel del bosque con su rugosidad y, del otro, por la aceleración horizontal a gran escala de los vientos en la atmósfera baja, promovida por la bomba biótica, impidiendo la formación de huracanes y similares. La condensación espacialmente uniforme sobre el dosel forestal impide la concentración de energía de los vientos en torbellinos destructivos, mientras el agotamiento de la humedad atmosférica, retirada del océano, restringe a las tormentas del vapor de agua en las regiones oceánicas adyacentes a los grandes bosques.

Los planteamientos anteriores indican que una remoción del 40% de la cobertura del bosque amazónico podrá llevarlo a una transición hacia condiciones más secas (de una sabana), acabando incluso con el paso del tiempo los bosques que no fueron deforestados (Nobre, 2014).



El viento





El viento es el movimiento del aire en la superficie terrestre, se produce por los gradientes de presión atmosférica originados por diferencias en los calentamientos de las superficies y por efecto de las fuerzas de fricción, de la gravedad y de Coriolis (fuerzas debidas a la rotación terrestre).

Las dos características fundamentales del viento son la dirección y la velocidad. La dirección es el punto del horizonte desde donde proviene el viento; la velocidad se refiere a la distancia que recorre en la unidad de tiempo ($m\ s^{-1}$, $km\ h^{-1}$). La velocidad del viento generalmente aumenta con la altura sobre la superficie terrestre y su medición en las estaciones climáticas normalmente se hace a 10 metros de altura en campo abierto.

En general, en el trópico y en Colombia, los vientos locales tienen gran preponderancia en el aporte de humedad, en favorecer los movimientos verticales y en la formación de nubes convectivas, las cuales provocan aguaceros o tormentas, particularmente en las tardes; estas pueden estar acompañadas de vientos violentos de corta duración, cuyas velocidades en ocasiones pueden superar los $100\ km\ h^{-1}$.

En las regiones planas, como en la llanura del Caribe, la Orinoquia y la Amazonia, se observan circulaciones bastante definidas en el transcurso del año y están directamente influenciadas por los vientos Alisios, mientras que en los valles interandinos y en las zonas montañosas, a pesar de percibirse una ligera influencia de los Alisios, las condiciones fisiográficas determinan en gran parte la dirección y velocidad del viento (Ideam, 2005).

Los vientos de valle - montaña

A nivel macroclimático en Colombia la circulación atmosférica está determinada por los vientos Alisios del Noreste y los Alisios del Sureste, los cuales se modifican por la presencia de la cadena montañosa de los Andes.

En las vertientes de las cordilleras se presenta una marcada influencia de la topografía sobre la circulación de los vientos de carácter local (vientos de valle - montaña - valle). Durante el día, por efecto del calentamiento de la superficie, los vientos, cálidos y de menor densidad, denominados *anabáticos* ascienden desde el valle hacia la montaña. Durante la noche

ocurre el proceso de circulación en dirección opuesta y desde la montaña descenden hacia el valle masas de aire frío y de mayor densidad llamados *vientos catabáticos* (Figuras 67).

La circulación descrita se observa en la dirección dominante del viento para diferentes localidades de la zona cafetera (Tabla 33).

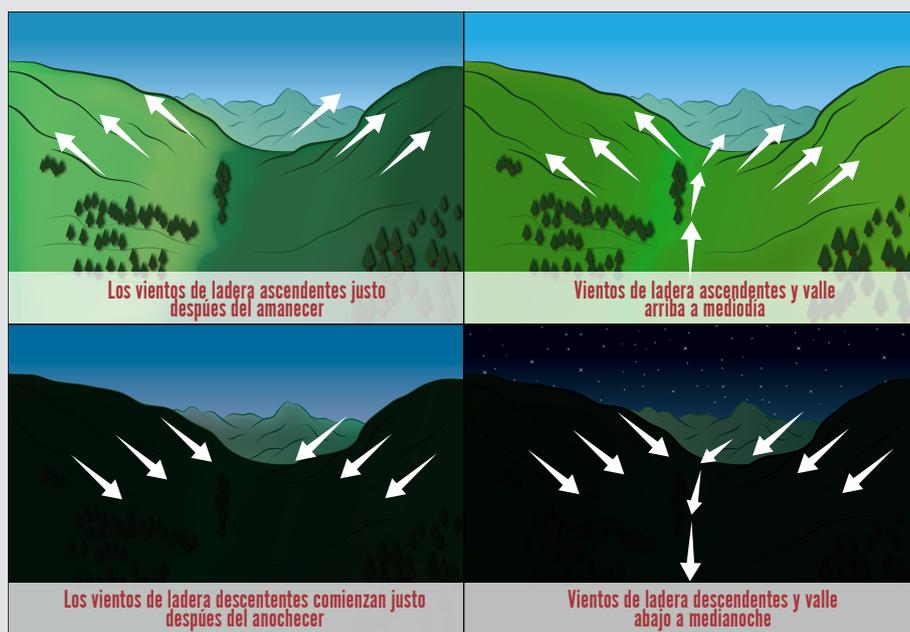


Figura 67.
Circulación de los vientos valle-montaña-valle.

Tabla 33.
Dirección dominante del viento para algunas localidades de la zona cafetera (Guzmán y Gómez, 1995).

Estación	Departamento	Dirección día	Dirección noche
El Rosario	Antioquia	Noroeste	Sureste
Naranjal	Caldas	Noroeste	Sureste
Cenicafé	Caldas	Noroeste	Sureste
Agronomía	Caldas	Noroeste	Sureste
La Florida	Cauca	Suroeste	Sureste
Pueblo bello	Cesar	Sureste	Noreste
Tibacuy	Cundinamarca	Sureste	Noroeste
Consacá	Nariño	Noroeste	Sureste
Blonay	Norte Santander	Noroeste	Sureste
Paraguaicito	Quindío	Noroeste	Sureste
Líbano	Tolima	Sureste	Noroeste
Albán	Valle	Noreste	Sureste

Trojer (1954b) en su estudio *El Tiempo reinante en Colombia, sus características y su desarrollo: Estudios básicos para una climatología dinámica de Colombia*, esquematiza en un transecto longitudinal entre el océano Pacífico y los Llanos Orientales entre los 4° y 5° de latitud Norte las circulaciones del viento para el día y la noche en las cordilleras Occidental, Central y Oriental de Colombia.

En la mayor parte del país, la velocidad media anual del viento varía entre 5 y 10 km h⁻¹. Toda la Orinoquia y la Amazonia, con excepción del Trapecio Amazónico, la gran mayoría de la zona Andina, el Suroccidente de la región Caribe y la mayor parte de la región Pacífica comparten este rango de velocidades del viento. Los vientos más débiles de velocidades medias inferiores a los 5 km h⁻¹ se registran en el Centro y el extremo Sur de la costa Pacífica, el Trapecio Amazónico y algunos núcleos aislados en el Alto Patía, el Eje Cafetero, el Sur del medio Magdalena y la depresión Momposina (Ideam, 2005).

En la mayoría de las localidades las ráfagas (impulsos cortos) diurnas presentan mayor velocidad que las nocturnas. Estas ráfagas pueden alcanzar velocidades próximas a los 70 km h⁻¹ y pueden ocasionar daños en los cultivos y en las viviendas (Guzmán y Gómez, 1995; Jaramillo, 1987).

El viento dentro de los cultivos

El viento puede influir de manera favorable o desfavorable sobre los organismos (Pereira *et al.*, 2007):

Como efectos favorables, el viento actúa como agente de transporte de algunas propiedades del aire como son, redistribuir el calor de regiones más calientes a regiones más frías, transportar la humedad desde regiones más húmedas a regiones más secas, dispersar gases y partículas en suspensión y así

disminuir la concentración en el aire, remover del calor desde la planta y los animales, dispersar esporas, semillas y polen; remover el vapor de agua desde las hojas.

Como efectos desfavorables los vientos intensos causan daños mecánicos, anatómicos y fisiológicos en las plantas, erosionan el suelo, causan fisuras en las plantas favoreciendo la entrada de microorganismos, provocan defoliación reduciendo su área foliar, aumentan la transpiración causando cierre estomático disminuyendo la tasa fotosintética y crecimiento de la planta. Las plantas sometidas a vientos superiores a 10 km h⁻¹ presentan reducción en el crecimiento y desarrollo, menor número de entrenudos, enanismo, menor número de hojas, hojas más pequeñas y más gruesas, menor productividad.

La vegetación tiene una marcada influencia sobre la dirección y la velocidad de viento. El comportamiento turbulento del aire dentro de las comunidades vegetales depende de la forma del árbol, el índice de área foliar, la distancia de siembra y las prácticas de cultivo como el sombrero y la orientación de los surcos.

La velocidad del viento aumenta con la altura en forma exponencial debido a la disminución de la rugosidad de la superficie y a la menor fricción. El patrón de la velocidad del viento sobre la superficie se denomina *Perfil de la velocidad del viento* y permite conocer la velocidad del viento con la altura. La velocidad del viento en el interior del cultivo también decrece exponencialmente (Figura 68).

A partir del perfil del viento puede estimarse el coeficiente de transporte turbulento del calor sensible, del vapor de agua y el dióxido de carbono intercambiado entre un cultivo y la atmósfera (Loomis y Connor, 1992).

En el interior de las plantaciones de café a libre exposición y bajo sombrero la velocidad del viento es muy reducida cuando se compara con la registrada en la estación climática (Jaramillo, 1987).

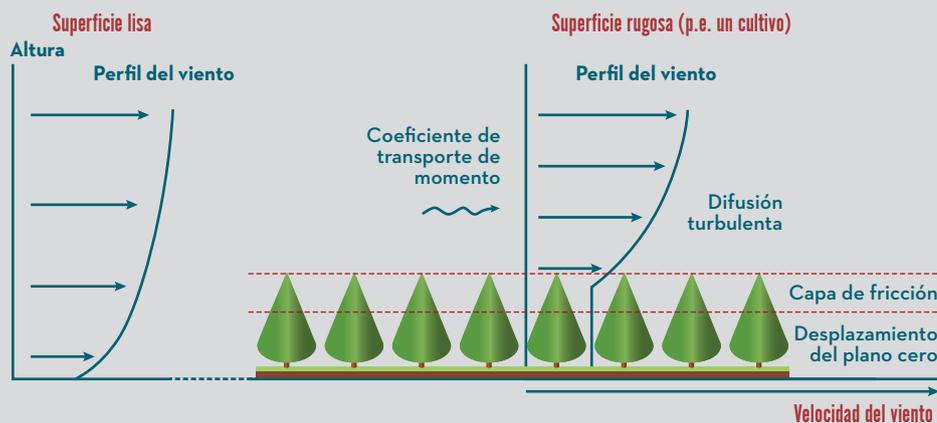


Figura 68.

Variación de la velocidad del viento con la altura en una superficie lisa y dentro de un cultivo.

Barreras rompevientos

Las barreras rompevientos consisten en una o más hileras de árboles y arbustos en dirección perpendicular al viento dominante y dispuestas en tal forma que lo obligan a elevarse sobre sus copas, con lo cual disminuye su velocidad. Cuando la velocidad del viento es mayor a 2 m s^{-1} es perjudicial para muchas plantas.

Entre los beneficios de las barreras rompevientos están (Palomeque, 2009):

- ◆ Disminuir la erosión del suelo, evitando la pérdida de fertilidad de los suelos protegidos.
- ◆ Otorgar protección y mejorar la productividad de los cultivos.
- ◆ Incrementar el peso y sobrevivencia de los animales protegidos en los meses fríos, al disminuir la velocidad del viento y aumentar la temperatura.

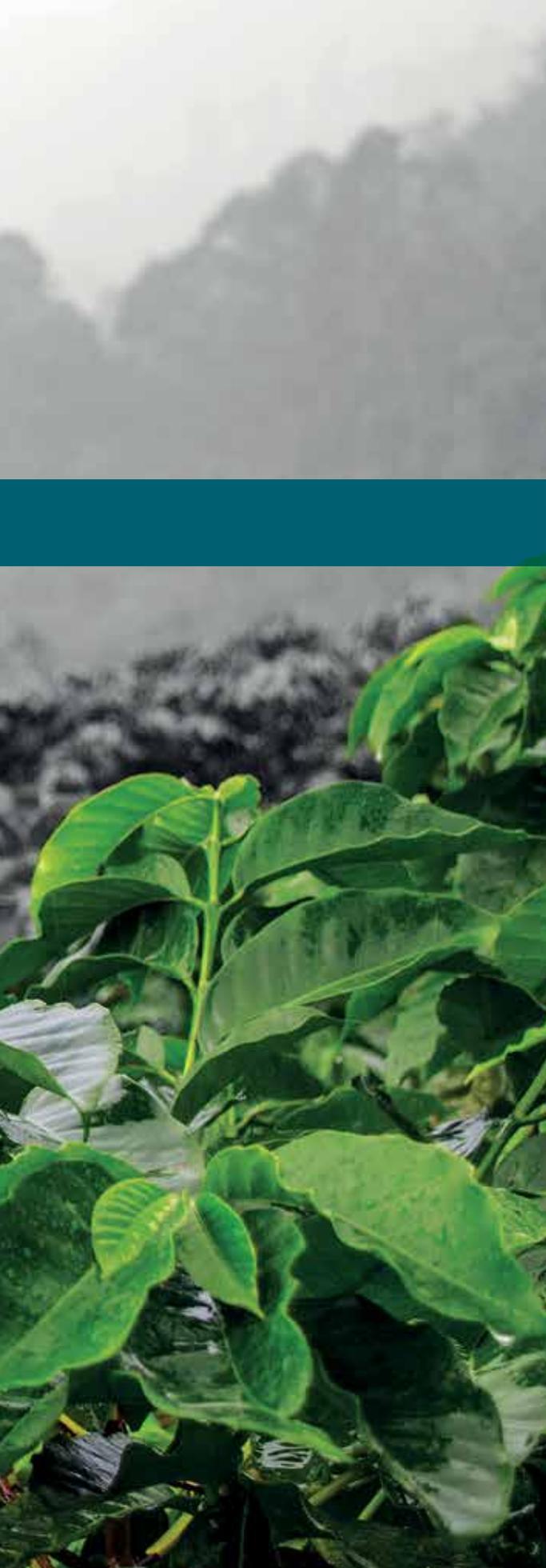
- ◆ Otorgar protección a cursos de agua, y aumentar la biodiversidad.
- ◆ Proteger galpones, corrales, casas y otras infraestructuras.
- ◆ Disminuir los requerimientos energéticos de los hogares protegidos, abaratando los costos de calefacción.
- ◆ Producir productos forestales, como madera, postes, leña y productos forestales no madereros.
- ◆ Aumentar la rentabilidad del predio, al ser consideradas como una mejora ambiental y productiva.

Como especies recomendadas para el establecimiento de barreras rompevientos (Giraldo, 2000) están, entre otras, *Leucaena leucocephala* (leucaena), *Cassia siamea* (casia amarilla), *Gliricidia sepium* (mata-ratón), *Cajanus cajan* (guandul).



A photograph of a coffee plantation. The foreground shows a close-up of a coffee plant with vibrant green, glossy leaves. The background is a vast field of similar plants, slightly out of focus, under a bright, hazy sky. A teal-colored horizontal band is overlaid across the middle of the image, containing white text.

Las heladas, el granizo,
las descargas eléctricas,
la presión atmosférica



Las heladas

(Camargo y Camargo, 2004; Lasso, 1987)

El cultivo del café en Colombia se encuentra localizado en altitudes donde no se registran temperaturas mínimas que limiten el desarrollo y el crecimiento de la planta y, por lo tanto, las heladas no ocurren. Por ser un aspecto de interés agroclimático en el café se presenta un resumen sobre este fenómeno.

Desde un punto de vista meteorológico se denomina **helada** a la ocurrencia de una temperatura igual o inferior a 0° Celsius, observada a una altura de 2,0 m sobre la superficie del suelo. Desde el punto de vista agronómico una helada es la temperatura en la cual los tejidos de la planta comienzan a presentar daño por frío (García y García, 1978; Lasso, 1987).

Condiciones meteorológicas que favorecen las heladas

Temperatura del aire. La temperatura del aire disminuye con la altura. Durante el día la radiación solar produce calentamiento del suelo. En la noche, el suelo irradia calor hacia la atmósfera y se enfrían las capas de aire próximas a él (principalmente hasta los 20 m). Cuando ocurre la condición atmosférica conocida como inversión térmica, por encima de una capa más fría, se presenta una capa con temperatura más alta. En el extremo inferior de la capa de inversión térmica, el aire frío que está en contacto con el suelo permanece estancado.

Nubosidad. Las nubes actúan como sistemas que retienen calor, amortiguando las variaciones extremas de temperatura. Durante el día interceptan la insolación, disminuyendo la temperatura máxima. En la noche impiden el enfriamiento del suelo por irradiación, atenuando la temperatura mínima. En consecuencia, la pérdida de calor

por el suelo es mayor cuando el cielo está despejado, existiendo mayor enfriamiento y peligro de helada.

Viento. Bajo condiciones normales, la temperatura disminuye con la altura; cuando el suelo se enfría debido a la pérdida de calor por irradiación, el aire próximo al suelo permanece estacionario y su temperatura baja. En estas circunstancias, el aire helado sobre el suelo será cubierto por aire más caliente; si hay viento, ocurrirá mezcla de estos y la temperatura del aire de la superficie aumentará. Por consiguiente, otra condición para que ocurra la helada es que en la noche el viento permanezca en calma.

Humedad del aire. Al bajar la temperatura se produce la condensación del vapor de agua y la liberación del calor latente. A mayor humedad atmosférica puede liberarse mayor calor latente para contrarrestar el efecto de la disminución de temperatura.

Topografía. Las temperaturas más bajas se registran en las cumbres de las montañas o en el fondo de los valles. El aire frío desciende por las vertientes estancándose en el fondo del valle. El fondo de las hondonadas son puntos de acumulación de aire frío.

Las heladas pueden clasificarse en dos grandes tipos: **Helada por advección**, son originadas por la intrusión de masas de aire frío proveniente de las regiones polares que se extienden sobre grandes áreas y pueden persistir durante muchos días. Este tipo de heladas es típico de latitudes medias y altas y no se presenta en las regiones tropicales. **Helada por radiación**, se presenta bajo condiciones de noche despejada (sin nubes) y viento en calma, en las cuales el calor emitido por la superficie del suelo se pierde rápidamente hacia el espacio con lo que su temperatura y la del aire cercano a él, disminuye progresivamente, hasta alcanzar valores iguales o menores a 0°C.

Entre las heladas radiativas están: a) La **helada blanca**, cuando hay una pérdida progresiva de calor por radiación desde la superficie

del suelo, reduciendo la temperatura de los objetos cercanos a ella a niveles inferiores al punto de congelamiento del agua (0°C); se denomina blanca a causa de la formación de cristales delgados de hielo (escarcha), en forma de escamas, agujas, plumas o en abanico sobre la superficie de las plantas, suelo u otros objetos. b) La **helada negra** cuando la pérdida de calor es rápida y no hay formación de escarcha porque el aire está muy seco y las plantas se queman, originando la coloración negra.

En Colombia se presentan heladas de tipo radiativo en aquellas regiones situadas a altitudes superiores a los 2.500 m como son los altiplanos de Nariño (mesetas de Túquerres e Ipiales), Cundinamarca, Boyacá y los llanos de Cuivá en Antioquia. La época de heladas coincide con los períodos más secos, en los cuales es común observar días con condiciones favorables para su formación.

El granizo

(García y García, 1978; Arcila y Jaramillo, 2010)

El granizo es toda precipitación que alcanza el suelo en forma sólida y amorfa, a diferencia de la nieve que es precipitación sólida, cristalizada y poco densa. El granizo es transparente, parcial o totalmente opaco, de formas esferoidal, cónica o de forma irregular, puede caer separado o aglomerado en bloques irregulares. En ocasiones cada granizo puede tener tamaños muy grandes, alrededor de 20 cm de diámetro, con peso hasta de 700 g. Los granizos son difíciles de romper cuando caen al suelo y rebotan en él sin desintegrarse.

El granizo se forma en las fuertes corrientes ascendentes que existen en las nubes cumulonimbos, en las cuales las gotas de lluvia son desplazadas hacia zonas muy altas y frías de la nube, y como consecuencia de ello, sobre el núcleo inicial se van congelando las diversas capas de hielo. Ello ocurre una y otra vez mientras la masa de granizo sube y baja en el interior de la nube movida por las fuertes corrientes que le impiden caer;

cuando el peso del granizo es superior al empuje de las corrientes ascendentes, se descarga al suelo. Las gotas de agua se congelan, formando el granizo, cuando la temperatura es inferior a 0°C. Si las corrientes de aire arrastran las gotas de agua por encima del nivel de congelación, especialmente hasta aquellas zonas de la nube con temperaturas entre -5°C y -15°C, se producirá el granizo.

Las granizadas pueden presentarse en cualquier lugar de Colombia, incluso en zonas muy calientes como Valledupar o frías como Ipiales. Se estima que en un 10% de las nubes cumulonimbus se generan granizadas. La mayor frecuencia del granizo ocurre entre los 2.000 y 3.000 m de altitud.

En las áreas bajas de las regiones Caribe, Pacífica, la Orinoquia y la Amazonia, el granizo es poco frecuente. Las zonas de Colombia con la más alta frecuencia de este fenómeno, con más de cinco granizadas al año son los altiplanos de Nariño, Antioquia y el Cundiboyacense, y zonas altas de la Sierra Nevada de Santa Marta, la zona cafetera, Valle, Tolima y Huila.

Cuando hay ocurrencia de El Niño se presentan menos granizadas, pero aumentan cuando hay presencia de La Niña. Sitios como Tenjo, Guasca, Tabio, Chocontá, Subachoque y Madrid en Cundinamarca, tienen más de cinco días al año con granizadas.

El grado destructivo del granizo depende de la intensidad, duración, del área de ocurrencia y de la actividad económica de la zona.

Para la región cafetera se han reportado granizadas intensas y frecuentes en diferentes regiones, especialmente aquellas expuestas a los grandes valles, entre las cuales pueden citarse La Meseta de Popayán (Cauca), expuesta al valle del río Patía; Dosquebradas, Marsella y Pereira (Risaralda), con exposición al valle de río Cauca; y en Samaná (Caldas), localizada hacia la vertiente del río Magdalena.

Las descargas eléctricas

El rayo se define como la transferencia de cargas eléctricas positivas o negativas entre la nube, de nube a nube o de nube a tierra. Un rayo nube-tierra está compuesto típicamente de una secuencia de descargas de retorno individuales, que transfieren la carga eléctrica de la nube a la tierra. Cada descarga eléctrica presenta corrientes máximas de 10.000 a 400.000 amperios. Las descargas negativas de nube a tierra son las más frecuentes, en un 90% (Torres, 1994).

En general, los rayos están asociados a las tormentas originadas por calentamiento convectivo local, típicas de las regiones ecuatoriales, en donde predominan los movimientos verticales del aire.

El número de días en el año con tormentas eléctricas se define como **nivel cerámico** (del griego *keranos* = rayo). En Colombia los mayores valores de nivel cerámico se presentan en el Magdalena Medio (140 días); Vichada, Sierra Nevada y área de Medellín (120 días); Litoral Pacífico, área Pereira - Manizales, Cali - Popayán, altiplano de Cundinamarca y Boyacá (100 días) (Bernal *et al.*, 1990; Torres, 1994).

La presión atmosférica

El aire ejerce una fuerza sobre la superficie de todos los objetos que están en contacto con él. La presión del aire (presión atmosférica) es una medida del peso de la columna de aire por unidad de área. A mayor altitud menor peso de la columna de aire y una menor presión atmosférica.

A una menor presión atmosférica menor solubilidad del dióxido de carbono y del oxígeno en el agua, lo cual incide en el proceso de respiración de las plantas (Murthy, 2002).

En la atmósfera la densidad del aire es inversamente proporcional a la temperatura del aire; por lo tanto, las masas de aire frío son más densas y ejercen mayor presión que las masas de aire caliente. Igualmente, la densidad del aire es también inversamente proporcional a la concentración del vapor de agua, las masas de aire secas son más densas y ejercen mayor presión que las masas de aire húmedas. Como regla general, la temperatura tiene un efecto más significativo sobre la presión del aire que la humedad (Moran y Morgan, 1991).

Eslava, 1995, presenta un estudio muy completo y detallado sobre el Régimen de la presión atmosférica en Colombia; utilizando

la información de 53 estaciones climáticas publicada en dicho estudio se estimó la Ecuación <72>:

$$\ln P = 6,91745 - 0,00012 * A \quad (R^2 = 0,99) \quad <72>$$

Donde:

\ln : logaritmo natural

P : presión atmosférica en hectopascal²

A : altitud en metros

Para altitudes comprendidas entre los 1.000 y 2.000 m (zona cafetera) la presión atmosférica varía entre 896 hPa y 794 hPa, respectivamente.

² Unidades de presión atmosférica: 1hectopascal (hPa) = 1 milibar (mb) = 0,750062 milímetros de mercurio (mm Hg). 760 mmHg = 1 atmósfera (Atm) = 1.013,25 mb = 1.013,25 hPa





El cambio climático





Los registros de las condiciones climáticas de épocas pasadas demuestran que el clima de la Tierra está en constante cambio. El clima con sus variaciones en la frecuencia de los eventos extremos, por ejemplo, las sequías, las inundaciones y las tormentas, ha tenido grandes impactos en las actividades humanas, en sus migraciones, en sus asentamientos. Por esta razón, los científicos estudian las condiciones climáticas del pasado en diversas escalas de tiempo para hallar indicios que ayuden a la sociedad a planificar con relación a los futuros cambios climáticos.

El cambio climático se refiere a la variación observada en las condiciones del clima durante largos períodos, por modificaciones en la radiación solar, en la excentricidad o en la inclinación de la Tierra o por movimientos de la corteza terrestre (Pabón *et al.*, 1998).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos relativamente cortos. Esta incluye los extremos y las diferencias de valores mensuales y anuales con respecto a los valores climáticos esperados, por ejemplo, las erupciones volcánicas y los eventos El Niño-La Niña (Pabón *et al.*, 1998).

Los climas del pasado los estudia la paleoclimatología utilizando diferentes fuentes de información (Accefyln-lcsu, 1994):

- ◆ Publicaciones sobre observaciones meteorológicas, narraciones de viajes.
- ◆ Paisajes en pinturas de algunos artistas.
- ◆ Estudio de los anillos de los árboles que proporcionan datos anuales y estacionales de la temperatura y la lluvia durante los últimos 10.000 años, ya que estos elementos influyen en el crecimiento de los árboles; factores adversos como las sequías o el frío tienen un efecto en el crecimiento.
- ◆ Los arrecifes de coral proporcionan un registro de las condiciones climáticas y

marinas. Por medio del análisis de isótopos del oxígeno, del carbono y del cadmio se analizan los flujos de nutrimentos por las corrientes marinas y las condiciones de temperatura del océano o cambios en la salinidad y nivel del océano.

- ♦ Estudios de los casquetes polares o de los hielos de los glaciares analizando los contenidos de polvo y gases atrapados que registran las condiciones de vientos, temperatura y precipitación del pasado.
- ♦ Estudios en los depósitos de sedimentos terrestres proporcionan registros de erosión eólica, tipos de vegetación y circulación atmosférica.
- ♦ Estudio de depósitos de sedimentos marinos, con los cuales pueden estimarse las circulaciones marinas, temperatura media de la superficie del mar y los volúmenes de hielo: La edad de los sedimentos puede conocerse con la ayuda del carbono 14 e isótopos de descomposición del uranio.
- ♦ Análisis de polen para conocer los cambios de vegetación a través del tiempo, como respuesta a cambios climáticos regionales o globales, originados por las edades de hielo o cambios provocados por el hombre.

Causas del cambio climático

(*Global Climate Change, 2017; Pidwirny, 2004*)

El cambio climático es complejo y caótico y se debe a múltiples factores que están en permanente interacción: factores de *forzamiento externo* debidos a la posición de la Tierra con respecto al Sol (excentricidad, oblicuidad y precesión) y actividad de las manchas solares), y a factores de *forzamiento interno* como son la formación de los continentes y montañas, por el volcanismo, por las corrientes oceánicas superficiales y profundas, por la proporción de las masas de hielo, por la dinámica y composición de la atmósfera.

Mecanismos de forzamiento externo

Variaciones galácticas

La órbita del sistema solar con relación al centro de la galaxia se ha considerado como posible mecanismo de forzamiento global; Fischer (1984), citado en el estudio de cambio climático global (*Global Climate Change, 2017*) sugiere que los superciclos de las edades de hielo de 700 millones de años sean el resultado de tales mecanismos.

Variaciones orbitales

El astrónomo M. Milankovitch, en la década de 1920 - 1930, calculó las variaciones de insolación en la Tierra resultantes de cambios en los movimientos de translación y de rotación de la Tierra y propuso un mecanismo astronómico para explicar los ciclos glaciales que constaba de tres factores: La excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la oblicuidad o la inclinación del eje de rotación terrestre, y la precesión o variación en el giro del eje terrestre.

La excentricidad de la órbita terrestre varía desde el 0,5%, correspondiente a una órbita prácticamente circular, al 6% en su máxima elongación. La forma de la órbita terrestre, con menor intensidad, también afecta a las variaciones estacionales. En períodos de aproximadamente 100.000 años la órbita se alarga y se acorta. Cuando la elipse alcanza su excentricidad máxima se intensifican las estaciones en un hemisferio y se moderan en el otro. Se considera que la variación de la excentricidad de la órbita terrestre ejerce un efecto mucho más débil sobre la intensidad de la radiación solar porque su contribución directa al cambio de irradiación sobre la Tierra es menor que el 0,1%. Sin embargo, la frecuencia de las últimas glaciaciones es cercana a los 100.000 años.

La oblicuidad o inclinación del eje de rotación terrestre fluctúa desde los 21,5° hasta los 24,5° en períodos de 41.000 años. Al aumentar la inclinación resultan más extremas las estaciones en ambos hemisferios.

La precesión del eje de rotación de la Tierra describe una circunferencia completa cada 25.790 años. La precesión es responsable de producir una intensificación de las estaciones cuando la máxima inclinación del eje terrestre coincide con la máxima distancia al Sol. Apoyándose en esta teoría, V. Koppen, sugería que lo que conduce a una glaciación no es una sucesión de inviernos rigurosos, sino la reducción de la insolación en verano, que dificultaría la fusión de los hielos formados en el invierno.

Variaciones solares

La variabilidad solar ha sido considerada otro factor de forzamiento externo. El ciclo más conocido es la variación en el número de *manchas solares* con un período de 11 años. El ciclo de las manchas solares está relacionado con las variaciones en el magnetismo solar y a un doble ciclo de 22 años. En los años con un alto número de manchas solares la constante de radiación solar aumenta. Aunque la variación en la constante solar es muy baja, estudios demuestran relaciones entre el número de manchas solares con las sequías, la temperatura y el ozono atmosférico. Análisis recientes muestran un ciclo solar de 2.400 años, un ciclo de 200 años, un ciclo de 80 a 90 años y unos ciclos más cortos de 11 y 22 años relacionados con avances y retrocesos de los glaciares y variaciones en la temperatura. Como un ejemplo se tiene que en el período de 1645 a 1715 (Mínimo de Maunder) se presentó un clima excepcionalmente frío en Europa y Norteamérica conocida como la Pequeña Edad de Hielo, la cual estuvo asociada a una actividad mínima de las manchas solares.

Mecanismos de forzamiento interno

La formación de los continentes -Epirogénesis-

La epirogénesis estudia los cambios en la disposición global de las masas continentales de la Tierra. Hace 250 millones

de años la Tierra era un único continente (Pangea) y mediante su movimiento (deriva continental) se llegó a la distribución actual, con lo cual de manera permanente se han modificado las proporciones de masas continentales y de hielo con cambios en las circulaciones oceánicas y con ellas los intercambios energéticos.

La formación de las montañas -Orogénesis-

La orogénesis se refiere a los procesos de la formación de las montañas y los continentes. Tales mecanismos operan entre 10 y 1.000 millones de años. No hay duda que las montañas influyen en el clima terrestre, las montañas orientadas de Norte a Sur tienen un efecto marcado en la circulación general de la atmósfera, la cual presenta una componente marcada Este - Oeste como resultado de las fuerzas de Coriolis. La formación de montañas aumenta el área cubierta con nieve y modifican el albedo, reduciendo la radiación solar absorbida por la Tierra.

La actividad volcánica

Los volcanes lanzan a la atmósfera grandes cantidades de polvo y gases (especialmente dióxido de azufre). Las emisiones volcánicas afectan el ingreso de la radiación solar y el balance de energía en la troposfera y en la estratosfera.

Un ejemplo se tiene en la isla de Sumatra con el volcán Toba, que hizo erupción hace 73.000 años, que arrojó 2.800 km³ de material volcánico y formó un cráter de 100 km x 35 km x 500 m, actualmente es el lago Toba, que disminuyó la temperatura de la Tierra entre 3,0 a 3,5°C durante 6 y 7 años, causando una gran extinción de organismos y reducción de la población humana. Otro ejemplo reciente se tiene con la erupción del volcán Pinatubo en Filipinas en 1991, la cual originó un enfriamiento durante dos años (1992 y 1993) en la superficie terrestre hasta de 0,4°C y un calentamiento en la estratosfera hasta de 1,2°C.



La circulación oceánica

Los océanos almacenan una gran cantidad de calor y, en consecuencia, tienen un papel crucial en la regulación del sistema climático de la Tierra. Las circulaciones oceánicas superficiales (corrientes marinas) y profundas (circulación termohalina) permiten el intercambio de calor entre la región tropical y las regiones polares, algunos estudios sugieren que en las épocas de glaciación la circulación termohalina se reduce o se frena. La ausencia de la corriente del Golfo podría originar un enfriamiento entre 6°C y 8°C en Europa, durante una época interglacial como la actual.

La variación en la composición atmosférica

Los cambios en la composición atmosférica, incluyendo el contenido de gases de invernadero y aerosoles, son otro mecanismo de forzamiento interno del cambio climático.

Se define **efecto invernadero** como un proceso natural que se produce en la atmósfera, específicamente en la troposfera superior en la cual la energía irradiada desde el suelo solo es liberada parcialmente al espacio.

En la atmósfera están presentes los gases de invernadero, principalmente el anhídrido carbónico y el metano, que tienen la particularidad de dejar pasar la radiación de onda corta del Sol hacia la Tierra y limitar la salida hacia el espacio de la onda larga emitida desde el suelo. El efecto invernadero hace que la energía que llega a la Tierra sea “devuelta” más lentamente, por lo que es “mantenida” más tiempo junto a la superficie y así se mantiene una mayor temperatura.

En el conjunto de la Tierra se produce un efecto natural similar de retención del calor por la presencia de algunos gases atmosféricos. La temperatura media en la

Tierra está próxima a 15°C y si la atmósfera no existiera sería de unos -18°C. Se le llama efecto invernadero por similitud, porque en realidad la acción física por la que se produce es totalmente distinta a la que sucede en el invernadero de plantas.

Los cambios en los gases de invernadero de la atmósfera pueden ocurrir como un resultado tanto de factores naturales como de factores antropogénicos los cuales han recibido una gran atención en los últimos 20 años. La quema de combustibles fósiles, la tala de bosques y los procesos industriales han incrementado la cantidad de dióxido de carbono y otros gases de invernadero.

El más importante gas de invernadero es el vapor de agua, responsable por el 96% del efecto de invernadero. Entre los demás gases de invernadero como el dióxido de carbono, el metano, los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso, el más importante es el CO₂, que contribuye con el 3% del efecto invernadero. Los aportes antropogénicos del CO₂, a este efecto estarían entre el 0,005% y 0,250% (Ellingson *et al.*, 1991)

Es de anotar que en los últimos años han recibido especial atención en los sectores productivos, políticos y gubernamentales, los incrementos de las concentraciones de los gases de invernadero tales como el dióxido de carbono y metano, que podrían generar cambios climáticos globales que incidirían de manera significativa en las sociedades y ecosistemas naturales (Accefyn-Icsu, 1994).

Retroalimentación climática

El sistema climático está en un balance dinámico. Por ello está continuamente ajustándose a perturbaciones forzadas y como resultado, el clima se ve alterado. Un cambio en cualquier parte del sistema climático, iniciado por mecanismos forzados internos o externos, tendrá una consecuencia mucho más amplia, a medida

que el efecto se propaga en cascada a través de los componentes asociados en el sistema climático, el efecto se amplifica y se conoce como retroalimentación. A medida que un efecto es transferido desde un subcomponente del sistema a otro, se verá modificado en sus características o en su escala. En algunos casos, el efecto inicial puede ser amplificado (retroalimentación positiva), mientras que, en otros, puede verse reducido (retroalimentación negativa).

Un ejemplo de un mecanismo de retroalimentación positiva involucra el vapor de agua. Una atmósfera más caliente potencialmente aumentará la cantidad de vapor de agua en ella; ya que el vapor de agua es un gas invernadero, se atraparán más energía que aumentará aún más la temperatura atmosférica. Esto a su vez, produce mayor vapor de agua, estableciéndose una retroalimentación positiva.

Los núcleos de hielo de Vostok en la Antártida muestran cinco períodos interglaciales (períodos cálidos) en los últimos 400.000 años y los núcleos de hielo de Groenlandia revelan fluctuaciones de períodos fríos y cálidos durante el interglacial actual, el Holoceno que se inició hace 11.800 años. En los últimos 3.500 años se han identificado cuatro períodos cálidos y uno frío: Período cálido Minoico (1450-1300 a.C.), el período cálido Romano (250-0 a.C.), el período cálido Medieval (800-1100 d.C.), la Pequeña Edad de Hielo (1350-1850 d.C.), y el Período Cálido Moderno (1850 hasta el presente).

Cambio climático en Colombia

Para Colombia los primeros registros climáticos de los climas pasados fueron realizados por Van Der Hammen (1996), sobre depósitos de polen fósil realizados en la Sabana de Bogotá.

Los estudios de polen revelan un alto número de glaciaciones (Hooghiemstra y Ran, 1996;

Van der Hammen, 1996). Para la parte final de la glaciación y según los investigadores antes citados, se destacan los siguientes eventos:

- ♦ Un mínimo de temperatura ocurrió hace 18.000 años, pero entre 35.000 y 18.000 años a pesar de que la temperatura en las montañas colombianas era unos 7°C más baja que la actual, las condiciones de humedad no fueron suficientes para que los glaciares siguieran creciendo. Esto diferencia a Colombia de las latitudes medias donde la mayor extensión de los glaciares ocurrió hace 18.000 años.
- ♦ En la parte final de la glaciación (Tardiglacial) entre 14.000 y 10.000 años, los glaciares continuaron en retroceso, se situaron siempre por encima de los 3.900 m. A pesar del retroceso general, las fluctuaciones menores de temperatura en ocasiones hicieron crecer levemente los glaciares. Entre 11.000 y 10.000 años la capa de hielo sufrió un fuerte retroceso y dejó depósitos detríticos (morrenas) entre 3.900 y 4.200 m. Este hecho marcó prácticamente el fin del período glacial y de la glaciación, y dio paso al interglacial.
- ♦ En el Holoceno o Interglacial actual, a partir de hace 10.000 años, la temperatura subió y los hielos se fundieron aún más, hasta cuando en una fecha aproximada hace 8.500 años la temperatura llegó a un máximo, ligeramente superior a la actual.
- ♦ Desde entonces y en términos generales, la temperatura comenzó a descender nuevamente y los discontinuos glaciares a recuperarse, es decir, que tuvieron avances y retrocesos menores.
- ♦ Uno de los avances más conocidos comenzó hacia el año 1650 (de nuestra era) como resultado de un enfriamiento que duró hasta 1850, aproximadamente. Durante este mínimo o Pequeña Edad Glaciar que ocurrió en toda la Tierra, los glaciares del Cocuy descendían en promedio hasta 4.400 m.

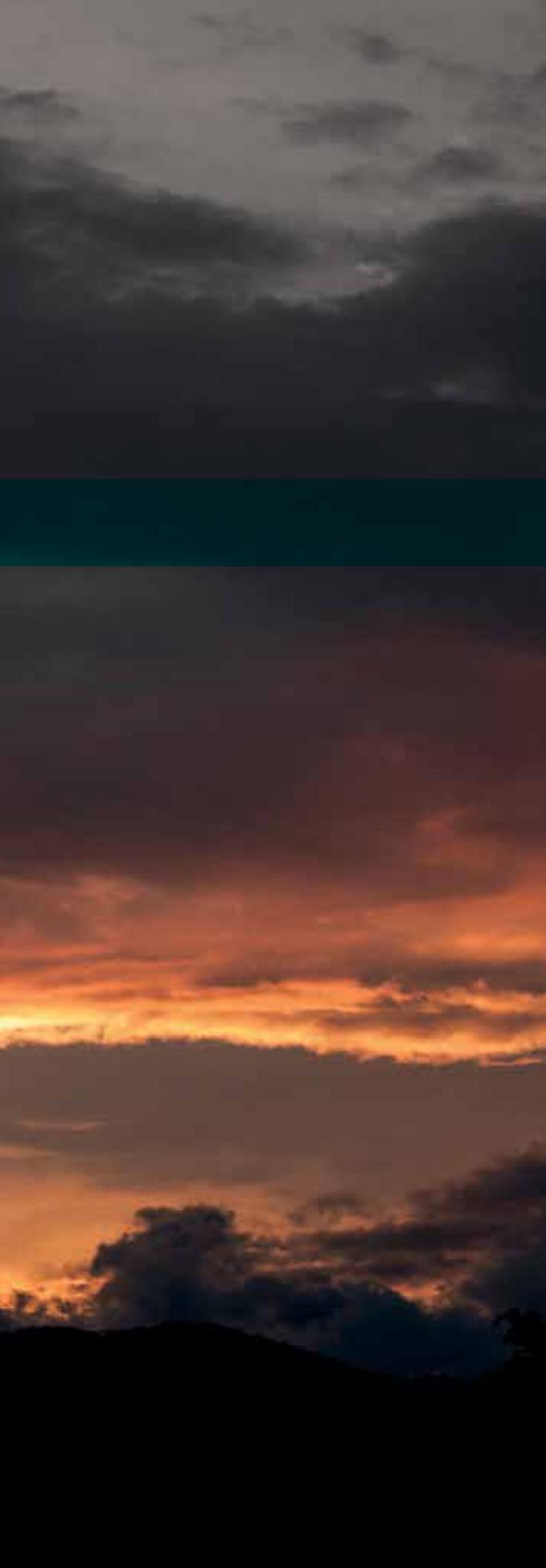
- ♦ La Pequeña Edad Glacial se debió a un mínimo de actividad de la corona solar y el calentamiento actual a un máximo; estas fases, por lo que se conoce actualmente, tienen un máximo de duración de unos 200 años.

En el Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático en Colombia para el año 2040 (Ideam *et al.*, 2017) muestra que las principales zonas de aumento de temperatura corresponden a la región Caribe y Pacífica, de igual forma, los valles interandinos podrán verse afectados por aumentos en la temperatura media anual. La Orinoquia colombiana podrá presentar aumentos elevados de temperatura, comparada con el actual. El escenario de precipitación identifica un aumento gradual en la región Andina; por el contrario, regiones como Caribe y Amazonia evidencian reducción en la precipitación para el período.





La adaptación de los ecosistemas - resiliencia



Las causas del colapso o fin de las sociedades antiguas (un ejemplo, los Mayas) están íntimamente relacionadas con el deterioro de su medio ambiente, como son, la deforestación y la destrucción del hábitat, el deterioro del suelo (erosión, salinización y pérdida de fertilidad del suelo), malos manejos del agua (escasez de agua, contaminación hídrica), la caza y la pesca excesivas, la introducción de especies que suelen ser invasoras, el crecimiento poblacional y las variaciones en el clima (períodos de sequía y de exceso de lluvia). En las sociedades actuales las causas de su colapso, además de las anteriores, se suman la acumulación de tóxicos que contaminan el medio ambiente y la escasez de energía por el alto consumo de los recursos energéticos a nivel mundial (Diamond, 2006).

Al estudiar la variabilidad climática y su interrelación con las actividades humanas es necesario tener claridad sobre algunos conceptos utilizados en la gestión del riesgo (FAO, 2012), como son:

Amenaza. Se refiere a la probabilidad de que ocurra un fenómeno que genera daños y pérdidas, que se presenta en un lugar específico, con cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos. El peligro puede ser de origen natural o inducido por una acción humana.

Vulnerabilidad. Está relacionada con la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas de sufrir daños por acción de una amenaza.

Riesgo. Es la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas como consecuencia de su condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro. El riesgo de desastres surge de la relación directa del peligro y las vulnerabilidades de un grupo social determinado y un lugar específico.

Desastre. Es el conjunto de daños y pérdidas en la salud, fuentes de sustento, hábitat físico, infraestructura, actividad económica y medio ambiente que ocurre como

consecuencia del impacto de un peligro cuya intensidad genera graves alteraciones en el funcionamiento de las unidades sociales, sobrepasando la capacidad de respuesta local para atender eficazmente sus consecuencias, pudiendo ser de origen natural o inducido por la acción humana.

Reducción de riesgos de desastres. Se relaciona con las prácticas para reducir el riesgo de desastres mediante el análisis y la gestión de los factores causales que incluye acciones para reducir el grado de exposición a los peligros, la fragilidad de la unidad social, y aumento del grado de resiliencia.

Resiliencia. Capacidad de las personas, familias, comunidades, entidades públicas y privadas, de las actividades económicas y las estructuras físicas, para asimilar, absorber, adaptarse, cambiar, resistir y recuperarse del impacto de un peligro, así como de incrementar su capacidad de aprendizaje y recuperación de los desastres pasados para protegerse mejor en el futuro.

Nicholls *et al.* (2013) definen la resiliencia como la capacidad de un sistema para mantener su estructura organizativa y productividad después de una perturbación; en otras palabras, es la capacidad del sistema de absorber los efectos de las crisis y la velocidad para recuperarse de ella. Un ecosistema

resiliente tiene la capacidad de resistir y reponerse de los impactos y perturbaciones. Un desarrollo resiliente se va adaptando a las condiciones ecológicas cambiantes y puede recuperarse de eventos climáticos extremos y condiciones ambientales adversas.

Cuando un sistema presenta una mejor resiliencia, tardará menor tiempo para regresar a la situación anterior a la crisis. En la Figura 69 el sistema A tendría una mejor resiliencia y su recuperación ante una crisis sería más rápida si se compara con los sistemas B, con una adaptación más lenta, y el sistema C que prácticamente no se recupera.

Los agroecosistemas tienen varios grados de resiliencia y de estabilidad, pero estos no están estrictamente determinados por factores de origen biótico o ambiental. Hay factores sociales, tales como una caída en los precios del mercado o cambios en la tenencia de las tierras que pueden deteriorar los sistemas agrícolas tan decisivamente como una sequía, las plagas y las enfermedades, o la disminución de los nutrientes en el suelo.

La capacidad de construir resiliencia en un agroecosistema depende del contexto sociocultural (nivel de organización, gobernabilidad, conocimiento tradicional) que lo nutre y de la capacidad de reaccionar,

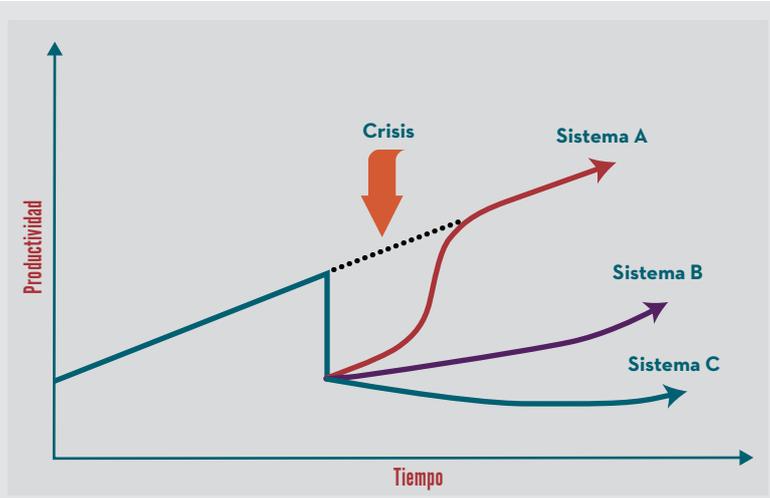


Figura 69.

Resiliencia. Recuperación de diferentes sistemas ante una crisis.

movilizarse y de adaptarse de los grupos humanos que los manejan. Un sistema socio-ecológico vulnerable es aquel que ha perdido su resiliencia, lo que a su vez implica una pérdida de la capacidad de responder y adaptarse. Los agroecosistemas son más vulnerables cuando los grupos humanos carecen de armonía social y su identidad cultural se ha erosionado.

Los agricultores no toman decisiones adaptativas solamente en respuesta a amenazas climáticas. De acuerdo con Altieri y Nicholls (2000), estas decisiones se hacen generalmente en respuesta a múltiples factores y se debe a que los riesgos climáticos ocurren dentro de un marco más amplio de condiciones e influencias: (a) Influencias socio-culturales: Dinámica y demografía de la comunidad, niveles de educación, salud, oportunidades e historia; (b) Influencias políticas y económicas: precios de productos e insumos, apoyo institucional (investigación, extensión, crédito, mercados, entre otros), políticas agrícolas; (c) Influencias ambientales: presión de plagas y enfermedades cuyas dinámicas cambian cuando el clima varía y otras; (d) Influencias tecnológicas: disponibilidad de biomasa, materia orgánica y semillas adaptadas (Figura 70).

Las estrategias para mejorar la resiliencia en una comunidad agrícola son diversas (Altieri y Nicholls, 2000):

Manejo de recursos naturales:

Suelo: recuperación de tierras degradadas, conservación de suelos, drenajes para evitar inundaciones.

Agua: recolectar agua, mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, riegos eficientes, recarga de agua subterránea.

Bosque: reforestación con especies nativas, agroforestería, quemas dirigidas, hornos eficientes y alternativas energéticas a la leña.

Prácticas agroecológicas:

Producción de cultivos: agroforestería, cultivos de cobertura, manejo orgánico del suelo, ajuste de calendarios de cultivo, variedades tolerantes.

Producción animal: rotación de pastoreo, selección de razas adaptadas, sistemas silvopastoriles, utilización de forrajes.

Las acciones de mitigación se dirigen en general al uso racional y protección de los recursos hídricos, a la adecuada planificación del ordenamiento territorial, a la investigación y perfeccionamiento de los sistemas agrícolas, a la conservación y protección de los recursos forestales, a la protección de la biodiversidad y la vida silvestre, y al aseguramiento de los sistemas de salud y de protección de los seres humanos. La adaptación constituye hoy una



máxima prioridad para los países en desarrollo, los que son doblemente vulnerables al cambio climático, tanto en sus efectos físicos como por la incapacidad tecnológica, técnica y financiera para acometer los estudios y acciones de adaptación con el fin de minimizar sus efectos³.

La productividad del suelo debe ser mantenida y mejorada en todo momento, para lo cual hay que tener en cuenta dos características fundamentales, sin las cuales el crecimiento de las plantas será limitado y la productividad de los suelos no será sostenible: a) Disponer de suficiente agua en el suelo, con óptimas proporciones de espacios de poros y sólidos, lo cual se logra mediante la retención de humedad por el suelo y la disminución de la evaporación; b) Mantener la porosidad del suelo y conservar la capacidad de autorecuperación biológica. Estas dos condiciones permiten mejorar la producción de los cultivos en las zonas donde la cantidad de lluvia es un factor limitante.

La erosión del suelo altera el ambiente de enraizamiento para el cultivo, para lo cual es necesario: proteger la superficie del suelo de las fuerzas perjudiciales de la lluvia y el viento, incrementar la infiltración del agua de lluvia, estimular la restauración biológica de capas superficiales recién expuestas y minimizar la desecación que daña las raíces y altera la actividad de los microorganismos.

Muchos agricultores siembran sus cultivos en arreglos agroforestales utilizando la cobertura de los árboles para proteger los cultivos contra fluctuaciones extremas en microclima y humedad del suelo. Al conservar y plantar árboles los agricultores ejercen influencia en el microclima, porque la cobertura forestal reduce la temperatura, la velocidad del viento, la evapotranspiración y protege los cultivos de la exposición directa al sol, así como del granizo y la lluvia. La presencia de árboles en las parcelas agroforestales constituye una estrategia clave para la mitigación de los efectos impredecibles debidos a las

variaciones microclimáticas, especialmente en sistemas de agricultura minifundista (Altieri & Nicholls, 2000).

Para alcanzar la adaptación de un cultivo a los efectos adversos originados por la variabilidad climática (Figura 71), la primera acción a realizar es atender las recomendaciones para tener el sistema productivo en sus mejores condiciones agronómicas en cuanto a variedades, nutrición y controles sanitarios, entre otras acciones. Un segundo y tercer nivel de adaptación a más largo plazo se realizaría con variedades tolerantes a condiciones adversas de clima e implementar acciones relacionadas con la agricultura por sitio, gestión del riesgo, transformación del uso del suelo y productos de servicios ecosistémicos (Howden *et al.*, 2010).

Con relación al cultivo del café el primer nivel de adaptación a las condiciones adversas del clima, ya sea por deficiencia de agua por efecto de El Niño o excesos de agua por La Niña, se logra con la implementación de las buenas prácticas agronómicas en el sistema de producción, entre ellas, la utilización de variedades de alta productividad, con resistencia a la roya, con altas densidades de siembra, con edades menores a siete años, sembradas en las mejores épocas de disponibilidad de agua, con una adecuada nutrición recomendada por el análisis de suelos, con manejos integrados de arvenses, de plagas y de enfermedades, y el uso de sombrío regulado donde lo requiera, entre otros (Figura 72).

Las acciones de mitigación y adaptación de las comunidades ante los efectos de la ocurrencia de El Niño y La Niña deben basarse en acciones que busquen el manejo del agua y la conservación de los suelos de la región y de los cultivos y ecosistemas. La adaptación al cambio climático y los sistemas agrícolas requiere de acciones para disminuir el efecto del exceso de agua (por lluvias frecuentes e intensas) o por deficiencia de agua (largos períodos de bajas lluvias).

³ <http://www.cridlac.org/index.shtml>

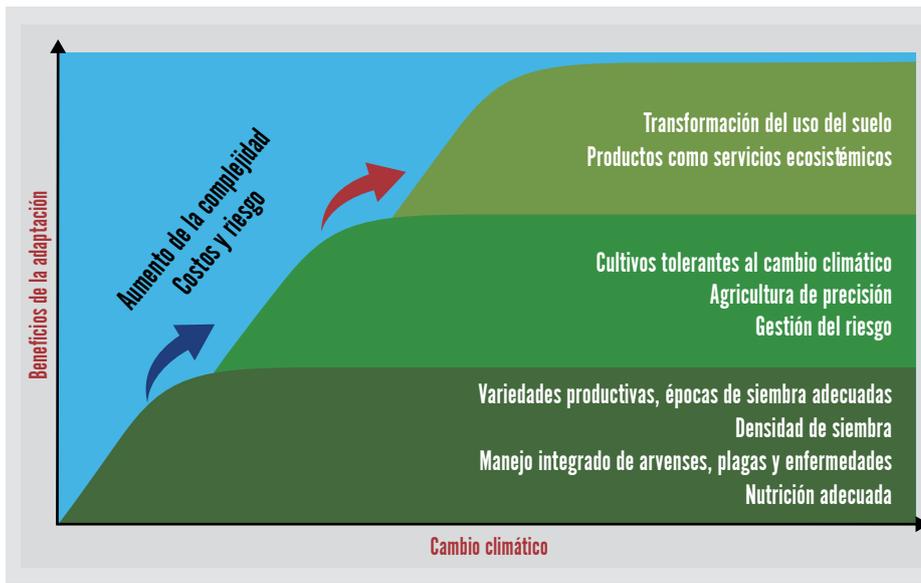


Figura 71. Gestión hacia una adaptación a la variabilidad y cambio climático (Howden *et al.*, 2010).

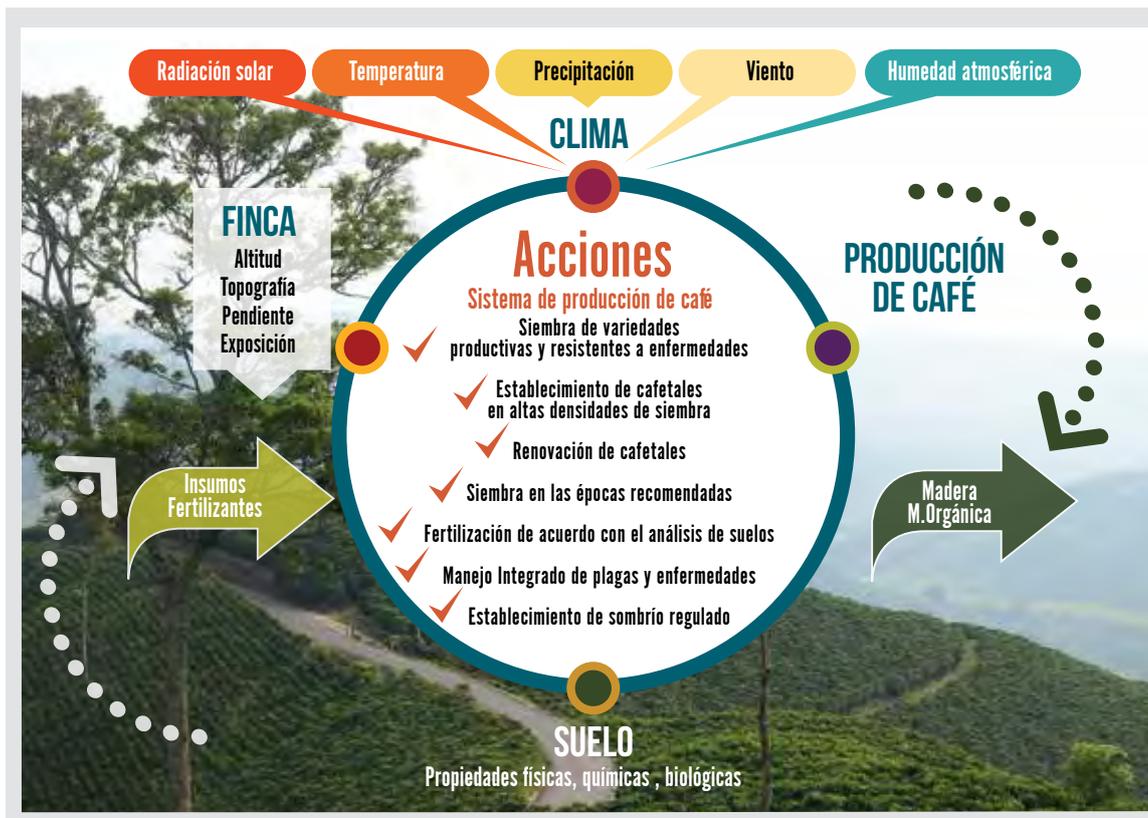


Figura 72. Acciones de adaptación de los sistemas de producción de café ante la variabilidad climática.



La agroclimatología del café



Un ecosistema se define como el complejo constituido por los organismos vivos y su ambiente, con relaciones funcionales complementarias dentro de límites seleccionados arbitrariamente, y sus constituyentes se mantienen en equilibrio dinámico en el tiempo y en el espacio (Odum, 1972; Odum *et al.*, 1988). Entre los elementos constitutivos de los ecosistemas se encuentran:

Sustancias inorgánicas, intervienen en los ciclos de materiales (carbono, nitrógeno, dióxido de carbono, agua).

Compuestos orgánicos, relacionan los componentes de origen biótico con los componentes no bióticos (proteínas, hidratos de carbono, lípidos y compuestos húmicos, entre otros).

Elementos climáticos, radiación solar, precipitación, temperatura, humedad atmosférica, viento.

Productores, organismos autótrofos, en su mayoría vegetales superiores capaces de realizar fotosíntesis.

Consumidores, organismos heterótrofos especialmente animales fitófagos o zoófagos que ingieren materia orgánica de diverso origen.

Desintegradores, organismos heterótrofos, fundamentalmente bacterias y hongos, que degradan los compuestos complejos producidos durante el metabolismo, absorben algunos de los productos de descomposición y liberan sustancias simples susceptibles de ser utilizadas por los productores. Las sustancias orgánicas absorbidas son fuentes de energía o pueden ser inhibitoras o estimulantes para algunos de los componentes vivos del ecosistema.

Los ecosistemas pueden analizarse apropiadamente desde el punto de vista funcional, de acuerdo con los intercambios energéticos, las cadenas alimenticias, la diversidad temporal y espacial, los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes, el desarrollo de la evolución y los mecanismos de regulación y control (Pidwirny, 2004). Entre las

características comunes a todos los sistemas pueden citarse:

- ♦ Todos los sistemas tienen alguna estructura.
- ♦ Los sistemas son generalizaciones abstractas de la realidad.
- ♦ Todos los sistemas funcionan en la misma dirección.
- ♦ En todos los sistemas ocurren relaciones funcionales y estructurales entre sus unidades.
- ♦ Las funciones de los sistemas implican el intercambio de materia o energía dentro del sistema o entre el ambiente y el sistema. Para que se desarrollen las funciones del sistema, se requiere de una fuente energética.
- ♦ Todos los sistemas muestran el mismo grado de integración.

En la Figura 73 se presentan los diferentes componentes fisiográficos, climáticos, edáficos, biológicos y económicos para un sistema de producción.

Desarrollo y crecimiento del café

Para el cultivo del café las disponibilidades de agua y energía de las regiones cafeteras y su interacción con los factores genéticos (por ejemplo, variedades de café), nutricionales y hormonales, determinan que el ritmo de desarrollo y crecimiento de los diferentes órganos y tejidos de la planta varíen en las distintas épocas del año (Arcila *et al.*, 2007).

En el café, en su fenología se presentan fases de desarrollo vegetativo y reproductivo:

Fase de desarrollo vegetativo del cafeto

En los cultivos anuales se considera como fase vegetativa el tiempo transcurrido desde

la germinación hasta la primera floración. En el caso de las especies perennes y arbustivas como el cafeto, la definición de la fase vegetativa es compleja, debido a que el crecimiento vegetativo, por ejemplo, la formación de nudos y hojas y la generación de nuevas raíces, ocurre durante toda la vida de la planta, y en la mayor parte del tiempo, ocurren simultáneamente con el crecimiento reproductivo.

De acuerdo con la planta de café en Colombia, el desarrollo vegetativo, es decir, la formación de raíces, ramas, nudos y hojas comprende tres etapas: germinación a transplante (2 meses), almácigo (5 - 6 meses) y siembra definitiva a primera floración (11 meses). Hasta este momento se considera la etapa vegetativa, y de ahí en adelante, las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo transcurren simultáneamente durante el resto de vida de la planta.

Fase de desarrollo reproductivo del cafeto

El desarrollo reproductivo del café comienza con la aparición de las primeras flores. El período de iniciación de esta fase puede estar influenciado por la duración del día (fotoperíodo), la época de siembra, la temperatura y la disponibilidad hídrica. Se considera como primera floración, el momento en el cual hayan florecido al menos el 50% de las plantas. La fase reproductiva continúa luego con el desarrollo del fruto y la maduración.

Simultaneidad de las fases vegetativa y reproductiva

Una vez que se ha completado el período desde la siembra hasta la primera floración, se considera una etapa exclusivamente vegetativa y de ahí en adelante, las fases de desarrollo vegetativo y reproductivo transcurren de manera simultánea durante la vida de la planta.

Fase de senescencia

El café es una planta perenne y alcanza su desarrollo y productividad máxima entre los 6 y los 8 años, a partir de los cuales se va deteriorando y su productividad disminuye. El ritmo de envejecimiento depende del clima de la región, la densidad de siembra, la intensidad de la producción, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de plagas y enfermedades, entre otros. Los órganos de la planta completan su ciclo de vida en épocas y edades diferentes, por ejemplo, la hoja tiene una duración promedio de 350 días, una rama primaria dura varios años y una flor abierta dura tres días.

El desarrollo vegetativo del café en Colombia muestra que en la zona cafetera central ocurre un mayor crecimiento del tallo y las ramas en los meses de marzo-abril y septiembre-octubre. También es importante anotar que en aquellas regiones donde hay períodos secos acentuados, el comportamiento del café está condicionado por la precipitación o por la humedad del suelo, mientras que, en las regiones con deficiencias hídricas en el suelo, el comportamiento del café está estrechamente relacionado con la disponibilidad de la radiación solar (Arcila *et al.*, 2007).

Condiciones ambientales para el cultivo del café

El café, *Coffea arabica* L., es originario de las regiones tropicales altas de Etiopía, situadas entre los 6° y 9° Norte, entre 1.600 y 2.000 m de altitud, con temperatura media anual entre 18°C y 20°C y precipitación media anual entre 1.500 y 1.800 mm, con una estación seca de 4 a 5 meses.

El café se cultiva latitudinalmente entre el Trópico de Cáncer (23,5° Norte) y el Trópico de Capricornio (23,5° Sur); fuera de estas latitudes el cultivo presenta limitaciones por la ocurrencia de heladas (Figura 74).

Requerimientos de fotoperíodo

El fotoperíodo se refiere a la duración diaria o tiempo relativo de los períodos de luz y oscuridad. La respuesta en el desarrollo de las plantas o de los organismos al fotoperíodo se denomina fotoperiodismo. En las plantas la diferenciación floral o inducción de la formación de botones florales depende del fotoperíodo: hay plantas que solamente producen flores cuando se presentan días cortos (menor de 12-14 h día⁻¹), otras las producen en días largos y otras no responden en su desarrollo a la duración del día.

Para la floración del café se requieren días cortos, con un fotoperíodo crítico de 13,5 horas de brillo solar astronómico (Camargo y



Figura 73. Componentes de un sistema de producción (Fassbender, 1987).

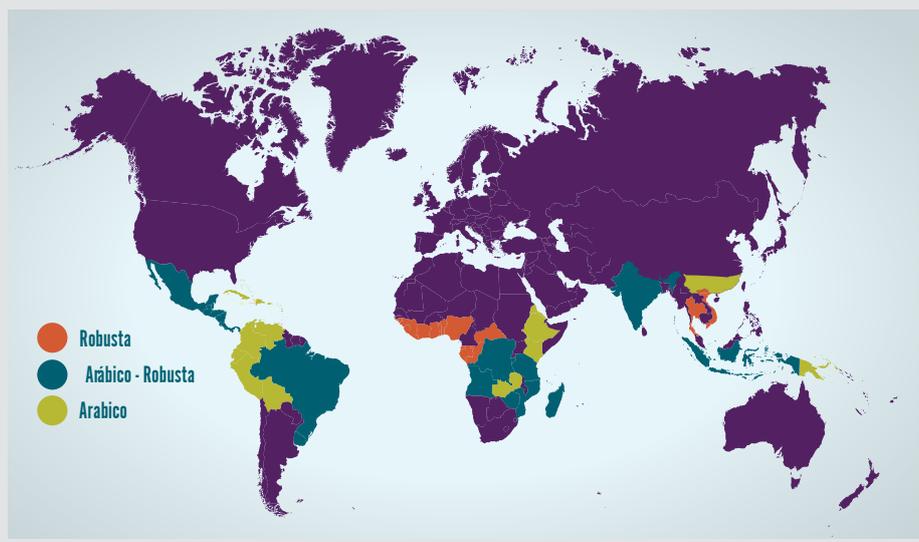


Figura 74.
Regiones de origen y zonas de cultivo del café.

Pereira, 1994), esto es, no hay diferenciación floral para duraciones del día superiores a este límite. Dentro del rango latitudinal de la zona cafetera de Colombia el fotoperíodo no es un factor limitante para el desarrollo del café, por presentar durante todo el año días con duración inferior a 13,0 h.

Requerimientos térmicos

El cultivo del café arábigo, *Coffea arabica* se encuentra en regiones con temperatura media entre 18°C y 22°C; el óptimo desarrollo y crecimiento se observa entre los 19°C y 21°C.

En Colombia los gradientes altitudinales varían de acuerdo con la cuenca hidrográfica donde se cultive el café, por lo cual el rango de temperatura óptima para el café se encuentra a diferentes altitudes (Figura 75).

El café robusta, *Coffea canephora*, es originario de las zonas bajas del Congo y Guinea y su desarrollo presenta un rango óptimo de temperatura entre 22°C y 28°C.

Para el cultivo del café arábigo se considera un rango térmico de adaptación entre 10°C (temperatura base inferior) y 32°C (temperatura base superior), y en este intervalo térmico se requieren alrededor de 3.250°C día⁻¹ de tiempo térmico acumulado para completar el desarrollo y

crecimiento desde la siembra y la primera floración, y se necesitan alrededor de 2.500°C día⁻¹ entre la primera floración y la primera cosecha, para un total de 5.750°C día⁻¹ acumulados para el período completo entre la siembra y la cosecha (Jaramillo y Guzmán, 1984).

Un efecto de la influencia de la temperatura se manifiesta en la duración de los estados fenológicos. En la Figura 76 se observa que para las zonas de cultivo de café en Colombia el número de días transcurridos entre la siembra y la cosecha está entre 500 y 600 días. La variación en el número de días transcurridos entre la siembra en el campo se estima en 37 días°C⁻¹.

En *Coffea arabica*, cuando la temperatura de aire es superior a 23°C y esta se presenta en un período seco en la época de floración se produce aborto floral y formación de flores "estrella", lo cual ocasiona una disminución de la producción. Las temperaturas inferiores a 18°C promueven el crecimiento vegetativo y reducen la diferenciación floral y en consecuencia baja productividad.

Requerimientos hídricos

Las zonas cafeteras de Colombia están localizadas en regiones con lluvia anual entre los 1.000 y los 4.800 mm.

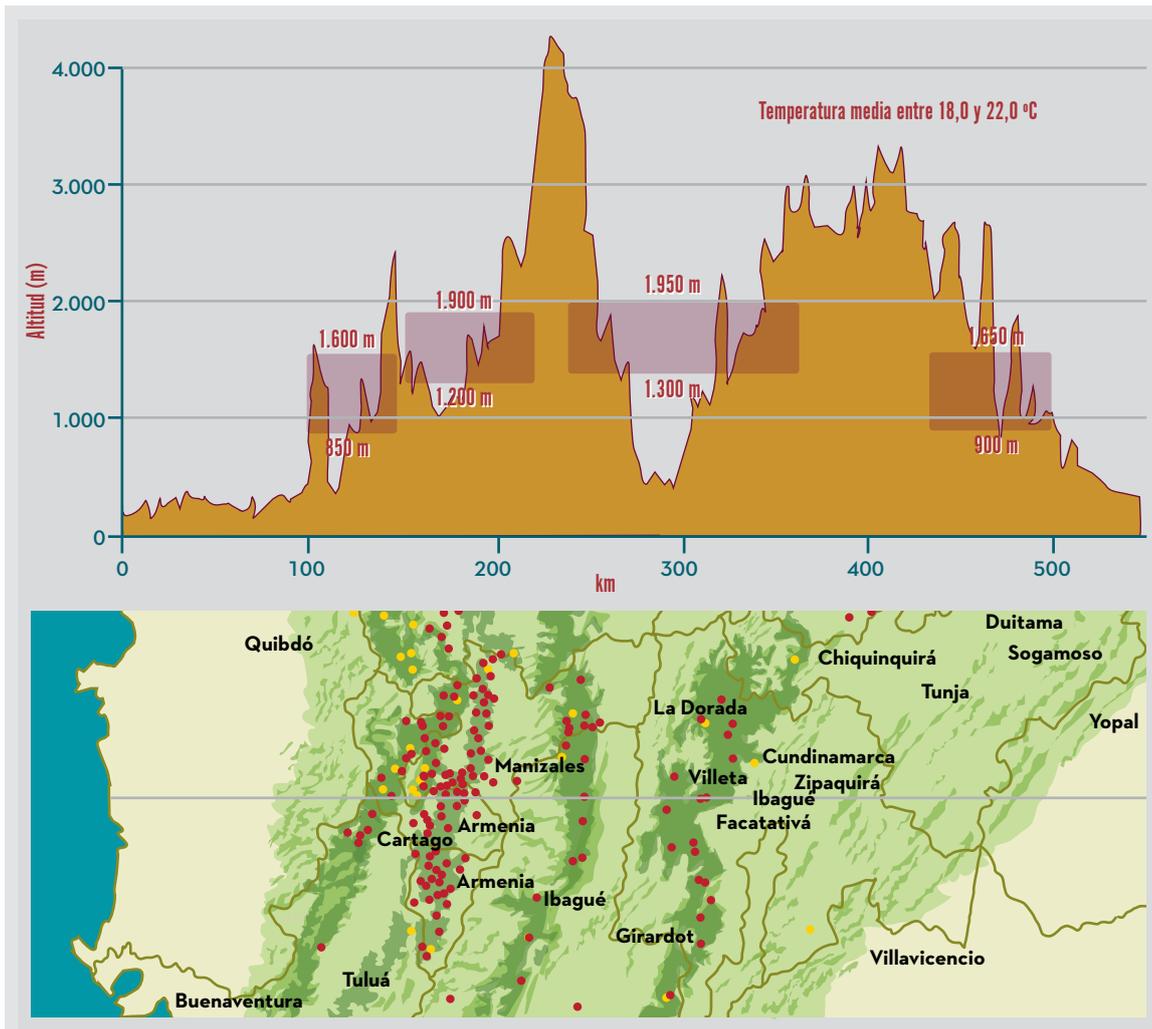


Figura 75. Rangos altitudinales para el cultivo del café en Colombia.

El consumo de agua de la planta de café está próximo a 125 mm por mes. Cuando se mantiene de manera constante un aporte hídrico inferior a este valor, disminuye el crecimiento y la producción de café (Blore 1966; Dagg 1971; Gutiérrez y Meinzer, 1994; Kumar, 1979). Como una observación general, se considera que en las regiones cafeteras de Colombia la evaporación diaria varía entre 3 y 4 mm, la ocurrencia de un período seco de 30 a 40 días consecutivos afectaría la producción, dependiendo de la altitud (Camargo y Pereira, 1994; Jaramillo, 2006).

Al analizar la Deficiencia Hídrica Anual (DHA) de muchas regiones cafeteras del mundo, se observa que las regiones con DHA inferiores

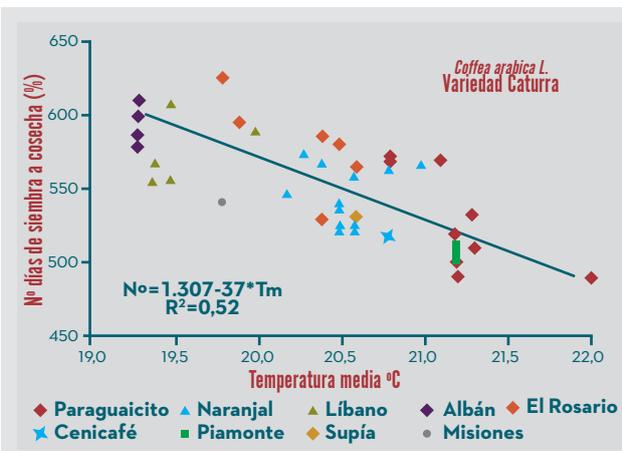


Figura 76. Variación del número de días de siembra a cosecha con la temperatura del aire (Jaramillo y Guzmán, 1984).



a 150 mm son aptas para el cultivo del café. Si en la región la DHA está entre 150 y 200 mm se considera zona marginal para el cultivo y para obtener alguna producción se requiere de riego suplementario. Se considera que las regiones que no son aptas para el cultivo son aquellas donde la DHA es superior a 200 mm, en estas zonas, de alta deficiencia el riego es absolutamente necesario (Camargo y Pereira, 1994).

En las etapas iniciales del cultivo, en su fase vegetativa, la evaporación es el principal componente, pero a medida que el follaje cubre la superficie del suelo, la transpiración se convierte en la mayor proporción de la evapotranspiración. En un cultivo completamente desarrollado, la transpiración es responsable de cerca del 90% del uso de agua por parte del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

El coeficiente de consumo de agua de un cultivo (K_c) se cuantifica mediante la relación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) medida en un evapotranspirómetro y la evapotranspiración de referencia (ET_o) calculada con la expresión de Penman-Monteith (Ecuación <73>).

$$K_c = ET_c / ET_o \text{ <73>}$$

Donde

K_c : coeficiente del cultivo (adimensional)

ET_c : evapotranspiración del cultivo (mm d⁻¹)

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹)

Para un cultivo del café de un año, Gutiérrez y Meinzer (1994), obtuvieron un K_c de 0,58, para cafetales de dos años o más valores entre 0,75 y 0,79. Arruda *et al.* (2000), encontraron coeficientes de cultivo (K_c) entre 0,73 e 0,75 en los primeros años y entre 0,87 y 0,93 a los siete y ocho años, respectivamente. Allen *et al.* (2006), proponen un K_c entre 0,90 y 0,95 para cafetales mayores de tres años, sin presencia de arvenses, y entre 1,05 y 1,10 en cafetales con arvenses.

Para el cultivo del café en Brasil, Pereira *et al.* (2011), presentan dos expresiones para

estimar los coeficientes de consumo del café (K_c) relacionadas con el índice de área foliar (L), como se presenta en la Figura 77.

Para índices de área foliar menores de 3,0
 $K_c = 0,33 L$

Para índices de área foliar entre 3,0 y 7,5
 $K_c = 1,8 L^{-0,5}$

En la Tabla 34 se hace un estimativo de las necesidades diarias de agua de un árbol de café para diferentes altitudes de la zona cafetera de Colombia. Se consideraron la evapotranspiración de referencia con Penman-Monteith a diferentes altitudes, para las fases vegetativa y reproductiva, en tres densidades de siembra.

De acuerdo con lo estimado, las cantidades de agua necesarias en 1 ha día⁻¹ para la fase vegetativa varían entre 19.000 L a 1.000 m de altitud y 15.000 L a los 2.000 m, y para la fase reproductiva se encuentran entre los 32.000 y 26.000 L para las mismas altitudes.

Períodos secos y húmedos en la zona cafetera de Colombia

Al cuantificar los componentes del balance hidrológico de las regiones cafeteras, es posible conocer la duración y la magnitud de los períodos secos y húmedos.

Los períodos de deficiencia de agua condicionan la dinámica de la floración en el café. La apertura floral (antesis) se induce al inicio de las lluvias después de un período seco.

En la zona cafetera de Colombia se presentan dos períodos importantes de floración (Figura 78): uno en agosto-septiembre-octubre, responsable por la cosecha de abril-mayo y junio; otro en enero-febrero-marzo, responsable por la cosecha de septiembre-octubre-noviembre. Para que la floración proceda normalmente es necesario que se

presenten períodos de estrés hídrico y alto brillo solar durante los meses de floración (Gómez, 1977; Suárez de Castro y Rodríguez, 1962; Trojer, 1954a, 1954b, 1968).

La forma más práctica de conocer la distribución de la floración y la cosecha en la zona cafetera (Arcila *et al.*, 2007), es considerar que las floraciones de mayo a octubre corresponden a la cosecha del primer semestre (enero a junio) y las floraciones que se presentan entre noviembre y de abril corresponden a la cosecha del segundo semestre del año (julio a diciembre). Esta consideración se basa en un tiempo entre floración y maduración del fruto de 32 semanas (224 días).

Etapas de desarrollo del fruto de café

El tiempo transcurrido entre floración y maduración del fruto es aproximadamente de 32 semanas (224 días) para las condiciones de Colombia. Durante este período el fruto pasa a través de diferentes estados del desarrollo (Figura 79).

En la Etapa I, entre la floración y los primeros 45 - 50 días (primeras 7 semanas), el crecimiento del fruto es casi imperceptible; durante la Etapa II, de los 50 a los 120 días (semanas 7 a 17) el fruto crece en forma acelerada, la semilla se desarrolla y adquiere el tamaño final; en la Etapa III, de los 120 a los 180 días (semanas 18 a 26), la almendra adquiere su

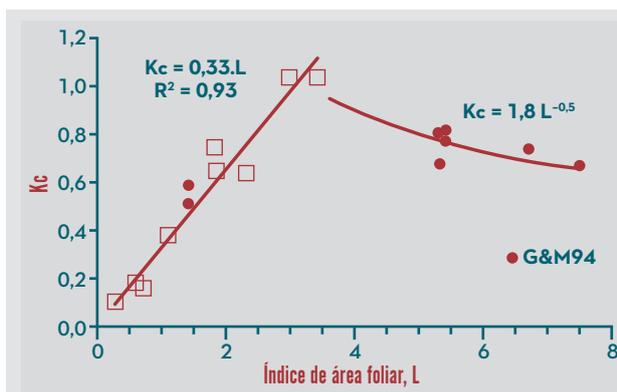


Figura 77. Relación entre el coeficiente de cultivo (K_c) y el Índice de área foliar para café (Pereira *et al.*, 2011).

consistencia sólida; en la Etapa IV, de los 180 a los 224 días (semanas 26 a 32), el fruto ya está fisiológicamente desarrollado y tiene lugar la maduración (Arcila *et al.*, 1993; Arcila y Jaramillo, 2003; Salazar *et al.*, 1994).

El aporte hídrico es fundamental en todas las etapas del desarrollo del cafeto. Sin embargo, en algunas de las etapas del desarrollo, este aporte es crítico: por ejemplo, si ocurre una deficiencia hídrica en el suelo entre las semanas seis y diez (1,5 a 2,5 meses) después de la floración, se produce la desecación y caída de los frutos tiernos. Si la deficiencia hídrica ocurre entre las semanas trece y diecisiete (3,5 a 4,5 meses), después de la floración, se produce llenado parcial de los frutos o se forma el grano negro (Arcila y Jaramillo, 2003; Valencia, 1973).

Tabla 34.

Consumo de agua del café ($L \text{ día}^{-1}$ por árbol). Cantidades estimadas para la zona cafetera de Colombia.

Altitud (m)	Eto (mm día^{-1})	Fase vegetativa ($K_c=0,5$)			Fase reproductiva ($K_c=0,85$)		
		1,0 x 1,0m	1,5 x 1,5m	2,0 x 1,0m	1,0 x 1,0m	1,5 x 1,5m	2,0 x 1,0m
1.000	3,8	1,9	4,3	3,8	3,2	7,2	6,4
1.250	3,6	1,8	4,1	3,6	3,1	7,0	6,2
1.500	3,4	1,7	3,8	3,4	2,9	6,5	5,8
1.750	3,2	1,6	3,6	3,2	2,7	6,1	5,4
2.000	3,1	1,5	3,4	3,0	2,6	5,9	5,2

Evapotranspiración del cultivo = Coeficiente de consumo x Evapotranspiración de referencia x distancia de siembra

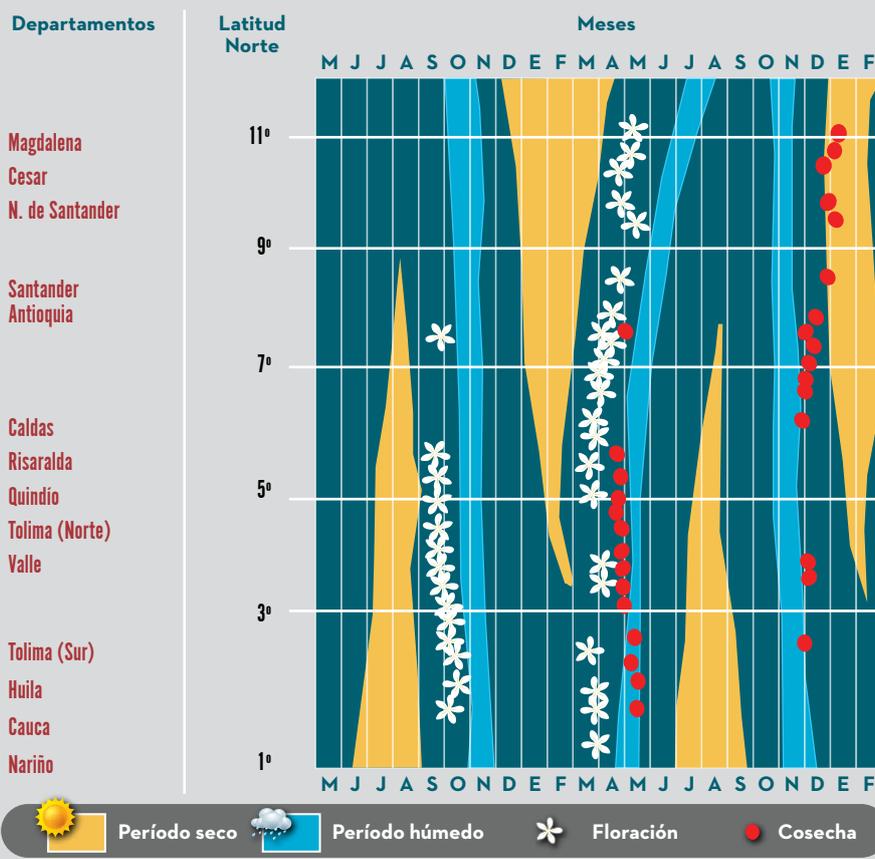


Figura 78. Épocas de floración del café en Colombia y su relación con los períodos secos y húmedos (Trojer, 1954a).

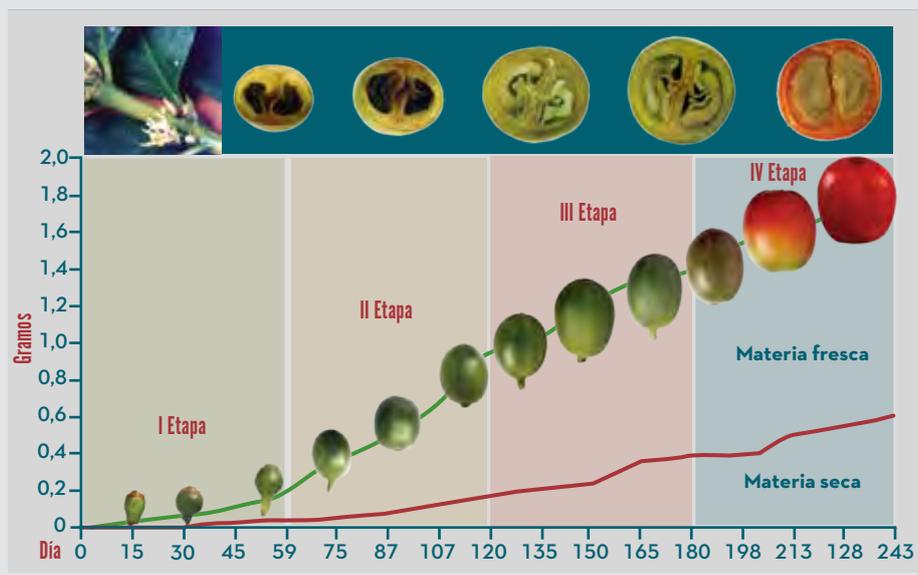


Figura 79. Crecimiento del fruto del café (*Coffea arabica* L.) y sus daños por deficiencia de agua (Arcila *et al.*, 1993; Salazar *et al.*, 1994; Arcila y Jaramillo, 2003).

La magnitud de los daños en la cosecha de café depende de los daños provocados por la deficiencia hídrica durante la floración y durante la etapa de llenado de los granos, que es crítica para la formación del fruto.

Los daños en los frutos de café por efecto de una deficiencia hídrica pueden clasificarse en (Arcila y Jaramillo, 2003), así:

- ♦ Granos flotantes (vacíos): uno o ambos lóculos del fruto aparecen vacíos sin alguna formación de endospermo. Estos granos al beneficiarse producen el defecto “espuma” o “pasilla”.
- ♦ Granos parcialmente formados: uno o ambos lóculos del fruto presentan formación parcial del endospermo, sin que llegue al llenado completo. Estos granos alcanzan a madurar y producen el defecto de “averanado”.
- ♦ Grano negro: frutos en un estado de desarrollo muy avanzado con una ligera tonalidad amarillenta y que al partirlos muestran una o ambas almendras desarrolladas de un color café oscuro, casi negro. Estos granos al beneficiarlos producen el defecto “espuma” o “pasilla”.
- ♦ Granos pequeños: el fruto se desarrolla, pero adquiere un tamaño final inferior al normal.

En la Tabla 35 y las Figuras 80 y 81, se presentan las épocas de cosecha en las

diferentes regiones de Colombia, la distribución porcentual por regiones (Bedoya *et al.*, 1997) y en el transcurso del año (Alvarado y Moreno, 1999; Castillo y Moreno, 1988).

En la Zona Cafetera Norte (mayor de 7° latitud Norte) y en la vertiente Oriental de la cordillera Oriental, la recolección de la cosecha de café se realiza en un 90% entre noviembre a enero.

En la Zona Cafetera Central Norte (4° a 7° latitud Norte), más húmeda, entre un 75% y 85% de la cosecha de café se recolecta en septiembre - diciembre y un 15%-25% entre abril y junio.

En la Zona Cafetera Central Sur (3° a 4° latitud Norte) menos húmeda, la recolección de la cosecha es de un 40% entre abril-junio y un 60% entre septiembre y diciembre.

En la Zona Cafetera Sur (menos de 3° latitud Norte), un 90% de la cosecha se recolecta entre abril y junio.

En las zonas cafeteras de mayor altitud, por encima de 1.700 m, la cosecha de café se distribuye en ambos semestres y tiende a generar floraciones y cosechas más dispersas.

Estos patrones en la distribución de la floración y la cosecha del café pueden adelantarse o retrasarse en los años de ocurrencia del evento cálido de El Niño o el evento frío de La Niña.

La distribución anual de la cosecha es de interés económico en el cultivo del café. Una

Tabla 35.
Distribución de la cosecha de café (%) en Colombia (Bedoya *et al.*, 1997).

Departamento	Semestre I	Semestre II
Cundinamarca, Nariño	81% – 93%	9% – 17%
Cundinamarca, Cauca, Tolima, Huila, Quindío, Valle	65% – 79%	21% – 39%
Tolima, Huila, Cauca, Valle, Boyacá, Cundinamarca	41% – 61%	39% – 53%
Risaralda, Valle, Quindío, Caldas, Tolima	40% – 42%	58% – 60%
Norte de Santander, Valle, Caldas, Risaralda, Antioquia	30% – 37%	63% -73%
Caldas, Risaralda, Antioquia, Valle, Norte de Santander, Santander, Boyacá, Huila	16% – 27%	73% – 84%
La Guajira Cesar, Norte de Santander, Antioquia, Santander, Magdalena	3% – 12%	88% – 97%



MAPA DE COSECHAS

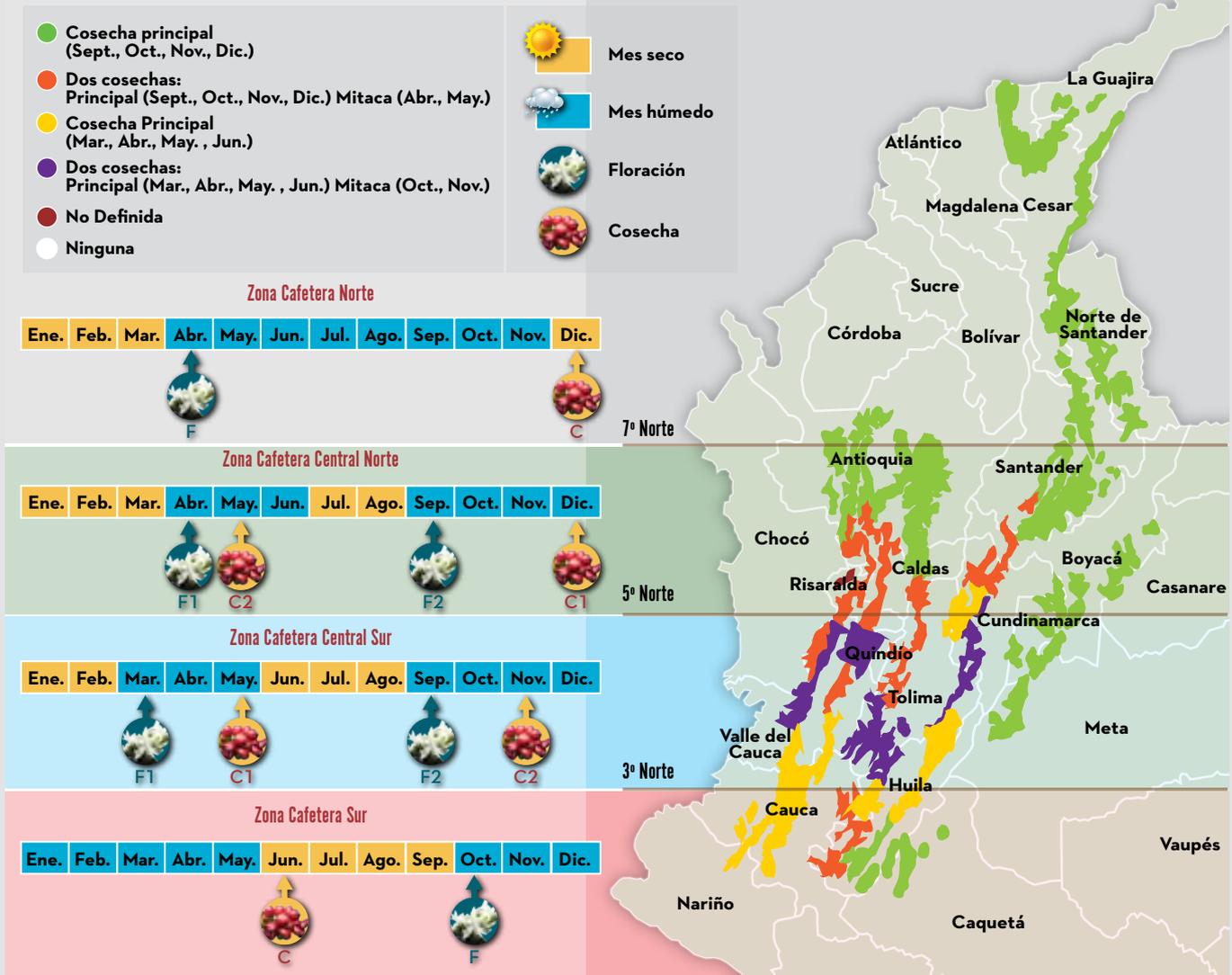


Figura 80. Distribución de la lluvia y las épocas de floración del café en Colombia.

producción concentrada reduce los costos de recolección y procesamiento del grano, permitiendo un uso más intenso y eficiente de la mano de obra y de los equipos.

Se observa que para la zona cafetera de Colombia las condiciones de distribución de la cosecha permiten tener disponibilidad de café verde para exportación durante todo el año.

El Niño y sus efectos sobre el cultivo del café

Para conocer los efectos de El Niño sobre el cultivo del café en la Figura 82 se presentan las condiciones que ocurrieron durante el evento de El Niño 1997-1998 (muy fuerte), en Cenicafé,

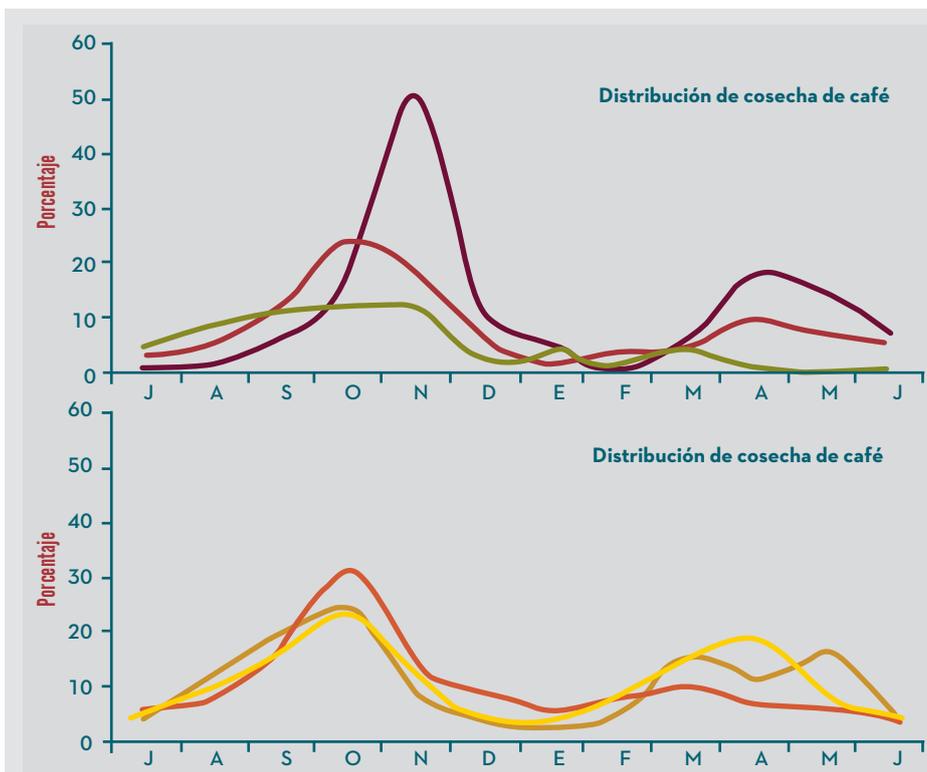


Figura 81. Distribución anual de la cosecha de café en estaciones experimentales de Cenicafé (Alvarado y Moreno, 1999; Castillo y Moreno, 1988).

Manizales-Caldas, y su comportamiento en distintas coberturas: en un bosque, en un cafetal bajo sombrío de guamo (*Inga spp.*) y en un cafetal a libre exposición solar.

Al inicio de El Niño, se presentó una disminución de las lluvias, que originaron un corto período seco a mediados del año (julio-agosto), posteriormente se observó una recuperación de la humedad del suelo por las lluvias asociadas a la presencia de la Zona de Confluencia Intertropical en los meses de octubre y noviembre, y después se presentó un período con deficiencia de agua más intenso y de mayor duración, que ocurrió entre diciembre y abril, este último período causó el mayor efecto sobre el normal desarrollo del fruto y las condiciones de producción del cultivo del café. En el bosque y en el cafetal bajo sombrío de guamo no se presentaron deficiencias de agua en el suelo, asociadas a una mejor retención de humedad en el suelo.

La cobertura vegetal, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y otros factores,

influyen en la dinámica del agua en el suelo y, por consiguiente, en la atenuación o aumento de los efectos.

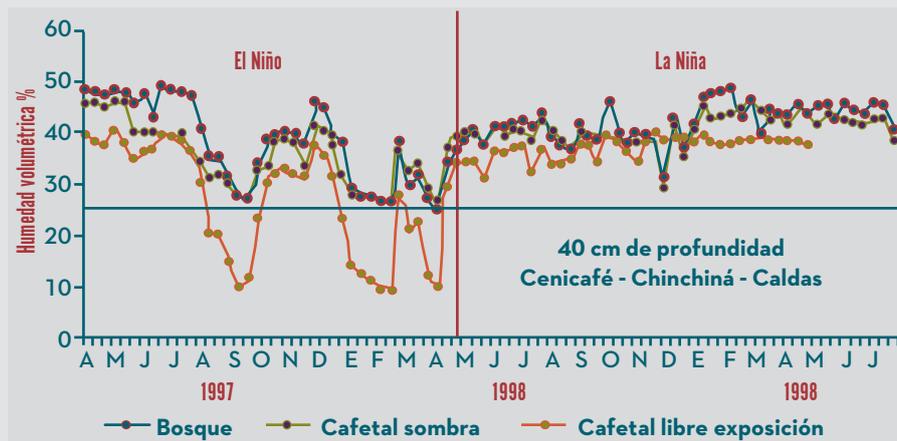
La conservación de la vegetación en los nacimientos de agua y el sombrío tienen un efecto notorio en la conservación del agua, especialmente en los períodos muy largos de falta de lluvia y en aquellas regiones con lluvia anual menor a los 1.500 mm, con alta evaporación y con suelos de baja retención de humedad.

La fertilización debe realizarse cuando se generalicen las lluvias en la región (Sadeghian y Jaramillo 2017; Sadeghian, Jaramillo y Duque, 2017).

Es necesario revisar periódicamente los cafetales para la evaluación de la incidencia de broca (*Hypothenemus hampei*), roya (*Hemileia vastatrix*), minador de la hoja (*Leucoptera coffeellum*) y arañita roja (*Oligonychus yothersi*). Con base en los niveles de daño económico el caficultor, en

Figura 82.

Variación de la humedad volumétrica del suelo (%), en un bosque, en un cafetal bajo sombra de guamo (*Inga spp.*) y en un cafetal libre exposición solar, durante El Niño fuerte de 1997/98. Cenicafé-Manizales-Caldas.



compañía del Extensionista de la Federación, debe programar el manejo integrado para el control del insecto plaga o la enfermedad.

Se debe buscar disminuir el consumo de agua durante el proceso de beneficio del café. Además, es necesario reforzar las medidas de control de las pasillas y granos flotantes para preservar la calidad del grano.

Cuando las deficiencias de humedad en el suelo son severas, se afecta el desarrollo vegetativo y reproductivo de la planta. Es así como, mientras la floración puede ser favorecida, el desarrollo de hojas, de ramas y frutos puede resultar perjudicado. Al final de los períodos secos se acentúa la senescencia y se acelera la defoliación de las plantas (Figura 83).

La Niña y sus efectos sobre el cultivo del café

Debido a los aumentos en las cantidades de lluvia que se presentan en la zona cafetera de Colombia durante La Niña, los suelos tienden a presentar condiciones de sobresaturación, creando un medio desfavorable para el desarrollo del café, formándose un sistema radical limitado que se refleja en un crecimiento débil de la parte aérea, con amarillamiento de hojas, síntomas de deficiencias nutricionales,

alta incidencia de mancha de hierro en hojas y frutos, desarrollo deficiente de brotes, defoliación, secamiento de ramas y frutos (*paloteo*), baja producción y calidad de los frutos y hasta la muerte de la planta. Los daños dependen de las condiciones físicas del suelo relacionadas con el mal drenaje y poca aireación, por lo cual se recomienda realizar prácticas de drenaje en los cafetales. En el cafeto la menor disponibilidad de brillo solar y la menor temperatura originan una disminución en el crecimiento vegetativo y reproductivo.

La floración del cafeto es un evento asociado estrechamente con las condiciones climáticas de cada región. Cuando las flores alcanzan el estado de “comino” se mantienen en un período de reposo que puede durar varias semanas.

Para que se termine este período de reposo y ocurra la floración, además de la madurez apropiada de los “cominos”, se necesita de un estrés proporcionado por períodos secos de mediana a larga duración, y que además este período seco sea interrumpido por una lluvia o cambios bruscos de temperatura.

Los períodos de exceso de lluvia durante las épocas de mayor floración ocasionan que los botones florales (*cominos*) permanezcan en reposo durante un tiempo más largo y que, en consecuencia, las floraciones sean dispersas, muy poco concentradas, de poca magnitud o que se presenten anomalías

DEFICIENCIA DEL AGUA EN EL CAFÉ



Figura 83.
Efectos de la deficiencia de agua en el cultivo del café.

en el desarrollo de la flor, como es el caso de las “flores estrellas” o el secamiento de los botones florales (Arcila *et al.*, 2007).

Las condiciones microclimáticas en el cafeto juegan un papel importante en el secamiento de los “cominos”. Las temperaturas elevadas, la alta disponibilidad de agua y buen suministro de nitrógeno favorecen un desarrollo acelerado de las plantas, las cuales a los dos años tienen gran cantidad de follaje que conserva una alta humedad en el interior del árbol en épocas de lluvia. Las condiciones de alta humedad,

menor temperatura y la baja luminosidad favorecen el incremento de poblaciones de hongos que normalmente no son patogénicos para el cafeto. Si las altas poblaciones del hongo coinciden con la presencia de yemas florales en desarrollo, estos pueden establecerse en ellas y causar el secamiento de las yemas (Arcila *et al.*, 2007). Es de aclarar que las anomalías descritas generalmente son de carácter temporal y no generalizado, y se restringen a zonas muy específicas. En la Figura 84 se presentan los efectos del exceso de agua en el cultivo del café.

EXCESO DE AGUA EN EL CAFÉ



Figura 84.
Efectos del exceso de agua en el cultivo del café.

Los conocimientos actuales sobre El Niño y La Niña permiten conocer con mucha confiabilidad las condiciones climáticas que predominarán en el semestre siguiente, para planificar con anterioridad las prácticas de adaptación a realizar en el cultivo para contrarrestar los efectos negativos de estos eventos.

Una buena guía para las acciones a seguir en la caficultura en las diferentes regiones cafeteras de Colombia se encuentra en la Plataforma Agroclimática Cafetera de Cenicafé

<http://agroclima.cenicafe.org> y en el Boletín Agrometeorológico Cafetero

<http://agroclima.cenicafe.org/boletin-agrometeorologico>

Para un seguimiento de las condiciones climáticas a nivel nacional e internacional pueden consultarse las páginas:

<http://www.ideam.gov.co>

<http://iri.columbia.edu>

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

<http://www.ciifen-int.org>

<http://portal.iri.columbia.edu>

Épocas de siembra del café en Colombia

La cantidad de lluvia y su distribución en de una región determinan la magnitud y la duración los períodos secos y húmedos, estos condicionan la dinámica del crecimiento vegetativo y reproductivo del cafeto, las épocas del año con mayor o menor crecimiento, la concentración de las floraciones, el desarrollo del fruto y la cosecha.

La distribución regional de la lluvia es la base para la toma de decisiones, por ejemplo, cuál es el momento oportuno para sembrar el cafetal con el menor riesgo de pérdida, la planificación y el tipo de prácticas agronómicas a desarrollar, la utilización o no de sistemas agroforestales transitorios

o permanentes, las épocas de fertilización, el manejo de arvenses y los controles fitosanitarios, entre otros.

En los cafetales recién sembrados es frecuente observar el retraso en el crecimiento del cultivo o hasta la muerte de las plantas en el campo, debido a la deficiencia de agua en los meses posteriores a la siembra; esta situación se vuelve más crítica durante los eventos de El Niño, por disminución de la cantidad de lluvia y por la mayor duración de los períodos secos. Cuando se siembra en el período recomendado se evitan las pérdidas para el caficultor.

Los meses recomendados para la siembra del café son al inicio del período de lluvias de la región, lo cual garantiza que el suelo tenga las condiciones de humedad adecuadas para el crecimiento de cafeto y con suficiente duración para asegurar el establecimiento de las plantas en el campo (Tabla 36).

La semilla para los germinadores y almácigos de café debe estar disponible entre seis y ocho meses antes del trasplante definitivo en el campo; de este período, dos meses corresponden a la etapa del germinador y cuatro a seis meses a la etapa de almácigo, dependiendo del tamaño de bolsa utilizada. En zonas cafeteras con temperatura media inferior a 19°C la semilla debe estar en el germinador ocho a diez meses antes.

Cuando se presenta un evento de El Niño en la zona cafetera, se disminuye la cantidad de lluvia en el período húmedo y se acentúa la magnitud y la duración del período seco, con aumentos de la temperatura y de la radiación solar; estas condiciones por lo general se presentan durante el período activo de El Niño, que normalmente tiene una duración de un año, desde el inicio en mayo-junio hasta junio a julio del año siguiente.

Durante la mayor actividad de El Niño, especialmente para eventos de carácter moderado a fuerte, resulta de alto riesgo la siembra del café por muerte de las plantas en el campo.

Tabla 36.

Meses recomendados para el inicio del establecimiento del germinador, el almácigo y la siembra del café en Colombia (Jaramillo, 2016).

Departamento	Germinador Dos meses antes del almácigo	Almácigo Seis meses antes de la siembra	Siembra en el campo
Antioquia	Agosto - Enero	Octubre - Marzo	Abril - Septiembre
Boyacá	Agosto	Octubre	Abril
Caldas	Agosto- Enero	Octubre - Marzo	Marzo - Septiembre
Cauca	Febrero	Abril	Octubre
Cesar	Agosto	Octubre	Abril
Cundinamarca	Agosto - Febrero	Octubre - Abril	Marzo - Octubre
La Guajira	Septiembre	Noviembre	Mayo
Huila	Febrero - Agosto	Abril - Octubre	Octubre - Abril
Magdalena	Agosto	Octubre	Abril
Nariño	Febrero	Abril	Octubre
Norte de Santander	Agosto	Octubre	Abril
Quindío	Julio - Febrero	Septiembre - Abril	Marzo - Octubre
Risaralda	Julio - Febrero	Septiembre - Abril	Marzo - Octubre
Santander	Agosto	Octubre	Abril
Tolima	Julio - Febrero	Septiembre - Abril	Marzo - Octubre
Valle del Cauca	Julio - Febrero	Septiembre - Abril	Marzo - Octubre
Arauca-Casanare-Meta-Caquetá-Putumayo	Agosto	Octubre	Abril

En regiones secas, con baja precipitación (menos de 1.500 mm año⁻¹) o durante los eventos de El Niño, se recomienda utilizar sombrío transitorio en los lotes donde se va a establecer el café, sembrando leguminosas como tefrosia (*Tephrosia purpurea*), guandul (*Cajanus cajan*) y leucaena (*Leucaena leucocephala*).

El sombrío en los cafetales

Los cafetales en Colombia se cultivaban inicialmente bajo sombrío de árboles de diversas especies, como el guamo (*Inga* spp), nogal cafetero (*Cordia alliodora*), cedro (*Cedrela* sp) y otras.

El efecto de los árboles de sombra sobre el balance hídrico de las plantaciones de café es complejo, pero relativamente bien

documentado. Se ha comprobado que la transpiración total del sistema de producción considerado de manera integral es mayor con presencia de árboles de sombra: los árboles transpiran más agua de lo que la sombra permite ahorrar a los cafetos. Sin embargo, hay una diferencia en las profundidades de extracción del agua del suelo por parte de los cafetos y los árboles de sombra, lo que reduce la competencia por el agua en el sistema agroforestal. La sombra claramente reduce la evaporación del suelo, debido a la intercepción de luz solar y a la presencia de un mantillo producido por los árboles que protege el suelo (Montagnini *et al.*, 2015).

Se considera como un límite de deficiencia hídrica para el café una cantidad de 150 mm acumulados en tres meses continuos, asociada a unos altos niveles de radiación solar, condiciones en las cuales se recomienda establecer los cafetales con árboles de sombrío.

El sombrío es recomendable si el relieve es quebrado con pendientes fuertes (>50%), con suelos susceptibles a la erosión, suelos poco profundos y poco estructurados, con bajos contenidos de materia orgánica y baja fertilidad natural, suelos con mal drenaje, con baja permeabilidad y baja retención de humedad. Se ha establecido que, dependiendo de la localidad, el nivel de sombrío óptimo bajo estas condiciones fluctúa entre 35% y 45%, cuando se emplea una sola especie de árbol y con regulación permanente de la sombra (Farfán y Jaramillo, 2009).

El uso del sombrío presenta una serie de ventajas de acuerdo con el tipo de suelo y la altitud, como son: La reducción de la radiación solar incidente directa sobre el cultivo; la disminución de las temperaturas extremas del aire durante el día; la reducción de las tasas de evapotranspiración; la conservación de los suelos; la protección contra los efectos de los vientos fuertes, del granizo y de la sequía; el reciclaje de los nutrientes mediante la descomposición de la materia orgánica; la reducción de las poblaciones de arvenses debido a la competencia por luz.

Según Beer *et al.* (1998), el sombrío en los cafetales como práctica de cultivo no siempre es benéfica y la decisión acerca de su utilización depende de diversos factores (Figura 85):

- ♦ En regiones que presenten suelos con buena disponibilidad de agua y adecuada retención de humedad, el uso del sombrío en los cafetales favorece la producción en las altitudes altas y bajas; en las zonas bajas modera la temperatura y en las altas regula los extremos térmicos y evita los daños por viento y granizo. En estas zonas se presenta una faja de altitud en la cual la utilización del sombrío disminuye la producción en los cafetales (Figura 85A).
- ♦ Cuando en una región ocurre una baja disponibilidad de agua durante el año

por la inadecuada distribución de la lluvia o tiene suelos con baja retención de humedad y con limitaciones físicas, se necesita el sombrío en todas las altitudes. El sombrío mejora las condiciones de microclima para el cultivo del café e incrementa la producción en todas las altitudes, aunque la producción sea inferior a la obtenida en zonas con condiciones de clima y suelo óptimos (Figura 85B).

La proporción de cobertura de los árboles de sombrío está sujeta a los diversos factores edáficos y climáticos, especialmente al brillo solar. Si se tiene en cuenta que el sombrío para un cafetal, sin que disminuya su producción, debe tener una cobertura máxima del 45% y que los componentes del sombrío se relacionan con la suma de un sombrío natural debido a la nubosidad de la región y a un sombrío de los árboles, en la Figura 86 se presenta para la zona cafetera de Colombia el porcentaje de sombra ajustado con el brillo solar anual (horas). La máxima cobertura para el café (45%) se establecería para una región con un brillo solar de 2.300 haño⁻¹.

El efecto del viento en el café

En el café los vientos con velocidades superiores a 2,0 m s⁻¹ tienen efectos adversos sobre la altura, el alargamiento de los entrenudos, el número de ramas plagiotrópicas, el peso seco de la planta y el área foliar. Los vientos con velocidades superiores a 3,0 m s⁻¹, producen daño mecánico en las plantas (Caramori *et al.*, 1986).

En las regiones altas, este efecto favorece la incidencia de la enfermedad conocida como “muerte descendente” (*Phoma* sp). El sombrío temporal de tefrosia y los cultivos transitorios cumplen una función de barrera rompevientos, que busca reducir el impacto no solo del viento sino también de la lluvia y la temperatura, como principales agentes dispersores de hongos (Menza y Peláez, 2015).

Efecto del granizo en el café

(Valencia y Arcila, 1976; Arcila y Leguizamón, 1988; Arcila y Jaramillo, 2010)

Los daños ocasionados por una granizada dependen del tamaño del granizo, de la intensidad y la duración del evento, del estado de desarrollo de la plantación y órganos de la planta afectados, de la densidad de siembra y de la presencia de algún tipo de cobertura sobre el cafetal.

En el cultivo del café el impacto del granizo provoca magulladuras y descortezamiento del tallo y las ramas, o su ruptura terminal, el desprendimiento o perforación de las hojas y el desgarre del limbo, el desprendimiento de las yemas florales en estado de comino, el desgarre de la cáscara en los frutos (epicarpio) y el desprendimiento de frutos de todas las edades. El daño es más severo en lotes de plantas jóvenes.

El daño del granizo sobre el fruto del café depende de la edad. Los frutos entre 1 y 5 semanas después de fecundados se deterioran totalmente por el ennegrecimiento interno; los frutos afectados que tienen entre 7 y 17 semanas después de la floración se rompen y tienen apariencia de granos negros, la mayoría se secan y caen luego de 15 días; en los frutos con edad de 20 semanas o más, solamente se ennegrece la cáscara al ser golpeados por el granizo. En todos los frutos lesionados por el granizo se presenta necrosis de los tejidos en la almendra, el daño es irreversible y se deteriora la calidad del grano.

Cualquier recomendación de daño por granizo en un cafetal debe estar soportada en una evaluación previa del tipo de daño ocasionado, de acuerdo con el estado de desarrollo del cultivo en el momento de ocurrencia de la granizada. Esta evaluación debe realizarse a los 10 y 15 días después de ocurrida la granizada.

En el caso de almácigos de café, si el daño es muy severo, con quemazón, excesiva

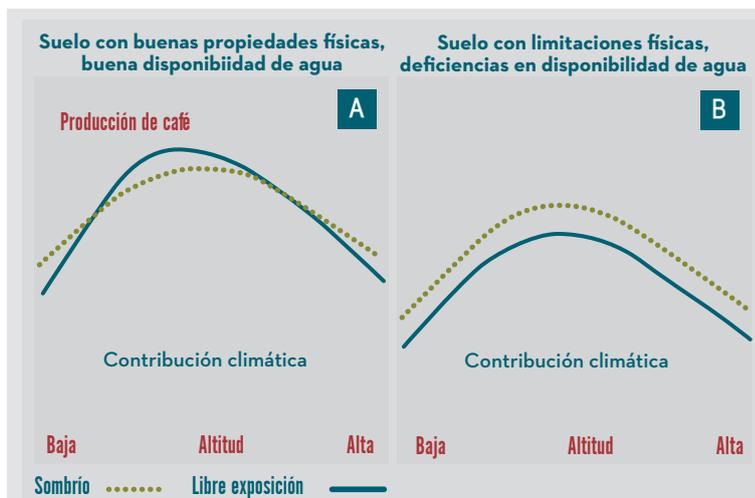


Figura 85. Comportamiento de la producción del café bajo condiciones de sombrío o libre exposición solar de acuerdo con las condiciones del suelo y la altitud (Beer *et al.*, 1998)

defoliación y despunte de los brotes terminales, debe considerarse la opción de descartar las plantas más afectadas. Si los daños son leves, debe continuarse con el manejo de acuerdo con lo programado. La utilización de polisombra en los almácigos disminuye los riesgos de daño por eventuales granizadas.

En plantaciones de café en etapa de levante, debe continuarse con el manejo de los lotes, ya que la plantación entrará a una etapa de recuperación paulatina de follaje y de ramas.

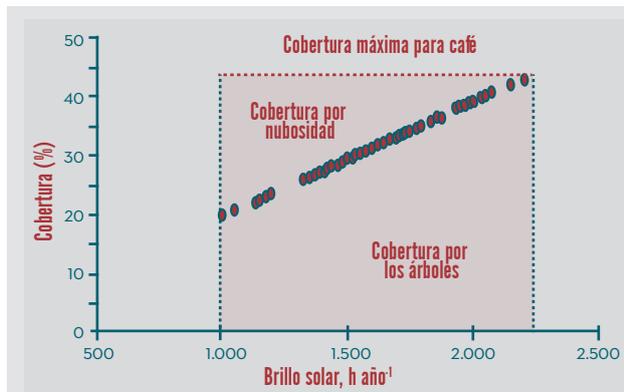


Figura 86. Porcentaje de cobertura para un cafetal en la zona cafetera de Colombia, de acuerdo con la cantidad de brillo solar anual en la región (Farfán y Jaramillo, 2009).

Si no se ha fertilizado recientemente es conveniente hacer una fertilización de refuerzo.

En plantaciones de café en etapa de producción debe continuarse con el manejo de los lotes ya que la plantación entrará a una etapa de recuperación de la parte aérea. Si recientemente no se ha fertilizado el cafetal es conveniente hacer una fertilización de refuerzo.

Después de una granizada severa, en cafetales en producción se presenta una gran cantidad de frutos caídos en el suelo, los cuales deben recogerse para evitar incremento en las poblaciones de broca.

Debido a que por el descope del tallo principal se estimula la formación de muchos brotes o chupones, se recomienda evaluar la presencia de estos seis meses después de la granizada y proceder con la eliminación de los brotes.

Daños en el café por descargas eléctricas

(Leguizamón y Arcila, 1992)

En la zona cafetera colombiana es frecuente observar daños en cafetos, árboles de sombrío y otros cultivos asociados al café, por la acción de descargas eléctricas durante la época de lluvias. A este tipo de daño se le denomina comúnmente como “mal de rayo”. Cuando esto ocurre, se presentan “focos” de plantas afectadas dentro del cultivo, con un área central muy afectada y a medida que se aleja hacia la periferia, el daño es menor. Frecuentemente el número de cafetos afectados varía, llegándose a encontrar “focos” hasta de 200 árboles quemados, con diversas intensidades de daño por la acción de las descargas eléctricas. Asociado a los cafetos dañados es común encontrar en el “foco” algunos árboles de sombrío o de otros cultivos también afectados.

Los cafetos afectados por la descarga eléctrica presentan en el tercio superior quemazón de la mayoría de las ramas y las hojas. En los árboles

menos afectados, se presenta necrosis de los brotes terminales y marchitamiento de las hojas. Para ayudar al diagnóstico del problema y diferenciarlo de otras enfermedades del café o disturbios fisiológicos, se recomienda hacer cortes longitudinales en las ramas y tallos, haciéndolos primero en la parte superior del árbol. En ellos se observa una coloración rojiza en los tejidos internos.

Después de observar el daño por las descargas eléctricas es necesario zoquear los árboles afectados a 30 cm de altura, con el propósito de evitar que la necrosis de los tejidos llegue al sistema radical y ocasione la muerte de los árboles. Una vez realizado el zoqueo de los árboles del “foco”, éstos se recuperan satisfactoriamente.

Efecto de las heladas sobre los cafetos

(Camargo y Pereira, 1994)

En Colombia dentro del rango altitudinal de los 1.000 y los 2.000 m, las condiciones de temperatura del aire no son limitantes para el cultivo del café, no se presentan heladas.

En el caso del Brasil, en el café las temperaturas bajas sin llegar al punto de congelación causan decoloración de las hojas nuevas en forma total o en manchas irregulares. Siempre se presenta en los primeros pares de hojas. También puede ocurrir muerte de las puntas de las ramas. Una temperatura por debajo de -2°C próxima al nivel del suelo causa estrangulamiento del tallo en cafetos jóvenes pudiendo producir muerte de los tejidos de la corteza. Temperaturas entre -5°C y -7°C ocasionan la muerte de los cafetos. La intensidad de los daños provocados por la disminución de la temperatura será mayor cuando haya ocurrencia de temperaturas inferiores a -3°C por un período de exposición largo.

Según la intensidad de la helada pueden distinguirse tres tipos de daño al cafeto por

heladas: *quemazón superficial*, cuando solamente parte de las hojas y extremos de las ramas son afectados; en este caso los cafetos se recuperarán por sí solos sin necesidad de podas. *Quemazón parcial o mediana*, se caracteriza por la quemazón de hojas, de parte de las ramas plagiotrópicas y de la porción superior de los tallos, pero sin afectar la parte inferior de la planta. Mediante poda de las partes afectadas pueden recuperarse estos cafetos. Como consecuencia, se afectará la cosecha de un año. *Quemazón severa*, en este caso ocurre quemazón de toda la planta. En plantas adultas se recomienda el zoqueo para su recuperación; en plantas jóvenes se recomienda volver a

sembrar y como consecuencia se pierden dos años de cosecha.

Los daños sobre la cosecha dependen del estado de maduración de los frutos. Si estos se encuentran en proceso de maduración (cereza o seco) no se afecta la calidad y se recomienda acelerar su recolección para evitar pérdidas por caída de frutos.

Como consecuencia de la helada, se acentúan defectos como granos inmaduros, grano negro, grano quemado o carmelita, los cuales pueden afectar significativamente la calidad de la bebida.

Literatura citada

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES – ACCEFYN ; INTERNATIONAL COUNCIL FOR SCIENCE - ICSU. La ciencia para entender el mundo del mañana : Cambio global. Bogotá : Editora Guadalupe Ltda., 1994. 321p.

ACEITUNO, P.; PRIETO, M.R.; SOLARI, M.E.; MARTÍNEZ, A.; POVEDA, G.; FALVEY, M. The 1877–1878 El Niño episode: associated impacts in South America. *Climatic Change* 92:389–416. 2009.

ALBIS G., V.M.; MARTÍNEZ C., R. Las investigaciones meteorológicas de Caldas. *Meteorología Colombiana* 2:131-140. 2000.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma : FAO, 2006. 323 p. (Estudio FAO riego y drenaje No. 56)

ALTIERI, M.; NICHOLLS, C.I. Agroecología; Teoría y práctica para una agricultura sustentable. México : Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2000. 250 p.

ALVARADO A., G.; MORENO R., G. ¿Cómo se distribuye anualmente la cosecha de las variedades caturra y Colombia? *Manizales : Cenicafé*, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 260)

ARAGÓN, D., F.; GONZÁLEZ, M., G.; GUZMÁN, M., O.; QUIROGA Z., F.A.; SIMBAQUEVA, F., O. Relación entre la radiación solar difusa y la radiación solar global en una localidad colombiana. *Cenicafé* 47(3): 159-166. 1996.

ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. *Chinchiná : Cenicafé*. 2007. 309 p.

ARCILA, P., J.; JARAMILLO, R., A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. *Manizales: Cenicafé*, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 311)

ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Recuperación de cafetales afectados por granizo. *Manizales : Cenicafé*, 2010. 4 p. (Avances Técnicos No. 397)

ARCILA, P., J.; JARAMILLO, R., A.; BALDIÓN, R., J.V.; BUSTILLO, P., A.E. 1993. La floración del cafeto y su relación con el control de la broca. Manizales: Cenicafé, 1993. 6 p. (Avances Técnicos No. 193)

ARCILA, P., J.; LEGUIZAMÓN C., J.E. Daños por granizo en almendras de café. Manizales: Cenicafé, 1988. 2 p. (Avances Técnicos No. 137)

ARRNTZ, W.E.; FAHRBACH, F. El Niño : experimento climático de la naturaleza, causas físicas y efectos biológicos. México: Fondo de Cultura Económico, 1996. 312 p.

ARRUDA, F.B.; IAFFE, A.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R.O. 2000. Resultados anuais do coeficiente de cultura do cafeeiro em um ensaio em Pindorama/SP. En: ANAIS do Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil. (1 : Setembro 26-29 de 2000 : Poços de Caldas). Poços de Caldas: Ministerio da Agricultura e do Abastecimento, 2000.

ASHOK, K.; BEHERA, S. K.; RAO, S.A.; WENG, H.; YAMAGATA, T. El Niño Modoki and its possible teleconnection. Journal of Geophysical Research : Oceans 112(C11007):1-27. 2007.

AYOADE, J.O. Introduction to climatology for the tropics. Chichester: John Wiley and Sons, 1983. 258 p.

AYRA, S.P. Introduction to micrometeorology. San Diego : Academy Press, Inc., 1988. 307 p.

BARRY, R.G. Mountain weather and climate. London : Routledge, 1992. 402 p.

BEDOYA V., J.E.; ESCOBAR U., D.; TÉLLEZ M., C.A. El patrón de cosecha en la caficultura colombiana. Economía Cafetera 26(6): 1-8. 1997.

BEER, J.; MUSCHLER, D.; KASS, D.; SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantation. Agroforestry Systems 38:139-164. 1998.

BERNAL G., G.H. Distribución espacial del brillo solar en Colombia. Santafé de Bogotá : HIMAT, 1987. 30 p.

BERNAL G., G.H.; LÓPEZ, R.; JOYA, A. Estudio del régimen ceráunico en Colombia. p. 205-216. En: CONGRESO Colombiano de Meteorología: Memorias. (2: Septiembre 17-21 1990 ; Santafé de Bogotá). Santafé de Bogotá: Himat-Socolmet-Daac, 1990.

BERNAL G., G.H.; MONTEALEGRE, J.E.; RANGEL, M.E.; SABOGAL, T.N. Distribución espacial de la precipitación en Colombia. Bogotá: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT, 1987. 21 p.

BETANCOURT E., D. Reseña histórica de la meteorología en Colombia. Bogotá, D.E.: Himat-Cofiagro, 1982. 91 p.

BLORE, T.W.D. Further studies of water use by irrigated and unirrigated arabica coffee in Kenya. *Journal of Agricultural Science* 67: 145-154. 1966.

BONHOMME, R. 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. p. 17–28. En: VARLET-GRANCHER, C. et al (Eds). *Crop structure and light microclimate; characterization and applications*. París : INRA, 1993. 518 p.

BONILLA, E. Estudio comparativo de la distribución de la luz y el viento en dos regiones cafeteras (Caldas y Antioquia). *Boletín Informativo de Cenicafé* 3(25): 29-35. 1952a

BONILLA, E. Estudio de la distribución vertical de la humedad relativa, de la temperatura del aire y del suelo, en una plantación de café. *Boletín Informativo de Cenicafé* 3(34): 19-37. 1952b

BOUSSINGAULT, J.B.; ROULIN, F.D. Viajes científicos a los Andes Ecuatoriales o colección de memorias sobre física, química e historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela. París: Lasserre Editor, 1849. 322 p.

BRIJNZEEL, L.A. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion; a state of knowledge review. Amsterdam : Unesco International Hydrological Programme – International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1990. 224p.

BUNYARD, P.; PEÑA, C.; DÍAZ, L. Analysis of meteorological data for La Selva station by applying the biotic pump theory. *Tecciencia* 9 (16): 73-77. 2014.

CALDAS, F.J. DE. El influjo del clima sobre los seres organizados. p 43-105. En: PATRIA y Naturaleza; documentos y mensajes de la Expedición Botánica. Bogotá: Editorial Andes, 1808.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B. Frost in coffee crops: Frost characteristics, damaging effects on coffee and alleviations options. p. 355-370. En: WINTGENS, J.N. *Coffee: Growing, processing, sustainable production*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. 1021 p.



CAMARGO, A.P. DE.; PEREIRA, A.R. Agrometeorology of the coffee crop. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. 43 p. (WMO/TD No. 615)

CARAMORI, P.H.; OMETTO, J.C.; VILLANOVA, N.A.; COSTA, J.D. DA. Efeito do vento sobre mudas de cafeeiro mundo novo e catuai vermelho. Pesquisa Agropecuaria 21(11): 1113–1118. 1986.

CASTILLO R., E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica* L. variedad Colombia. Cenicafé 47(1): 5-15. 1996.

CASTILLO, R., E.; ARCILA, P., J.; JARAMILLO, R., A.; SANABRIA, R., J. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. Cenicafé 48(3): 182-194. 1997.

CASTILLO Z., J.; MORENO R., G. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto. Chinchiná: Cenicafé, 1988. 171 p.

CAVALIER, J.; JARAMILLO, M.; SOLIS, D.; LEON, D. DE. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. Journal of Hydrology 193(1-4):83-96. 1997.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ – CENICAFÉ. Archivos de información climática 1950-2017. Manizales: Cenicafé, 2017.

CLARKE, R.T. The interception process in tropical rain forest: A literature review critique. Acta Amazónica 16-17:225-238. 1987.

COMET PROGRAM. Introducción a la meteorología tropical. 2. Ed. [En Línea]. Boulder: Comet Program, 2016. Disponible en Internet: https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/. Consultado el 17 de mayo de 2017)

CORTES B., E. Estudio del régimen de temperatura en Colombia. Santafé de Bogotá: HIMAT, 1989. 98 p.

CUARTAS, L.A.; POVEDA, G. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia, según el Reanálisis Ncep/Ncar. Meteorología Colombiana 5: 49-57. 2002

CHAVES C., B.; JARAMILLO R., A. Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. Cenicafé 48(2):120-132. 1997.

CHAVES C., B.; JARAMILLO R., A. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé* 49(3): 224-230. 1998.

CHINEA, J.D. Teledetección del bosque. p. 624-646. En: GUARIGUATA, M.R.; KATTAN, G.H. (Eds) *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Cartago: Libro Universitario Regional. 2002. 691 p.

CHOW, V.; MAIDMENT, R.; MAYS, L. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGrawHill-Interamericana, 1994. 584 p.

DAGG, M. Water requirements of coffee. *Kenya Coffee* 36(424):129-151. 1971.

DIAMOND, J. Colapso. Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen. Barcelona: Debate. 2006. 747 p.

DOGNIAUX, R. Prediction of solar radiation in areas with a specific microclimate. Dordrecht: Kluwer Academy Publishers, 1994. 107 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO, 1988. 212 p. (Estudios Riego y Drenaje No. 33)

DOMÍNGUEZ, C. Amazonia colombiana: visión general. Bogotá: Textos Universitarios. Biblioteca Banco Popular, 1985. 274 p.

EATON, J.S.; LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *The Journal of Ecology* 61(2): 495-508. 1973.

EDWARDS, P.J. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. V. Rates of cycling in throughfall and litterfall. *Journal of Ecology* 70:807-827. 1982.

ELLINGSON, R.G.; ELLIS, J.; FELS, S. The intercomparison of radiation codes in climate models: longwave results. *Journal of Geophysical Research* 96(D5):8929-8953. 1991.

ESCOBAR E., B.; JARAMILLO R., A. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 34(3): 98-106. 1983.

ESLAVA R., J.A. *Climatología del Pacífico colombiano*. Santafé de Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas, 1994. 79 p

ESLAVA R., J.A. Régimen de la presión atmosférica en Colombia. Santafé de Bogotá : Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1995. 149 p. (Colección Jorge Álvarez Lleras No. 8)

ESLAVA R., J.A. Climatología y diversidad climática de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 18(71): 507-538. 1993.

ESLAVA R., J.A.; LÓPEZ G., V.A.; OLAYA T., G. Contribución al conocimiento del régimen térmico y pluviométrico de Colombia. Colombia Geográfica 12(2): 53-118. 1986.

FAO. Plan de gestión de riesgo y adaptación al cambio climático en el sector agrario, período 2012-2021 (PLANGRACC-A). [En Línea]. Lima : Ministerio de Agricultura – FAO, 2012. 30 p. Disponible en internet: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/FAO-countries/Peru/docs/Plangracc_RESUMEN.pdf. Consultado el 14 de septiembre de 2017

FARFÁN V., F.F.; JARAMILLO R., A. Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Manizales : Cenicafé, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 379)

FASSBENDER, H.W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Turrialba : CATIE, 1987. 475 p.

FRANKEN, W.; LEOPOLDO, P.R.; MATSUI, E.; RIBEIRO, M.N.S. Interceptação das precipitações em floresta amazônica de terra firme. Acta Amazônica 12:15-22. 1992.

FRERE, M.; RIJKS, J.Q.; REA, J. Estudio agroclimático de la zona Andina. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial – OMM, 1978. 297 p. (Nota Técnica No. 161 OMM - No. 506)

GARCÍA DE P., L.; GARCÍA S., J. Diez temas sobre el clima. Madrid: Ministerio de Agricultura, 1978. 213 p.

GARZA, M. DE LA. Los Mayas; 3.000 años de civilización. México: Monclém Ediciones, 1995. 127 p.

GIRALDO A., G. 2000. Barreras rompevientos. [En Línea]. Cali : CIAT, 2000. 6 p. Disponible en Internet: http://teca.fao.org/sites/default/files/technology_files/BARRERAS%20ROMPEVIENTOS.pdf .Consultado el 10 de agosto de 2016.

Global Climate Change. 2017. Climate change. (<http://www.global-climate-change.org.uk/>) .Consultado el 27 de enero de 2018.

GOLLEY, F.B. 1991. Nutrient cycling and nutrient conservation. p 137-156. En: GOLLEY, F.B. Tropical rain forest ecosystems; structure and function. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company, 1991. 381 p. (Ecosystems of the world 14A)

GÓMEZ G., L. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad de crecimiento del cafeto. *Cenicafé* 28(1): 3-17. 1977.

GÓMEZ G., L.; GUZMÁN M., O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 46(4): 205-218. 1995.

GÓMEZ G., L.; JARAMILLO, R., A. Temperatura de árboles de café al sol. *Cenicafé* 25(2): 61-62. 1974.

GONZÁLEZ, J. Monitoring cloud interception in a tropical montane cloud forest of the South western Colombian Andes. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling* 1 (1): 97-117. 2000.

GUHL, E. Colombia: Bosquejo de su geografía tropical. Tomo I. Bogotá : Instituto Colombiano de Cultura, 1975. 286 p.

GUTIÉRREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. *Journal of American Horticultural Science* 119(3): 652-657. 1994.

GUZMÁN M., O.; BALDIÓN R., J.V.; SIMBAQUEVA F., O.; ZAPATA, H.J.; CHACÓN C., C. Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 64(1):60-76. 2013.

GUZMÁN, M., O; GÓMEZ G., L. Dirección y rafagosidad de los vientos de superficie en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 46(2): 81-90. 1995.

HAMILTON, L.S.; DUDLEY, N.; GREMINGER, G.; HASSAN, N.; LAMB, D.; STOLTON, S.; TOGNETTI, S. *Forest and water*. Roma : FAO, 2008. 78 p. (FAO Forestry paper No. 155)

HANCHI, A.; RAPP, A. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management* 97: 231-235. 1997.

HENRÍQUEZ, D., M. Impacto del fenómeno de El Niño en las lluvias del país desde el punto de vista agrícola. p 84-94. En: IV CONGRESO Colombiano de Meteorología. (4: marzo 19-23 de 1996: Santafé de Bogotá). Santa Fe de Bogotá: SOCOLMET-IDEAM, 1996.

HOOGHIEMSTRA, H.; RAN, E. Tres millones de años de la historia de Colombia contenidos en un registro de polen. Una reseña del nuevo corazón Funza II de 586 metros de largo. p. 13-17. En: SEMINARIO Nacional sobre Cambio Climático. Memorias. (1: marzo 3-4 : Santafé de Bogotá). Santafé de Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996. (Colección Memorias No. 5).

HOPKINS, B. Vegetation of the Olokemeji forest reserve, Nigeria. III. Microclimates with special reference to their seasonal changes. *Journal of Ecology* 53:125-138. 1965.

HOWDEN, M.; DUNLOP, M.; NIDUMOLU, U.; CRIMP, S.; NELSON, R. Frontiers in adaptation science: Food security/natural environments. Climate adaptation conference. [En Línea]. Canberra : CSIRO, 2010. 22 p. Disponible en Internet: <https://www.nccarf.edu.au/conference2010/wp-content/uploads/Mark-Howden.pdf> Consultado el 12 de julio de 2017.

HUMBOLDT, A. VON. Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente. 2. ed. Caracas: Monte Ávila Editores, 1832. 5 vols.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Atlas climatológico de Colombia. Bogotá : IDEAM, 2005. 218 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. El fenómeno de El Niño y su efecto en el clima de Colombia. *Innovación y Ciencia* 7(1): 57-62. 1998.

IDEAM ; PNUD ; MADS ; DNP ; CANCELLETERÍA. Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá. D.C : IDEAM-PNUD-MADS-DNP-CANCELLETERÍA-FMAM, 2017. 333 p.

JARAMILLO R., A. Condiciones micrometeorológicas en un cafetal bajo sombrío. *Cenicafé* 27(4): 180-184. 1976.

JARAMILLO R., A. Balance hídrico de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 33(1): 15-34. 1982.

JARAMILLO R., A. Continuidad de los períodos húmedos de la zona cafetera. *Cenicafé* 36(4): 125-138. 1985.

JARAMILLO R., A. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. *Atmósfera* 11:3-24. 1986.

JARAMILLO R., A. Características climáticas de la zona cafetera colombiana. p. 7-55. En: *TECNOLOGÍA del cultivo del café*. Chinchiná: Cenicafé, 1986. 404 p.

JARAMILLO R., A. El clima andino y café en Colombia. Manizales : Cenicafé, 2005a. 192 p.

JARAMILLO R., A. Lluvias máximas en 24 horas para la región Andina de Colombia. Cenicafé 56(3):250-268. 2005b.

JARAMILLO R., A. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. Cenicafé 57(4):288-298. 2006.

JARAMILLO R., A. Épocas recomendadas para la siembra del café en Colombia. Manizales: Cenicafé, 2016. 12 p. (Avances Técnicos No. 465).

JARAMILLO R., A.; BALDIÓN R., J.V.; GUZMÁN, M., O. El evento cálido del Pacífico y el cultivo del café. Agronomía 9(2): 13-17. 1999.

JARAMILLO R., A.; CHAVES, C., B. Distribución de la precipitación en Colombia; uso de la conglomeración estadística. *Atmósfera* 25:63-71. 1997

JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. Cenicafé 49(2): 129-135. 1998.

JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café -*Coffea arabica* L.- al sol y bajo sombra. Cenicafé 50(2): 5-13. 1999.

JARAMILLO R., A.; DOS SANTOS, J.M. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. variedades Catuaí y Borbón amarillo. Cenicafé 31: 86-104. 1980.

JARAMILLO R., A.; ESCOBAR E., B. Balance de energía en *Coffea arabica* L. Cenicafé 34(4): 115–126. 1984.

JARAMILLO R., A.; GÓMEZ G., L. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero. Cenicafé 40(3): 65-79. 1989.

JARAMILLO R., A.; GÓMEZ G., L. Estudio de la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Cenicafé 45(1): 25-34. 1974.

JARAMILLO R., A.; GUZMÁN M., O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L., variedad Caturra. Cenicafé 35(3): 57 65. 1984.

JARAMILLO R., A.; KOGSON, Q., F. Características de las lluvias máximas en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 45(1): 25-34. 1994.

JARAMILLO R., A.; RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P., J. Patrones de la distribución de la lluvia en la zona cafetera. *Manizales: Cenicafé*, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 410)

JARVIS, P.G.; JAMES, G.B.; LANDSBERG, J.J. Coniferous forest. p. 171 – 240. En: MONTEITH, J.L. *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 2. London : Academy Press, 1976. 439 p.

JENSEN, M.E.; BURMAN R.D.; ALLEN, R.G. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York : American Society of Civil Engineers – ASCE, 1990. 332 p. (Manual of Practice No. 70).

KITTREDGE, J. *Forest influences: the effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1948. 349 p.

KLAASSEN, W.; HARRY, J.M.; VEEN, A.W.L. Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology* 185(1-4):349-361. 1996.

KLAR, A.E. *A agua no sistema solo-planta-atmosfera*. Sao Paulo: Livraria Nobel, S. A., 1984. 408 p.

KUMAR, D. Investigation into some physiological aspects of high density plantings of coffee (*Coffea arabica* L). *Kenya Coffee* 44(519): 47-97. 1979.

LANDSBERG, J.J., JARVIS, P.G., SLATER, M.B. The radiation regime of a spruce forest. p. 411-418. En: SLATYER, R.O. *Plant response to climate factors*. Paris : Unesco, 1973. 574 p.

LASSO E., L. *Anotaciones sobre el fenómeno de las heladas*. Bogotá : Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras -HIMAT, 1987. 44 p.

LASSO, S.R.; EMBERGER, M.L.; SAUVAGE, CH.; LOSSAINT, P. Los regímenes pluviométricos de Colombia. En: SIMPOSIO y Foro de Biología Tropical Amazónica. (2 : enero 21-25 de 1969 : Florencia). Bogotá : Asociación Pro-Biología Tropical, 1969. 30 p.

LAUER, W. Climate and weather. p 7-53. En: LIETH, H.H.; WERGER, M.J.A. *Tropical rain forest ecosystems; biogeographical and ecological studies*. Amsterdam : Elsevier, 1989. 713 p. (Ecosystems of the world 14B).

LEGUIZAMÓN C., J.E.; ARCILA P., J. Daños en cafetales por descargas eléctricas. Chinchiná : Cenicafé, 1992. 2 p. (Avances Técnicos No. 180)

LEÓN A., G.E.; ZEA M., J.A.; ESLAVA R., J.A. Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana* 1:31-38. 2000.

LEÓN A., G.E.; ZEA M., J.A.; ESLAVA R., J.A. Ondas del Este en Colombia y algunos aspectos relevantes de los ciclones tropicales. *Meteorología Colombiana* 3:137-141. 2001.

LINACRE, E. *Climate data and resources; a reference and guide*. London : Routledge, 1992. 366 p.

LOOMIS, R.S; CONNOR, D.J. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 538 p.

LÜTTGE, U. *Physiological ecology of tropical plants*. Berlin : Springer-Verlag, 1997. 384 p.

LLOYD, C.R.; MARQUES, A. DE O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 42(1): 63-73. 1988.

MABBERLEY, D.J. *Tropical rain forest ecology*. London: Blackie Academy and Professional, 1992. 300 p.

MADDEN, R.; JULIAN, P. Detection of 40-50-day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences* 28(7):702-708. 1971.

MAKARIEVA A.M.; GORSHKOV, V.G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences* 11:1013-1033. 2007.

MARTÍNEZ, I.; KEIGWIN, L.; BARROWS, T.T; YOKOYAMA, Y.; SOUTHON, J. La Niña-like conditions in the eastern equatorial Pacific and a stronger Choco jet in the northern Andes during the last glaciation. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 18(2):11-1 – 11-18. 2003.

MENZA F., H.D.; PÉLAEZ P., M.J. Alternativas para el manejo cultural de la muerte descendente del cafeto. *Manizales : Cenicafé*, 2015. 8 p. (Avances Técnicos No. 456)

MESA, O. Enso, rotación terrestre, volcanes y sismicidad. *Dyna* 136:41-61. 2002.



MESA, O.; POVEDA, G.; CARVAJAL, F. Introducción al clima de Colombia. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1997. 390 p.

MIRANDA, R.A.C. Interceptacao da chuva por cacauzeiros no sudeste da Bahia. Revista Theobroma 17(4):251-259. 1987

MOLION, L.C. Genese do El Niño. Revista Brasileira de Climatología 21: 1-4. 2017.

MONTAGNINI, F.; SOMARRIBA, E.; MURGUEITIO, E.; FASSOLA, H.; EIBL, B. Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Cali : CIPAV – Turrialba: CATIE, 2015. 454 p. (Serie técnica. Informe técnico No. 402).

MONTEALEGRE B., J.E. Distribución espacial de la precipitación en Colombia. Atmósfera 9: 37-52. 1986.

MONTEALEGRE B., J.E. Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Informe Final. Bogotá, IDEAM, 2009. 54 p.

MONTEITH, J.L. Light interception and radiative exchange in crop stands. p. 89–111. En: EASTIN, J.D.; HASKINS, F.A.; SULLIVAN, Y.; VAN BAVEL, C.H.M. Physiological aspects of crop yield. Madison: American Society of Agronomy, 1969. 391 p.

MORA O., L.E.; STURM, H. Estudios ecológicos del páramo y del bosque alto andino cordillera Oriental de Colombia. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1994. 715 p. (Colección Jorge Álvarez Lleras No. 6).

MORAN, J.M.; MORGAN, M.D. Meteorology : The atmosphere and the science of weather. 4. Ed. Englewood Cliffs : Macmillan Publishing Company, 1991. 517 p.

MURTHY, R.K. Basic principles of agricultural meteorology. Koti : BS Publications, 2002. 261 p.

NICHOLLS E., C.I.; RÍOS O., L.A.; ALTIERI, M.A. Agroecología y resiliencia socioecológica: Adaptándose al cambio climático. Medellín : Red Iberoamericana de Agroecología para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático - Redagres, 2013. 218 p.

NOBRE, A.D. El futuro climático de la Amazonía. Informe de Evaluación Científica. São José dos Campos: ARA: CCST-INPE : INPA. 2014. 43 p.

ODUM, E. P. Ecología. México : Editorial Interamericana, 1972. 639 p.

ODUM, H.T.; ODUM, E.C.; BROWN, M.T.; LAHART, D.; BERSOK, C.; SENDZIMIR, J. Sistemas ambientales y políticas públicas. [En Línea]. Gainesville : University of Florida, 1988. Disponible en Internet: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/esp/index.htm> Consultado el 14 de septiembre de 2016.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. Guía de prácticas agrometeorológicas. Ginebra : OMM, 1982. (OMM No. 134)

OROZCO C., F.J.; JARAMILLO R., A. Efecto del déficit de humedad en el suelo sobre la temperatura del suelo y de las hojas en plantas de *Coffea canephora* y *Coffea arabica*. Cenicafé 29(4): 121-134. 1978.

OSTER, R. Las precipitaciones en Colombia. Colombia Geográfica 6(2): 5-147. 1979.

PABÓN C., J.D. El clima de Colombia durante los siglos XVI-XIX a partir de material histórico. Parte I: inventario de fuentes de información. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 15:75-92. 2006.

PABÓN C., J.D.; ZEA, J.; LEÓN, G.; HURTADO, G.; GONZÁLEZ, O.C.; MONTEALEGRE, J.E. La atmósfera, el tiempo y el clima. p 34-86. En: LEYVA, P. El medio ambiente en Colombia. Bogotá : IDEAM, 1998.

PALOMEQUE F., E. Sistemas agroforestales. [En Línea]. Chiapas : México. 2009. 29 p. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/sistemas-agroforestales/sistemas-agroforestales.pdf>. Consultado el 8 de marzo de 2017.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Meteorología agrícola. Piracicaba: Universidade de Sao Paulo : ESALQ, 2007. 202 p.

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, M.B.; VILLA NOVA, N.A. Coffee crop coefficient for precision irrigation based on leaf area index. Bragantia 70(4): 946-951. 2011

PHILANDER, S.G. El Niño, La Niña, and the southern oscillation. San Diego : Academy Press, Inc., 1990. 293 p.

PIDWIRNY, M.; JONES, S. Fundamentals of physical geography. 2. Ed. [En Línea].2010. Disponible en Internet: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/contents.html>. Consultado el 12 de abril de 2017.



POVEDA J., G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 28(107): 201-221. 2004.

POVEDA J., G.; JARAMILLO R., A. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia. *BAHC News* No. 8:3-6. 2000.

POVEDA J., G.; JARAMILLO R., A.; GIL, M.M.; QUICENO, N.; MANTILLA, R. Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research* 37(8): 2169-2178. 2001.

POVEDA J., G.; JARAMILLO R., A.; MANTILLA, R. Influencia del evento cálido del Pacífico en la humedad del suelo y el índice normalizado de vegetación en Colombia. *Cenicafé* 51(4): 263-271. 2000.

POVEDA J., G.; MESA S., O.J. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters* 27:1675-1678. 2000.

POVEDA J., G.; MESA S., O.J.; AGUDELO, P.A.; ÁLVAREZ, J.F.; ARIAS, P.A.; MORENO, H.A.; SALAZAR, L.F.; TORO, V.G.; VIEIRA, S.C.; JARAMILLO R., A.; GUZMÁN M., O. Diagnóstico del ciclo diario de precipitación en los Andes tropicales de Colombia. *Meteorología Colombiana* 5:23-30. 2002.

POVEDA J., G.; MESA S., O.J.; SALAZAR, L.F.; ARIAS, P.A.; MORENO, H.A.; VIEIRA, S.C.; AGUDELO, P.A.; TORO, V.G.; ÁLVAREZ, J.F. The diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review* 133(1):228-240. 2005.

POVEDA J., G.; RAMÍREZ, J.M.; JARAMILLO R., A. Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos* 9:47-56. 2002.

POVEDA J., G.; ZULUAGA, M.; MEJÍA, J.F. diagnóstico de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998-2002. [En Línea]. En: CONGRESO Latinoamericano de hidráulica. (21: octubre 18-22 2004: Sao Pedro). Sao Paulo : IAHR : AIPH, 2004. Disponible en Internet: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4397/1/AA3732.pdf> Consultado el 18 de octubre de 2016.

PROCTOR, J.T.A.; KYLE, W.J.; DAVIES, J.A. The radiation balance of an apple tree. *Canadian Journal of Botany* 50(5):1731-1740. 1972.

RAICH, J.W. Throughfall and stemflow in mature and year-old wet tropical forest. *Tropical Ecology* 24(2): 234-243. 1983.

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A. Balances de energía asociados a los cambios de cobertura en la zona andina colombiana. *Cenicafé* 60 (3): 199-209. 2009.

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé* 61(1): 55-66. 2010.

RIEHL, H. *Tropical meteorology*. New York : McGraw-Hill, 1954. 392 p.

RIETVELD, M.R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology* 19: 243-252. 1978.

ROSENBERG, N.J. *Microclimate: The biological environment*. New York : McGraw-Hill Book, 1974. 315 p.

ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. The Hague : Junk Publishers, 1981. 391 p.

RUTTER, A.J. The hydrological cycle in vegetation. p. 111-154. En: MONTEITH, J.L *Vegetation and the atmosphere*. Vol.1. London : Academic Press, 1975. 278 p.

SAEKI, T. Light relations in plant communities. p 70-94. En: EVANS, L. *Environmental control of plant growth*. New York : Academy Press, 1993. 468 p.

SALAZAR G., M.R.; CHAVES C., B.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Crecimiento del fruto del café *Coffea arabica* L. var. Colombia. *Cenicafé* 45(2):41-50. 1994.

SCHROEDER, R. Resultados obtenidos de una investigación de microclima en un cafetal. *Cenicafé* 2(18): 33-43. 1951.

SCHUBART, H.O.R; SALATI, E. Natural resources for land use in the Amazon region: The natural systems. p. 211-239. En: HECHT S., B. *Amazonia : agriculture and land use research*. Cali : CIAT, 1982. 428 p.

SELLERS, W. *Physical climatology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1974. 272 p.



SHADEGHIAN K., S.; JARAMILLO R., A. Nutrición de los cafetales en Colombia en escenarios de La Niña. Manizales : Cenicafé, 2017. 12 p. (Avances Técnicos No. 473)

SHADEGHIAN K., S.; JARAMILLO R., A.; DUQUE O., H. Nutrición de los cafetales en Colombia en escenarios de El Niño. Manizales: Cenicafé, 2017. 12 p. (Avances Técnicos No. 477)

SHAXSON, F.; BARBER, R. Optimizing soil moisture for plant production. The significance of soil porosity. [En Línea] Roma: FAO, 2003. 107 p. (FAO Soils Bulletin 79). Disponible en Internet: <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y4690E/y4690e00.htm#Contents>. Consultado el 22 de febrero de 2015.

SILVEIRA NETO, S.; NAKANO, O.; BARBIN, D.; NOVA, N.A.V. Manual de ecología dos insetos. Sao Paulo: Editora Agronómica Ceres, 1976. 419 p.

STANESCU S.; DÍAZ J.R. Estudio preliminar de la temperatura del aire en Colombia. Bogotá: Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología, 1971. 90 p.

STANHILL, G.; HOFSTEDE, G. J.; KALMA, J.D. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society 92(391): 128-140. 1966.

STEINHART, U.; FASSBENDER, H.W. Características y composición química de las lluvias de los Andes occidentales de Venezuela. Turrialba 29:175-182. 1979.

SUÁREZ DE C., F.; RODRÍGUEZ G., A. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Chinchiná, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1962. 473 p.

SUÁREZ S., J.V. Régimen de las lluvias de la zona cafetera colombiana. Chinchiná : Cenicafé, 1974. 4 p. (Avances Técnicos No. 34)

TOBÓN, C.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. Journal of Hydrology 237: 40-57. 2000.

TOBÓN, C.; ARROYAVE, F. Hidrología de los bosques alto-andinos. p. 227-260. En: LEÓN, J.D. Ecología de Bosques Andinos; experiencias de investigación. Medellín : La Carreta Editores, 2008.

TORRES, H. Fenomenología del rayo. Innovación y Ciencia 3(3): 24-33. 1994.

TORRES P, C.E.; PABÓN C., J.D. Variabilidad intra-estacional de la precipitación en Colombia y su relación con la oscilación de Madden-Julian. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 41(158):79-93. 2017.

TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society 78(12): 2771-2777. 1997.

TRENBERTH, K.E.; FASULLO, J.T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. Bulletin of the

TROJER, H. The phenological equator for coffee planting in Colombia. p. 107-117. En: AGROCLIMATOLOGICAL Methods; Proceedings of the Reading Symposium Vol. 7. París : UNESCO, 1968.

TROJER, H. El ambiente climatológico y el cultivo del café en Colombia. Boletín Informativo 5(57): 22-37. 1954a.

TROJER, H. El Tiempo reinante en Colombia sus características y su desarrollo: Estudios básicos para una climatología dinámica de Colombia. Boletín Técnico Cenicafé 2(13).1-43. 1954b.

TROJER, H. Distribución y características de la precipitación en un cafetal bajo sombrío. Boletín Informativo 6(67): 256-264. 1955.

TROJER, H. Meteorología y climatología de la vertiente del Pacífico colombiano. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

TROJER, H. Fundamentos para la zonificación meteorológica y climatológica del trópico especialmente en Colombia. Cenicafé 10(8): 289-373. 1959.

VALENCIA, A., G. Factores que inciden en la formación de grano negro y caída de frutos verdes de café. Cenicafé 24 (2):47-55. 1973

VALENCIA, A., G.; ARCILA P., J. Daños por granizo en cafetales. Chinchiná: Cenicafé, 1976. 2 p. (Avances Técnicos No. 53)

VAN DER HAMMEN, T. Cambios climáticos regionales en el pasado y en el futuro. p. 19-21. En: SEMINARIO Nacional sobre Cambio Climático. Memorias. (Marzo 3-4 de 1994: Santafé de Bogotá). Santafé de Bogotá, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996.

VELÁSQUEZ F., S.; JARAMILLO R., A. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009.

VENEKLAAS, E. Rainfall interception and aboveground nutrient fluxes in Colombian, montane tropical rain forest. Utrecht : University of Utrecht, 1990. 105 p.

WALLACE J., M.; VOGEL, S. "El Niño" y la predicción climática. Informes a la nación sobre nuestro planeta cambiante. Boulder : University Corporation for Atmospheric Research – NOAA, 1994. 24 p.

WHITEMAN, C.D. Mountain meteorology; fundamentals and applications. Oxford : Oxford University Press, 2000. 372 p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP). Geneva: WMO, 2009. 257 p. (WMO-No. 1045)

YEPES P., L.J.; POVEDA J., G. Diagnóstico y predictibilidad de la lluvia en Colombia a escala intra-estacional. En: CONGRESO Latinoamericano de Hidráulica. (25: septiembre 9-12 de 2012: San José). San José, CIC: IAHR, 2012.

ZEA M., J.A.; LEÓN A., G.E.; ESLAVA R., J.A. La oscilación cuasibienal y algunas relaciones con los eventos cálidos y fríos del Pacífico. *Meteorología Colombiana*. 1:51-58. 2000.

