



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá

Edwin Oswaldo Rojas Barbosa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2011

Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá

Edwin Oswaldo Rojas Barbosa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias - Meteorología

Director:

M.Sc Francisco Boshell

Línea de Investigación:

Agroclimatología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2011

Agradecimientos

Agradecimientos muy especiales al profesor José Francisco Boshell, profesor de la Universidad Nacional de Colombia y director de este trabajo, quien con sus excepcionales orientaciones dio forma y permitió el desarrollo y culminación de este trabajo.

A Andrés Javier Peña Q, investigador del Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFE, por sus útiles asesorías y recomendaciones y colaboración permanente.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales IDEAM, por el apoyo técnico prestado por sus profesionales Gloria León y franklin Ruiz y por el suministro de información climática necesaria para el desarrollo de esta investigación.

Al investigador Edgar Villaneda, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, quien con su amplia experiencia apporto conocimientos muy importantes para el desarrollo del trabajo.

Resumen

Se analizó el comportamiento de las condiciones climáticas de la zona sur occidente de la Sabana Bogotá a escalas intra e interanual, a partir del estudio de las series de tiempo de las variables climáticas provenientes de tres estaciones de la red climática del IDEAM. Se encontraron claras asociaciones entre la oscilación ENOS, la temperatura y la precipitación de la zona. Mediante el software de simulación DSSAT y utilizando información climática a escala diaria y escenarios de cambio climático generados por el IDEAM, se realizaron simulaciones del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático en condiciones de cultivo comercial. A manera de validación del modelo se utilizó información proveniente de detallados experimentos realizados en CORPOICA, mostrando que el software DSSAT simula de manera adecuada el rendimiento del cultivo de papa en condiciones de la Sabana de Bogotá.

Palabras Clave: simulación del cultivo de papa, variabilidad climática, cambio climático, Sabana de Bogotá, DSSAT

Abstract

It was analyzed the behavior of the climatic conditions of the south- west zone of Sabana de Bogotá to intra and inter annual scales, from the study of time series of climatic variables from three weather stations in the IDEAM climate network. Clear associations were found between the oscillation ENOS, the temperature and the rainfall of the zone. Through the software of simulation DSSAT and using climatic information to daily scale and scenes of climate change generated by the IDEAM, simulations were carried out on potato crops under scenes of climatic variability and climate change in conditions of commercial crops. As a validation of the model was used data from detailed experiments realized in CORPOICA, showing that the software DSSAT adequately simulates the performance of the potato crop under conditions of the Sabana de Bogota.

X Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá

Keywords: Climate variability, Climate Change, Sabana de Bogotá, Potato crop Simulation, DSSAT.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Resumen | IX |
| Lista de figuras | XIV |
| Lista de tablas | XVII |
| Introducción | 1 |
| 1. Marco teórico | 5 |
| 1.1 Variabilidad climática | 5 |
| 1.1.1 Variabilidad climática Intraestacional..... | 5 |
| 1.1.2 Variabilidad climática estacional..... | 5 |
| 1.1.3 Variabilidad climática interanual | 6 |
| 1.1.4 Efectos del fenómeno ENOS en Colombia..... | 10 |
| 1.1.5 Impactos del fenómeno ENOS en la Sabana de Bogotá | 12 |
| 1.1.6 Impactos del fenómeno ENOS sobre la agricultura | 13 |
| 1.1.7 Impactos de los eventos ENOS en el cultivo de la papa..... | 14 |
| 1.2 El cambio climático | 15 |
| 1.2.1 Escenarios de cambio climático | 17 |
| 1.2.2 Cambio climático en Colombia | 18 |
| 1.2.3 El Cambio climático y la agricultura..... | 20 |
| 1.2.4 El Cambio climático y el cultivo de papa | 22 |
| 1.3 El Clima y el cultivo de papa | 23 |
| 1.3.1 Origen de la papa..... | 23 |
| 1.3.2 La planta de papa | 23 |
| 1.3.3 El tubérculo | 24 |
| 1.3.4 Fases de desarrollo vegetativo del cultivo de la papa..... | 25 |
| 1.3.5 Coeficientes genéticos para el cultivo de papa..... | 29 |
| 1.3.6 Fotosíntesis en la planta de papa..... | 31 |
| 1.3.7 Consideraciones ambientales | 31 |
| 1.3.8 Plagas y enfermedades del cultivo de la papa | 36 |
| 1.3.9 Producción de papa en Colombia..... | 37 |
| 1.3.10 Proceso productivo de la papa | 40 |
| 1.4 El suelo y el cultivo de papa..... | 42 |
| 1.4.1 Nivel de acidez y nutrientes del suelo | 43 |
| 1.4.2 Contenido de carbono y materia orgánica | 44 |
| 1.4.3 Textura del suelo..... | 45 |
| 1.4.4 Densidad Aparente, Densidad real y Porosidad | 45 |
| 1.4.5 Capacidad de Agua..... | 46 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 1.4.6 | Perfiles de suelo | 47 |
| 1.5 | Modelación y agricultura..... | 50 |
| 1.5.1 | Los Modelos | 50 |
| 1.5.2 | Aplicación de Modelación | 52 |
| 1.5.3 | Sistemas de Soporte de Decisiones DSS | 54 |
| 1.5.4 | Sistema de Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología DSSAT | 55 |
| 1.5.5 | Experiencias de modelación en el cultivo de papa..... | 57 |
| 2. | Metodología del trabajo..... | 61 |
| 2.1 | Zona de estudio..... | 61 |
| 2.2 | Información utilizada | 62 |
| 2.2.1 | Series mensuales y anuales | 63 |
| 2.3 | Temporadas agroclimáticas..... | 64 |
| 2.3.1 | Desviación estándar y coeficiente de variación..... | 66 |
| 2.4 | Análisis de Correlación..... | 66 |
| 2.5 | Variabilidad Climática Inter-anual | 67 |
| 2.6 | Análisis de tendencia de Mann-Kendall..... | 69 |
| 2.7 | Método de Estimación de pendiente de Sen | 70 |
| 2.8 | Escenarios de cambio climático | 70 |
| 2.9 | Datos de Entrada para DSSAT..... | 71 |
| 2.9.1 | Variables de clima | 71 |
| 2.9.2 | Variables del Suelo..... | 77 |
| 2.9.3 | Variables de Genotipo | 81 |
| 2.9.4 | Variables de Manejo Agrícola | 82 |
| 2.9.5 | Condiciones Iniciales | 82 |
| 2.9.6 | Variables Medidas en el Cultivo..... | 83 |
| 2.9.7 | Salidas del Modelo del DSSAT | 83 |
| 2.9.8 | Experimentos en DSSAT | 83 |
| 3. | Discusión y resultados..... | 86 |
| 3.1 | Caracterización climática de la Sabana de Bogotá..... | 86 |
| 3.1.1 | Precipitación | 87 |
| 3.1.2 | Temperatura | 90 |
| 3.1.3 | Brillo solar..... | 98 |
| 3.2 | Variabilidad climática interanual | 101 |
| 3.2.1 | Análisis histórico del Índice oceánico El Niño ONI | 101 |
| 3.2.2 | Variabilidad climática interanual en la Sabana de Bogotá..... | 104 |
| 3.3 | Análisis del Cambio Climático en la Sabana de Bogotá..... | 110 |
| 3.3.1 | Análisis de tendencias | 110 |
| 3.3.2 | Análisis de los escenarios de cambio climático para la Sabana de Bogotá | 112 |
| 3.4 | Evaluación de variedades de papa locales para simulaciones con DSSAT | 118 |
| 3.5 | Generación de Climáticos diarios para las simulaciones con DSSAT | 120 |
| 3.6 | Validación de DSSAT bajo las condiciones de la Sabana de Bogotá. | 123 |
| 3.7 | Rendimiento del cultivo de papa simulado en la Sabana de Bogotá bajo escenarios de variabilidad y cambio climático..... | 125 |
| 4. | Conclusiones y recomendaciones | 132 |
| A. | Anexo: Rendimientos y valores medios climáticos | 138 |

Bibliografía 143

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1-1: Zona de convergencia intertropical..... | 6 |
| Figura 1-2: Condiciones normales en el Pacífico tropical. | 8 |
| Figura 1-3: Condiciones en el Pacífico tropical durante El Niño..... | 9 |
| Figura 1-4: Interfaz DSSAT v4 4.0.2.0..... | 56 |
| Figura 2-1: Estaciones climáticas de la zona de estudio, Sabana de Bogotá. | 61 |
| Figura 2-2: Promedios mensuales multianuales de precipitación | 65 |
| Figura 2-3: Ejemplo de archivo de datos climáticos de Tibaitatá para el año 1992... .. | 76 |
| Figura 2-4: Ejemplo de archivo con los perfiles de suelo en DSSAT. | 81 |
| Figura 2-5: Ejemplo de archivo con coeficientes fisiológicos <i>PTSUB040.CUL</i> | 82 |
| Figura 3-1: Precipitación media mensual para las estaciones de la Sabana de Bogotá | 88 |
| Figura 3-2: Precipitación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá. | 89 |
| Figura 3-3: Temperatura media promedio mensual multianual para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 91 |
| Figura 3-4: Temperatura mínima promedio mensual multianual para la Sabana de Bogotá. | 93 |
| Figura 3-5: Promedio multianual de las temperaturas mínimas absolutas mensuales, registradas en las estaciones El Dorado y G. Providencia. | 94 |
| Figura 3-6: Temperatura mínima promedio por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 95 |
| Figura 3-7: Temperatura máxima promedio mensual multianual para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 96 |
| Figura 3-8: Temperatura máxima por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 98 |
| Figura 3-9: Promedio mensual multianual de brillo solar para las estaciones de la Sabana | 99 |
| Figura 3-10: Promedio de brillo solar por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 100 |
| Figura 3-11: Comportamiento del índice oceánico El Niño ONI para el periodo 1950-2010..... | 102 |
| Figura 3-12: Comportamiento de la precipitación durante la PTS bajo eventos El Niño. | 108 |
| Figura 3-13: Comportamiento de la precipitación por temporadas agroclimáticas durante los años 1992 y 2008. | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3-14: Series históricas de las temperaturas máximas promedio anual para el periodo 1986-2008 en la Sabana de Bogotá | 111 |
| Figura3-15: Promedios mensuales de precipitación para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado | 112 |
| Figura 3-16: Promedios de precipitación acumulada por temporadas agroclimáticas para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado | 113 |
| Figura 3-17: Promedios de precipitación acumulada por temporadas agroclimáticas para el periodo 2041-2070 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado. | 114 |
| Figura 3-18: Promedios de temperatura máxima por temporada agroclimática para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático en la estación El Dorado. | 115 |
| Figura3-19: Promedios de temperatura máxima por temporada agroclimática para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático en la estación Tibaitatá. | 115 |
| Figura 3-20: Promedios mensuales de temperatura máxima para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado. | 116 |
| Figura 3-21: Promedios mensuales temperatura mínima para el periodo 2011-2040 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación G. Providencia. ... | 117 |
| Figura 3-22: Promedios mensuales temperatura mínima para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación Tibaitatá..... | 118 |
| Figura 3-23: Histograma de los datos diarios de temperatura máxima registrados en la estación Tibaitatá, durante el año 1992..... | 121 |
| Figura 3-24: Histogramas de los datos diarios de temperatura máxima y mínima para los meses de noviembre y febrero del año 1992 respectivamente en la estación Tibaitatá | 121 |
| Figura 3-25: Datos de temperatura máxima generados a partir de distribución normal, datos reales y datos generados mediante Marksim para el año 1993 | 122 |
| Figura 3-26: Datos de temperatura mínima generados a partir de distribución normal, datos reales y datos generados por Marksim para el año 1993..... | 122 |
| Figura 3-27: Datos de precipitación generados por Marksim y datos reales para el año 1993..... | 123 |
| Figura 3-28: Rendimientos de papa Diacol Capiro reales y simulados para diferentes láminas de agua aplicada..... | 124 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1-1: Características de los suelos de las zonas de estudio..... | 49 |
| Tabla 2-1: Estaciones climatológicas de la zona de estudio..... | 62 |
| Tabla 2-2: Temporadas agroclimáticas en relación con la ocurrencia de El Niño y La Niña. PTS: primera temporada seca, PTL: primera temporada de lluvia, STS: segunda temporada seca, STS: segunda temporada de lluvia..... | 68 |
| Tabla 2-3: Albedo del suelo..... | 78 |
| Tabla 2-4: Límite de evaporación..... | 78 |
| Tabla 2-5: Drenaje..... | 78 |
| Tabla 2-6: Coeficiente de escorrentía..... | 79 |
| Tabla 3-1: Caracterización Climática de la Sabana de Bogotá..... | 86 |
| Tabla 3-2: Promedio mensual de precipitación, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 88 |
| Tabla 3-3: Acumulado de precipitación, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 90 |
| Tabla 3-4: Promedio mensual de temperatura media, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana..... | 91 |
| Tabla 3-5: Promedio de temperatura media, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana..... | 92 |
| Tabla 3-6: Promedio mensual de temperatura mínima, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana..... | 93 |
| Tabla 3-7: Promedio de temperatura mínima, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana..... | 95 |
| Tabla 3-8: Promedio mensual de temperaturas máximas, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana..... | 97 |
| Tabla 3-9: Promedio de las temperaturas máximas, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana..... | 98 |
| Tabla 3-10: Promedio mensual multianual de brillo solar, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana..... | 100 |
| Tabla 3-11: Promedio de brillo solar, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana..... | 101 |
| Tabla 3-12: Coeficientes de correlación sincrónica entre la serie mensual del índice ONI y las series mensuales de las variables climáticas precipitación (Ppt), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) y brillo solar (BS) en la Sabana de Bogotá..... | 104 |
| Tabla 3-13: Coeficientes de correlación entre la serie mensual del índice ONI y las series mensuales de precipitación sin rezago, con rezagos de uno y dos meses (Lag 1 y | |

| | |
|---|-----|
| Lag 2), suavizadas mediante media móvil de 3 puntos y sin tendencia en la Sabana de Bogotá. | 105 |
| Tabla 3-14: Coeficientes de correlación entre las series de precipitación acumulada durante cada temporada agroclimática en las estaciones de la Sabana de Bogotá y el índice ONI promediado por cada temporada agroclimática, sin rezagos (Lag 0) y con rezagos de uno y dos meses (Lag 1 y Lag 2)..... | 107 |
| Tabla 3-15: valores anuales de las variables climáticas para 1992, 1993 y 2008. | 109 |
| Tabla 3-16: Significancia estadística y estimativo de tendencia anual de las temperaturas para las estaciones de la Sabana de Bogotá | 110 |
| Tabla 3-17: Significancia estadística y estimativo de tendencia anual de la precipitación para las estaciones de la Sabana de Bogotá..... | 112 |
| Tabla 3-18: Coeficientes genéticos para algunos cultivares de papa. | 119 |
| Tabla 3-19: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de Tibaitatá, Mosquera | 128 |
| Tabla 3-20: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de G. Providencia en Tenjo. | 129 |
| Tabla 3-21: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de El Dorado en Bogotá..... | 130 |
| Tabla 4-1: Valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2), y rendimiento simulado de la variedad Diacol Capiro durante el periodo 2005 - 2010 en condiciones de Tibaitatá..... | 138 |
| Tabla 4-2: Valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2), y rendimiento simulado de la variedad Pastusa durante el periodo 2005 - 2010 en condiciones de Tibaitatá. | 139 |
| Tabla 4-3: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones de Tibaitatá. | 140 |
| Tabla 4-4: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones de G. Providencia.... | 141 |
| Tabla 4-5: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones El Dorado..... | 142 |

Introducción

El cultivo de la papa tiene gran importancia a nivel mundial, constituye el cuarto producto más cultivado y el primero no cerealero, siendo producido y consumido en más de 100 países, alcanzando en el 2007 una producción record de 325 millones de toneladas, con más de la mitad de éstas sembradas en países no desarrollados, convirtiéndose en un valioso producto comercial para miles de agricultores de bajos ingresos y en un cultivo recomendado para garantizar la seguridad alimentaria de los consumidores más vulnerables. (FAO, 2008). En Colombia, por múltiples factores el total de área sembrada y la rentabilidad del cultivo vienen disminuyendo, pasando de más de 160000 hectáreas en el 2004 a menos de 130000 en el 2009, afectado la sostenibilidad de más 100000 familias que dependen de forma directa de este cultivo (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005).

Como en los demás países del área andina, en Colombia, los Fenómenos El Niño o La Niña ocasionan frecuentemente serios problemas en la mayoría de las actividades del sector agropecuario, limitando calidad, productividad y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de las poblaciones más vulnerables (CAF, 2006; CCI, 2010). El incremento generalizado de la temperatura del aire asociado con el calentamiento global podría representar múltiples impactos sobre los sistemas productivos y ambientales, como el aumento en el consumo de agua por plantas y animales, la alteración de ciclos biológicos de diferentes organismos y cambios en la distribución potencial de nichos ecológicos, entre muchos otros. Otro problema serio que tendría que enfrentar la agricultura es el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, muchos de ellos asociados a ciclos de variabilidad climática que se están haciendo progresivamente más recurrentes y agresivos (Bates *et al.*, 2008; IPCC, 2001; Easterling *et al.*, 2000).

La lista cambios en el clima y de posibles sus impactos a largo plazo, así como los sectores y poblaciones potencialmente vulnerables a este tipo de amenazas, aclarando que los efectos sobre la producción y productividad han de variar considerablemente

(IDEAM,2010a; Pabón, 2005). Eventualmente y en función de factores como el nivel tecnológico, la adaptabilidad a condiciones extremas y la resiliencia de los sistemas productivos, muchos de estos sistemas podrían verse beneficiados frente a los desafíos relacionados con alteraciones en las condiciones climáticas.

En este trabajo se busca simular el desarrollo y rendimiento del cultivo de la papa bajo condiciones específicas de la Sabana de Bogotá para diferentes escenarios de variabilidad climática interanual y de cambio climático. De esta forma se desea poder entender los impactos de alteraciones de tipo climático sobre el rendimiento del cultivo ampliando los conocimientos teóricos al respecto y así generar una visión a futuro del impacto del clima en su productividad. Los escenarios de variabilidad climática serán elegidos a partir del estudio y la disponibilidad de las series históricas de las variables climáticas registradas en la zona y los escenarios de cambio climático a corto y largo plazo generados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, serán analizados y utilizados para generar las series de datos diarios necesarios como datos de entrada para las simulaciones.

El uso de herramientas de modelación como alternativa para evaluar el impacto del clima en los cultivos o en general como herramienta de investigación para avanzar en el conocimiento que se tiene de los múltiples aspectos de la producción ha venido desarrollándose significativamente, consolidando una valiosa área de conocimiento que permite obtener resultados que de manera práctica no se pueden conseguir por medio de los experimentos tradicionales (Harpal y Graeme, 2004; Román *et al.*, 2000).El uso de herramientas de simulación dinámica como DSSAT, integrando las salidas de los modelos regionales de clima para evaluar el impacto del cambio climático y la variabilidad climática a escala local, constituye una novedosa metodología de análisis de cultivos que hasta ahora está empezando a ser utilizada en el país, pero que a nivel mundial ha mostrado resultados satisfactorios. Los análisis de resultados de las simulaciones permitirán generar recomendaciones para los productores de papa de la Sabana de Bogotá y para investigadores del sector que contribuirán a mejorar los conocimientos respecto del cultivo y apoyaran la toma de decisiones para disminuir la vulnerabilidad del sector.

Este trabajo parte de la evaluación y calibración del software DSSAT, realizadas en trabajos previos desarrollados en la Universidad Nacional de Colombia. De tal forma que no busca mejorar la precisión del modelo ni evaluar su calibración, sino utilizar el trabajo ya hecho por otros investigadores para integrar los análisis de cambios climáticos a escala local y avanzar en un área de sumo interés para el desarrollo y sostenibilidad de la agricultura nacional y la producción de papa en particular.

1. Marco teórico

1.1 Variabilidad climática

Se refiere a la variación recurrente del clima en tiempos relativamente cortos, que puede presentarse en diferentes escalas temporales, desde la escala intraestacional con un periodo de tiempo de algunas decenas de días hasta la escala interdecadal, donde las fluctuaciones del clima pueden tomar algunas décadas.

1.1.1 Variabilidad climática Intraestacional

Generalmente es el tipo de variación climática menos notorio y su actividad pasa desapercibida porque su amplitud es mucho más pequeña que la amplitud de oscilación de las variaciones climáticas estacionales. Este tipo de variación está asociada a oscilaciones que modifican las condiciones del tiempo por un par de semanas durante una misma temporada seca o de lluvia. En Colombia, este tipo de oscilación intraestacional está asociada en gran medida a una ondulación en el campo de la presión atmosférica que modifica los patrones de actividad convectiva y precipitación en el Pacífico ecuatorial oriental y como consecuencia genera variaciones en la temperatura sobre gran parte del territorio suramericano (Naumann *et al.*, 2007). Esta oscilación es conocida con el nombre de oscilación de Madden - Julian y aunque su estudio en nuestro país es muy reciente, toma gran importancia en el proceso de predicción climática (IDEAM, 2001).

1.1.2 Variabilidad climática estacional

En latitudes tropicales, la variación climática estacional se manifiesta a lo largo del año por la transición entre temporadas húmedas y secas, siendo este tipo de variación un factor de suma importancia para la planeación y desarrollo de muchas actividades humanas, entre las que se destaca notablemente la agricultura. En Colombia la

migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT es la principal responsable de la variabilidad climática estacional (IDEAM, 2001).

ZCIT es la denominación que se da a un cinturón de baja presión que rodea al globo terrestre en la región ecuatorial, formado por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes al norte y sur del Ecuador. Esta convergencia de masas de aire húmedas, provoca una intensa actividad convectiva, generando abundante nubosidad, lluvias y tormentas sobre las zonas por donde pasa. Se puede afirmar que la ZCIT es responsable de las dos temporadas de lluvia cuando pasa por la parte central del país desplazándose hacia el norte y hacia el sur y de las temporadas secas, cuando se encuentra en latitudes más altas, depositando lluvias al norte o al sur del territorio colombiano (IDEAM, 2001).

Una imagen del rango visible del océano Pacífico, permite observar a la ZCIT ubicada ligeramente al norte del ecuador (Figura 1-1).

Figura 1-1: Zona de convergencia intertropical.



Fuente: EarthObservatory Nasa (2011)

1.1.3 Variabilidad climática interanual

En nuestro país con regularidad ocurren cambios en las variables climatológicas año a año. En algunas ocasiones transcurren años con valores de precipitación o temperatura por encima o por debajo de los promedios históricos. En la mayoría de los casos, estas variaciones están relacionadas directamente con el fenómeno llamado El Niño Oscilación del Sur ENOS, aunque también pueden verse moduladas por otros fenómenos como por ejemplo la Oscilación Cuasibienal (IDEAM, 2001).

El fenómeno ENOS es la principal fuente de variabilidad climática interanual en varias partes del mundo (Grimm y Ambrizzi, 2002). Este fenómeno se manifiesta directamente en la costa pacífica colombiana con alteraciones de la temperatura superficial y el nivel medio del mar. De la misma forma, el fenómeno tiene un efecto climático sobre el territorio colombiano que afecta el medio natural en general, y el ciclo hidrológico en particular (CAF, 2006). El fenómeno ENOS es una manifestación del clima terrestre y bajo su influencia el comportamiento normal del sistema océano-atmósfera se interrumpe y condiciones anormales ocurren en todo el mundo. Aunque el ENOS presenta la señal más clara de sus anomalías en las regiones tropicales del Pacífico, tanto en el océano como en la atmósfera, sus manifestaciones son variadas, manifestándose por ejemplo inundaciones en algunas áreas de India y América del Sur, sequías en diversos lugares de Australia oriental, Brasil, África, y América del Norte (Sánchez, 1997).

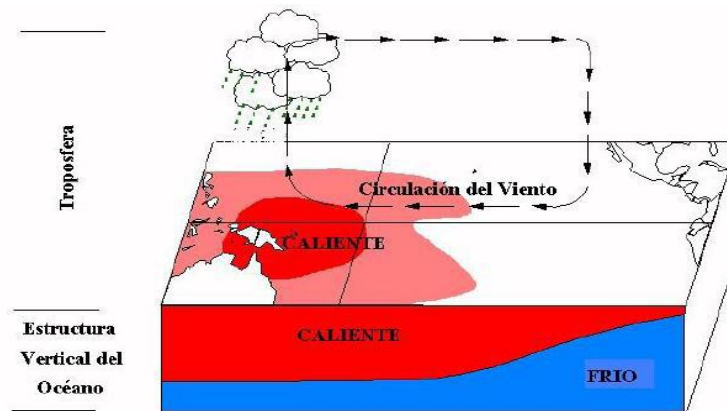
La oscilación ENOS es el resultado del calentamiento-enfriamiento cíclico de la superficie del océano Pacífico. Las variaciones en la temperatura del mar están asociadas con alteraciones en la presión atmosférica al sur del Pacífico. Cambios periódicos en el océano, evidentes mediante correlaciones negativas significativas entre las presiones superficiales en Tahití y Australia conforman lo que hoy se conoce como Oscilación del Sur, de aquí el nombre ENOS (Conde, 2009). El índice de Oscilación del Sur IOS, es uno de los indicadores usados para monitorear la existencia e intensidad de este fenómeno. El IOS fue definido en función de la diferencia de presiones entre dos lugares del Pacífico, Tahití en la Polinesia Francesa y Darwin en Australia (Miranda, 1997), donde se calcularon amplias correlaciones entre el aumento en presión en Darwin, con la disminución de presión en Tahití y viceversa, efecto indicador del fenómeno de calentamiento y enfriamiento del Pacífico.

El indicador más utilizado a nivel mundial para monitorear el estado y la evolución de la oscilación ENOS es el Índice Oceánico El Niño ONI, desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Este índice, que depende de las mediciones de la temperatura superficial del mar TSM en el sector central del Pacífico tropical se calcula como la media móvil de las anomalías superficiales de temperatura del mar durante 3 meses consecutivos. La NOAA (2003), definió la condición El Niño cuando el ONI es igual o mayor a 0,5 por 3 meses consecutivos, y definió un episodio El Niño cuando estas condiciones se mantienen por lo menos durante 5 meses consecutivos (Quispe *et al.*, 2009). De la misma forma, si el ONI toma valores menores de -0,5 por tres meses

consecutivos se configuran condiciones La Niña, pero si estas anomalías se mantienen por mínimo 5 meses consecutivos, se asume que un evento La Niña está presente en el Pacífico.

La cuenca del océano Pacífico tropical es el escenario natural del fenómeno El Niño. En la Figura 1-2, puede observarse como bajo condiciones normales, en esta región los vientos alisios impulsan las relativamente cálidas aguas superficiales del océano ecuatorial, transportándolas de Este a Oeste, dando origen a una acumulación importante de calor en el sector occidental, llamado por algunos autores “piscina caliente del Pacífico” (Enfield *et al.*, 2006), donde el nivel del mar puede estar 50 cm por encima respecto del nivel de la región oriental cerca de América.

Figura 1-2: Condiciones normales en el Pacífico tropical.



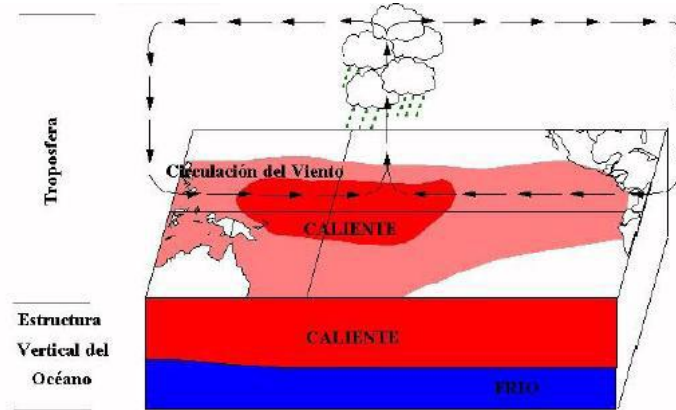
Fuente: Magaña,(2003).

Asociado a este movimiento horizontal de agua hacia el Oeste, frente a la costa suramericana se produce un afloramiento (surgencia) de aguas frías polares ricas en nutrientes que convierten esta costa en una de las regiones de mayor productividad pesquera en el mundo. Por lo tanto, bajo condiciones normales, en la parte occidental del Pacífico las aguas son cálidas, del orden de 29 a 30°C, en marcado contraste con el sector oriental en la costa suramericana donde se concentran aguas relativamente frías, con temperaturas promedio de entre 22 y 24 °C (IDEAM, 2001).

Durante algunos meses, por causas que aún son materia de investigación, los vientos alisios se debilitan y en consecuencia cesa la fuerza de arrastre que la atmósfera

imprime al océano sobre su capa superficial, iniciándose el desplazamiento de las aguas cálidas desde el Oeste hacia el Este en forma de una onda, comúnmente denominada onda Kelvin ecuatorial, que tiene una longitud de varios miles de kilómetros y una amplitud de 20 a 30 cm.

Figura 1-3: Condiciones en el Pacífico tropical durante El Niño.



Fuente: Fenómeno del Niño, la Oscilación del sur y sus impactos en México. O Magaña. 2006.

Esta onda Kelvin, cruza el Pacífico tropical en un lapso de entre 50 a 60 días, hasta llegar a la costa de Suramérica. La presencia de estas aguas anormalmente cálidas en el sector central y oriental del océano Pacífico tropical, es lo que comúnmente se conoce como Fenómeno El Niño.

Si por el contrario, las habituales corrientes del Este se intensifican, la zona ecuatorial del Pacífico cerca a América estará más fría de lo normal, configurándose las condiciones del fenómeno de La Niña. Así pues, las condiciones de La Niña se asemejan a las normales, pero son mucho más acentuadas. Los efectos de La Niña, son en general contrarios a los que produce un evento El Niño, por lo que es posible esperar más lluvia de lo normal en Indonesia y Australia y menos de lo normal en Perú y Ecuador (Conde, 2009).

En promedio, la fase positiva o de calentamiento de la oscilación ENOS (El Niño), se repite entre cada 2 a 7 años, aunque recientes estudios indican un aumento en la

frecuencia de este fenómeno, redefiniendo su periodo entre los 2 y 5 años. La duración promedio del fenómeno es de 12 meses. La fase fría o negativa del ciclo ENOS, La Niña tiende a manifestarse inmediatamente antes o después de El Niño (Kiladis y Díaz, 1989), aunque el evento cálido de 1982-83 fue una notable excepción a esa regla.

Durante La Niña, las altas presiones del anticiclón subtropical se incrementan y se extienden hacia el sur, confinando los vientos Oestes hacia latitudes más altas, permitiendo una intensificación de los Estés en latitudes tropicales, con el consiguiente desplazamiento hacia el polo de la actividad frontal asociada con las lluvias de invierno. Estas condiciones son favorables para la sequía en la zona central de Suramérica (Rutllant, 2004). El enfriamiento del océano relacionado con el fenómeno La Niña es recurrente, aunque no periódico y en términos generales, se presenta una o dos veces por década. Desde finales de la década de 1970 hay una menor frecuencia de condiciones frías en el Pacífico tropical y una mayor tendencia a la ocurrencia de fenómenos cálidos. Comparativamente, El Niño ha sido más frecuente que La Niña, ya que desde 1935 se han presentado siete episodios La Niña en contraste con 13 fenómenos El Niño (IDEAM, 2001).

1.1.4 Efectos del fenómeno ENOS en Colombia

El efecto climático de esta oscilación depende de la época del año en que se presenta la fase extrema del fenómeno y el impacto socioeconómico está más relacionado con la vulnerabilidad de los diferentes países, regiones o de los sectores socio-económicos afectados, teniendo en cuenta que el nivel de impacto aparte de la vulnerabilidad es función de la intensidad del fenómeno y de su duración. En Colombia, se evidencian más claramente los impactos de La Niña, debido al ostensible incremento de desastres por fenómenos hidrometeorológicos, especialmente inundaciones y deslizamientos (Comunidad Andina, 2009). Durante el episodio de enfriamiento del año 1999 se registraron diez veces más desastres que los ocurridos durante el evento El Niño 1997-98, que fue uno de los eventos El Niño más intensos.

En Colombia, no se puede catalogar el efecto climático de la fase fría totalmente opuesto al observado durante la fase cálida. Durante La Niña, se ha hecho evidente el descenso de la temperatura del aire durante las horas del día en la región Pacífica, el centro, sur y

nororiente de la región Andina, la parte media y nororiental de la región Caribe, así como en áreas muy localizadas de Arauca. Aumentos en la temperatura del aire solo se han observado en sectores aislados del piedemonte llanero. En relación con alteraciones en el patrón de pluviosidad del país a causa del fenómeno de La Niña, es importante mencionar los excedentes de precipitación entre un 20 y 40% de los valores normales que se registran en forma muy localizada en áreas del nororiente, centro y sur de la región Andina y el nororiente de la región Caribe. Núcleos muy puntuales de excedentes severos mayores al 40% se registran en la Guajira, el norte de Magdalena, los Santanderes, Cundinamarca y sectores fronterizos entre Tolima y Valle (IDEAM, 2001).

El fenómeno El NIÑO tiene diversos efectos relacionados con la variabilidad climática y oceánica, que tienen finalmente repercusiones sobre las diferentes actividades económicas y sobre la población del país en general. De todos los eventos El Niño, el ocurrido entre los años 1997-98 ha sido el más ampliamente documentado, ya que fue el de mayor intensidad y amplitud espacial que haya sido registrado. En esta ocasión el calentamiento sobre el océano Pacífico central generó aumentos de temperatura superficial del mar, tan considerables que el índice ONI se mantuvo por encima de los 1,5°C durante nueve meses seguidos, llegando a alcanzar incluso valores de 2,5°C (CPC, 2011). El evento de 1991-92 también causó un impacto muy significativo sobre el país, pero en este caso no relacionado directamente con su intensidad, sino con su persistencia temporal, pues se extendió por 15 meses y su ocurrencia tuvo lugar antes de una temporada neutra, con valores positivos del ONI durante 21 meses consecutivos, que fue seguida de otro evento El Niño que tuvo una duración de 11 meses. Cabe citar también en cuanto a intensidad los eventos El Niño ocurridos en 1982-83 y en 1986-88.

Estas condiciones climáticas generaron en Colombia fenómenos como oleadas de calor con registros históricos de temperaturas máximas, alteración en la frecuencia de heladas, sequías e incendios de cobertura vegetal. Según estudios del IDEAM (2001), se han hecho evidentes incrementos en la temperatura del aire, entre 0,2 y 0,5°C para la mayor parte del país, superando este valor en la costa atlántica y en amplias zonas de las regiones Andina y Pacífica. En el caso de la precipitación, la afectación del fenómeno El Niño, ha presentado un carácter un poco más aleatorio, generando déficit de precipitación de hasta el 40% en los valores mensuales de lluvia, en sectores de la región Caribe y Andina, llegando a disminuciones aún más severas en la Guajira, el Altiplano

Cundiboyasence y los Santanderes, con un marcado contraste con regiones de los llanos orientales, la Amazonía y la costa pacífica donde se presentaron en cambio aumentos en la precipitación. En algunas regiones se registraron lluvias intensas, que desencadenaron deslizamientos e inundaciones, que no cubrieron grandes territorios como en el caso de la temperatura pero con efectos de gran magnitud (CAF, 2006).

En el caso de las anomalías en la ocurrencia de heladas, hay que aclarar que generalmente durante la presencia de condiciones cálidas en el Pacífico, se incrementa la frecuencia en la ocurrencia de este fenómeno en los altiplanos del territorio colombiano, efecto asociado con la disminución de humedad atmosférica que permite un enfriamiento radiactivo extremo de la superficie terrestre. En el caso del evento de 1997-98 el número de heladas disminuyó. Posiblemente, la baja ocurrencia de heladas en los altiplanos, pudo haber sido propiciada por que durante este fenómeno hubo presencia de nubosidad estratificada en horas de la noche, que en cierto grado pudo haber impedido el escape excesivo del calor acumulado durante el día y controlado el enfriamiento nocturno de la superficie del suelo (IDEAM, 2008). Respecto a la sequía, el déficit generalizado de las precipitaciones durante casi 12 meses del evento El Niño 1997-98, generó condiciones de sequía en gran parte del territorio colombiano. Los niveles y caudales de los ríos en el mes de enero de 1998 registraron los valores más bajos de los últimos 50 años. En términos generales, de 1160 municipios, 100 presentaron déficit extremo de precipitación, 861 presentaron déficit, 67 régimen ligeramente deficitario y solo en 42 municipios se presentaron condiciones normales. Según estos datos, las condiciones de sequía dominaron cerca del 90% del territorio colombiano (CAF, 2006). El impacto de los eventos El Niño, puede ser evidenciado en muchos sectores económicos del país como son, el sector de servicios afectando la disponibilidad de agua potable y la generación de electricidad, el sector salud, el sector de transportes, sobre todo marítimo y fluvial, el sector productivo, donde se ve afectación en agricultura, ganadería e industria, y en otros sectores como incendios forestales y atención de emergencias.

1.1.5 Impactos del fenómeno ENOS en la Sabana de Bogotá

Hay evidencias de que los fenómenos El Niño y La Niña tienen un efecto climático marcado en diferentes sectores de la Sabana de Bogotá. Pabón y Torres (2007), encontraron que tal efecto se expresa en una reducción de la precipitación en la Sabana

de Bogotá bajo condiciones El Niño, mientras las condiciones frías de La Niña ocasionan aumentos de los volúmenes de precipitación en esta región. Este efecto también altera el comportamiento de la temperatura del aire, pues bajo condiciones de El Niño se registra un notable aumento de los valores medios mensuales, caso contrario durante la fase negativa. Bajo condiciones climáticas de altas precipitaciones inducidas por el fenómeno de La Niña, se observaron deslizamientos en zonas de alta pendiente de los cerros orientales e inundaciones en las partes bajas, principalmente en las zonas ribereñas de los ríos Bogotá, Tunjuelo y San Cristóbal. Por la disminución de temperaturas se observan impactos en la biodiversidad y ecosistemas, en la salud humana por aumento de enfermedades respiratorias, anegamiento de terrenos y aumento en los precios de productos a los consumidores por reducciones en los rendimientos de productos como papa y leche, además de los efectos destructivos sobre la infraestructura vial por deslizamientos y en la infraestructura eléctrica urbana y rural, provocados por el aumento de las precipitaciones (Pabon y Torres, 2007).

1.1.6 Impactos del fenómeno ENOS sobre la agricultura

Como en los demás países del área Andina, la presencia del Fenómeno El Niño en Colombia ocasionó serios problemas en la mayoría de las actividades del sector agropecuario. El impacto sobre los sistemas agrícolas se expresa en forma diferencial sobre el territorio nacional en función de la intensidad de los efectos climatológicos del fenómeno en el ámbito regional y local y con relación a las vulnerabilidades específicas agroecológicas, donde las condiciones del suelo son determinantes, así como las diferencias en los sistemas de producción, en los ciclos de vida de los cultivos y las especies animales bajo producción (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 1997). El nivel tecnológico, la disponibilidad de sistemas de riego e infraestructura de soporte a la producción y del manejo poscosecha, entre otros son factores altamente importantes. Sin embargo, aun considerando tales diferencias, se puede afirmar que en el país imperan condiciones de sequía y aumentos de temperatura generalizados, cuando se presenta un evento El Niño cuyos efectos directos se reflejan principalmente en la reducción de los rendimientos agropecuarios, que según cálculos realizados por el Ministerio de Agricultura es cercana al 5% en el rendimiento agrícola (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009). El impacto es ligeramente mayor en los cultivos permanentes (5,5%), frente a los transitorios (4,4%), además de retrasos en las épocas de siembra,

reducción e incluso abandono de áreas de cultivos, la elevación de los costos de producción y el incremento coyuntural en el precio de los alimentos (CAF, 2006).

Cabe también mencionar que el déficit de lluvias y las variaciones en el inicio de las temporadas húmedas, ocasiona incrementos en problemas fitosanitarios que conllevan a la reducción de rendimientos agrícolas e incrementos en los precios de producción. Por otra parte el déficit de lluvia genera pérdida en la cobertura vegetal y aceleran la erosión en suelos áridos. Adicional a esto los excesos de lluvia en zonas aisladas combinadas con altas temperaturas favorecen el desarrollo de plagas y enfermedades, problemática que induce a la utilización de más agroquímicos, aumentando los costos de producción y contribuyendo a la contaminación de suelos y agroecosistemas. En general situaciones de estrés hídrico se observan en buena parte del territorio nacional, sobretodo en la costa Atlántica y en la región Andina, donde la reducción de la humedad en el sistema suelo-vegetación, afecta en mayor medida a los cultivos de secano (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2009).

Hay que citar también que se han presentado efectos positivos en aquellos procesos productivos que se han visto favorecidos con un mayor rendimiento gracias a las condiciones climáticas predominantes, como en el caso de la caña de azúcar, los cítricos y el algodón en algunas zonas de la costa Atlántica, o como en el caso del cacao, cultivo en el que se ha observado disminución en la incidencia de enfermedades asociadas con la reducción de las precipitaciones y la humedad (CAF, 2006).

Cuando el fenómeno cubre períodos de dos años consecutivos, se ha observado que el impacto negativo sobre los cultivos del Fenómeno del Niño es más marcado durante el segundo año.

1.1.7 Impactos de los eventos ENOS en el cultivo de la papa

Según Retana (2000), los eventos ENOS pueden en algunos casos influir positivamente sobre la producción y el rendimiento del cultivo de papa, sobre todo si la distribución anómala de precipitación permite satisfacer cómodamente los requerimientos hídricos del cultivo, aunque en general los cultivos transitorios de secano se ven muy afectados por el fenómeno de El Niño. La disminución en nubosidad sobre los cultivos de secano permite que la luz solar incida sobre ellos, incrementando la evapotranspiración, llegando a

causar daños irreversibles en el ciclo vegetativo, además de incrementar la demanda hídrica y generar aumentos considerables en el ataque de plagas como la polilla guatemalteca.

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009), la superficie cosechada de cultivos transitorios se ve reducida ante la inminencia del fenómeno El Niño. En el caso de la papa, la reducción de área sembrada para el evento de 1997-98 fue de alrededor del 4%. Según el Banco de la República, el cultivo de papa ocupó el sexto lugar entre los cultivos más afectados por el fenómeno del Niño entre los años 1970-1996 (Banco de la República, 2006).

1.2 El cambio climático

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante un período de tiempo prolongado, por lo general varias décadas (IPCC, 2007). Este cambio del clima es atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y de la superficie terrestre (UNFCCC, 2000), generando alteraciones en los balances de masa y energía del sistema climático.

El calentamiento global se refiere al aumento progresivo de la temperatura media del aire a escala planetaria, que puede alterar el patrón climático global, motivo por el cual este término se asocia frecuentemente con el cambio climático (EPA, 2010). El aumento de la temperatura del aire inevitablemente causará cambios en el régimen de precipitación, debido a una alteración del ciclo hidrológico, que podría representar mayores impactos en los humanos y sistemas ambientales que los mismos cambios en la temperatura (McElwain y Sweeney, 2003). Claras evidencias del calentamiento del sistema climático como aumentos en el promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar muestran que no hay duda que estamos presenciando un proceso de cambio climático (IPCC, 2007).

Un incremento de la temperatura media a escala global de aproximadamente 0,15°C por década en las últimas tres décadas del siglo pasado ha sido ampliamente documentado (Jones *et al.*, 2001), así como también se han detectados aumentos globales en las precipitaciones en estos mismos periodos (Nicholls *et al.*, 1996). También han sido

detectados aumentos en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como ondas de calor y sequías, intensas precipitaciones que han llegado a generar inundaciones, tornados y huracanes, y otros eventos muchas veces de carácter catastrófico en diferentes regiones del mundo (Easterling *et al.*, 2000; IPCC, 2001).

Los aumentos de temperatura y cambios en los patrones de precipitación son aspectos del cambio climático de especial interés, que influyen en forma determinante en la producción de alimentos. Registros de observaciones y las proyecciones climáticas proporcionan pruebas inequívocas de que las fuentes de agua dulce son altamente vulnerables y potencialmente pueden verse afectadas por el cambio climático, con graves consecuencias para las actividades humanas y los ecosistemas (Bates *et al.*, 2008).

El cambio en la estructura de la atmósfera por la acumulación de Gases de Efecto Invernadero GEI (IPCC, 2007), en su gran mayoría provenientes de actividades humanas rompe el equilibrio radiativo del sistema climático, ya que una mayor cantidad de partículas con capacidad absorber y reenviar la radiación hacia la superficie terrestre estará presente, reforzando el efecto de invernadero natural y aumentando la temperatura global (IDEAM, 2007). Estos cambios en la estructura de la atmosfera son utilizados como patrón de referencia y evaluación para determinar las implicaciones de la intervención antrópica a escala global. Existe otra serie de factores que pueden llegar a ser muy impactantes sobre la transformación de los ecosistemas, también asociados con la intervención antrópica sobre la naturaleza, como son los cambios en la cobertura de la superficie terrestre, que alteran el balance de masa y energía entre la superficie terrestre la y atmosfera, originando un desequilibrio en las condiciones climáticas. Estas transformaciones de la cobertura del suelo, asociadas principalmente con la deforestación, actividades agrícolas, minería y urbanización, provocan una dinámica del clima local más heterogénea, aumentando la sensibilidad frente a fenómenos de variabilidad o cambio climático (Rodríguez *et al.*, 2010). En síntesis, los cambios en las condiciones climáticas no obedecen solamente a patrones globales, sino que son fuertemente influenciados por características locales como orografía, vegetación y cambio de uso del suelo.

1.2.1 Escenarios de cambio climático

El sistema climático es sumamente complejo, por consiguiente no existe una manera única ni determinante de prever de qué manera el clima del planeta cambiara (UNFCCC, 2003). La respuesta futura del sistema climático depende del nivel de transformación de cada componente, es decir que cambios en la estructura de la atmósfera, en la cobertura del suelo, en los cuerpos de agua, hielo, y en los océanos, y las interacciones entre estos elementos determinarían el comportamiento futuro del clima de la tierra. A su vez, los cambios en estos componentes dependen de múltiples actividades humanas presentes y futuras. Según el IPCC (2007), aun cuando las concentraciones de los GEI y aerosoles se hubiesen mantenido en niveles similares a los del año 2000 un calentamiento superior a 0,1°C por década ocurrirá durante los próximos 20 años. Las emisiones futuras de GEI dependerán de tendencias demográficas, económicas, tecnológicas y sociales a escala global, pero en todo caso, los modelos del ciclo del carbono proyectan que para el año 2100, las concentraciones de dióxido de carbono aumentarían entre un 75% a un 350% respecto a las condiciones preindustriales, mientras que las concentraciones de metano y óxido nitroso podrían aumentar hasta un 120% y un 47% respectivamente. Estos aumentos, dependen también de la forma en que las sociedades futuras respondan a la introducción de políticas sobre el cambio climático y a los compromisos internacionales que podrían reducir ligeramente las tasas de crecimiento de emisiones (UNFCCC, 2003).

El IPCC en el año 2000 publicó un conjunto de escenarios de emisiones para ser usado como referencia en estudios de cambio climático. Cada escenario constituye una descripción verosímil, simple y coherente del clima futuro construida a partir de proyecciones climáticas, que asumen cierto tipo de suposiciones respecto a la dinámica futura de los elementos climáticos. Todos los escenarios son igualmente válidos y carecen de probabilidades asignadas de hacerse realidad (IDEAM, 2007). Los escenarios de emisión están definidos en cuatro líneas evolutivas divergentes, cada una representando diferentes opciones de desarrollo demográfico, social, económico, tecnológico y ambiental (IPCC, 2007).

Las cuatro líneas evolutivas combinan dos conjuntos de tendencias opuestas: el primero, un mundo que se desarrolla bien sea entre fuertes intereses económicos o intereses de tipo ambientalista, y un segundo conjunto que varía, entre el desarrollo global y regional. Las líneas evolutivas pueden resumirse de la siguiente forma (IPCC, 2007):

- A1: un futuro con un crecimiento económico muy acelerado, la población global tiene un pico de crecimiento hacia mediados de siglo, con una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.
- A2: un mundo muy heterogéneo con un incremento continuo de la población mundial y un crecimiento económico orientado regionalmente, más fragmentado y lento que en las otras líneas evolutivas.
- B1: un mundo más homogéneo, con la misma población que la línea evolutiva A1, pero con cambios económicos orientados a una economía de servicios e información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento más eficaz de los recursos. En esta línea se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima (IDEAM, 2007).
- B2: describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En total, fueron desarrollados 40 escenarios para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima, enmarcados dentro de cuatro líneas evolutivas (IPCC, 2007). Estos escenarios, sirven de referencia para la modelación de las condiciones del clima a futuro.

1.2.2 Cambio climático en Colombia

La información a escala local de los posibles impactos del cambio climático es muy importante para direccionar las acciones de investigación en el tema, así como para el diseño de medidas de adaptación y mitigación (Fundación Biodiversidad, 2009), que no

pueden ser desarrolladas solamente en función de los escenarios de cambio climático generados por los modelos de circulación general GCM de la atmósfera que por su bajo nivel de resolución espacial no pueden percibir particularidades locales y además su nivel de confianza para zonas fisiográficamente complejas no es demasiado alto.

De acuerdo con la amplia diversidad de las condiciones climáticas del país, debida a factores como la posición geográfica en la zona ecuatorial, la compleja orografía, la cobertura selvática y la influencia de los océanos etc., es de esperarse que el impacto de los cambios de orden global no sea en principio homogéneo, sino más bien determinado por condiciones locales, entre las cuales sobresalen los cambios en el uso del suelo provocados por la intervención del hombre en los ecosistemas. Dentro de esta problemática de la intervención antrópica en los ecosistemas de Colombia, sobresalen la ampliación de la frontera agrícola, la consecuente destrucción de bosques y ecosistemas paramunos, la deforestación, la pérdida de biodiversidad y el aumento de emisiones de dióxido de carbono (IDEAM, 2005).

La tendencia lineal de cambio para el periodo 1971-2000, calculada con las series de tiempo de observaciones en tierra complementadas con modelos de circulación atmosférica de alta resolución, muestra un aumento cercano a $0,1^{\circ}\text{C}$ por década en la temperatura media para el territorio nacional, con aumento y disminución en las precipitaciones para diferentes zonas del país (IDEAM, 2010a). Pabón (2005), afirma que la precipitación anual se reduciría en algunas regiones y aumentarían en otras. Las regiones en las que hay cierto grado de coincidencia en los resultados de los modelos y las tendencias actuales indican aumentos de temperatura en la región Pacífica, el Magdalena medio, la Sabana de Bogotá, el Piedemonte Llanero y algunas regiones de los llanos orientales y la Amazonía, con incrementos en las lluvias que podrían alcanzar hasta un 15% y 25% para los años 2050 y 2080. Para las demás regiones, los distintos modelos presentan resultados divergentes respectivamente.

Los GCM mostraron aumentos de temperatura del aire de entre 2 y hasta 4°C bajo distintos escenarios. El aumento de temperatura conllevará a la reducción de glaciares de montaña y a su desaparición hacia la primera mitad del siglo XXI. El calentamiento de la atmósfera contribuirá al aumento de la evaporación y de la evapotranspiración con lo que se afectaría el ciclo hidrológico. La reducción de la precipitación en algunas zonas de las regiones Andina y Caribe incidirá directamente en la reducción de los caudales de los

ríos, con impactos en el desabastecimiento de agua para consumo humano y las actividades agropecuarias y energéticas (IDEAM, 2010a).

Los estudios del IDEAM (2009) muestran aumentos en la temperatura máxima media y temperatura mínima media alrededor de 0,11 y 0,13°C por década para el departamento de Cundinamarca y de 0,09 y 0,04°C por década para Boyacá. En la variable precipitación, la tendencia aunque es menos clara muestra disminución para ambos departamentos. Es importante tener en cuenta que el nivel de confianza de estas estimaciones para el Altiplano Cundiboyacense es menor al 85%. Análisis de tendencias para esta misma zona fueron realizados usando el software Rclimdex y análisis de regresión lineal (IDEAM, 2009), mostrando tanto aumentos como disminuciones en los valores de temperaturas máximas y mínimas y en la precipitación, así como zonas donde no se detectan cambios significativos.

1.2.3 El Cambio climático y la agricultura

El incremento generalizado de la temperatura del aire podría tener diferentes impactos sobre los sistemas productivos y ambientales, como el aumento en el consumo de agua por plantas y animales, la alteración de ciclos biológicos de diferentes organismos y cambios en la distribución potencial de nichos ecológicos, entre muchos otros (Rojaset *al.*, 2011). Estos problemas pueden ser aún más graves teniendo en cuenta el deterioro de los ecosistemas, en especial los de páramo y las fuentes de agua, que como se mencionó anteriormente son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático. Algunos de estos impactos ya han sido reportados en el país, como la migración altitudinal de plagas como la garrapata, que fue detectada en altitudes por encima de los 2900 msnm (Cortés *et al.*, 2010), donde su desarrollo según Evans (1978) no era posible. La disminución de las temperaturas mínimas en algunas zonas, principalmente aquellas donde la transformación del suelo ha sido más intensa, podría representar un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos de heladas, uno de los principales problemas que afronta la agricultura de clima frío, afectando los rendimientos, la rentabilidad de los cultivos y la ganadería, y frecuentemente ocasionando pérdidas considerables en la producción de hortalizas, frutas, flores, papa, maíz y pastos para el ganado entre otros (CCI, 2010). Por el contrario, aumentos en las temperaturas de las noches pueden incidir también negativamente, acelerando el metabolismo de las plantas, incrementando la tasa

de respiración y finalmente ocasionando pérdidas en la calidad y productividad de los diferentes cultivos (Alpí y Tognoni, 1991). En este tema se adelantan varias investigaciones en diferentes países (Jarrod *et al.*, 2010; Gawander, 2007).

Otro problema serio que tendría que enfrentar la agricultura es el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, muchos de ellos asociados a ciclos de variabilidad climática que se están haciendo progresivamente más recurrentes y agresivos. Todos los problemas anteriores deben ser abordados en el contexto de una incesable demanda de alimentos para una población que crece día a día. La lista de posibles impactos de cambios en el clima es larga, así como los sectores o poblaciones potencialmente vulnerables a este tipo de amenazas, sin embargo, los efectos sobre la producción y productividad han de variar considerablemente. Algunas regiones agrícolas se verán amenazadas por el cambio climático, mientras que otras podrían extraer beneficios, relacionados con la disminución en la frecuencia de heladas, mayores concentraciones de dióxido de carbono, y aumentos de temperatura que podrían impulsar la productividad, siempre que estas condiciones no se relacionen con escases de agua. En otras regiones, áreas que no eran aptas para actividades agrícolas por las bajas temperaturas en épocas de invierno o por reducidas temporadas de siembras, progresivamente pueden ser útiles para diversos tipos de cultivos (IPCC, 2007).

Un beneficio sumamente importante que podrían tener todos los sistemas agrícolas a nivel mundial, que no está relacionado directamente con cambios en las condiciones climáticas, pero sí con la problemática del cambio climático, se refiere a que todas las medidas de adaptación y mitigación frente a los impactos del cambio y la variabilidad climática impulsadas por políticas nacionales e internacionales relacionadas con diferentes aspectos como la planificación y ordenamiento del uso de la tierra, la gestión y preservación de fuentes agua y suelos, la programación de las siembras y prácticas agrícolas más limpias y sostenibles ambiental y socioeconómicamente, la investigación y adopción de tecnologías relacionadas con el uso de cultivos y variedades tolerantes y mejor adaptadas serán eficaces y altamente benéficas para el desarrollo de la agricultura principalmente en los sistemas productivos más vulnerables, aun cuando los impactos de cambio climático no ocurrieran de la manera en que se espera.

1.2.4 El Cambio climático y el cultivo de papa

Los impactos que puedan tener los cambios en las condiciones climáticas sobre los cultivos dependerán de múltiples factores y están relacionados directamente con la vulnerabilidad y capacidad de adaptación de los sistemas de producción frente a los cambios mencionados. Estos impactos probablemente conducirán a una disminución de la productividad de los cultivos, pero con diferencias muy grandes entre unas regiones y otras.

Los incrementos de la temperatura atmosférica aumentarán transpiración y demanda hídrica de las plantas, por lo que en aquellas zonas paperas secas y sin acceso a riego se esperarían serios problemas de estrés hídrico y disminuciones en los rendimientos, que incluso pueden conducir a la inviabilidad del cultivo. Algunas zonas, principalmente de altas altitudes y latitudes, pueden verse beneficiadas por los aumentos de temperatura, que harán aptas para el cultivo tierras en las que anteriormente el cultivo era inviable. En estas nuevas tierras, serán necesarios análisis del impacto ambiental en suelos y páramos, para entender la tolerancia de las plantas a los altos niveles de radiación ultravioleta y desarrollar el cultivo de una forma ambientalmente sostenible.

Reddy y Hodges (2007) afirman que aunque los aumentos en los niveles de dióxido de carbono por si solos pueden aumentar los rendimientos de algunos cultivos como la papa, tal como lo muestran diferentes experimentos en condiciones controladas, cuando en campo se combinen con aumentos de temperatura, de radiación o con deficiencias hídricas, la fertilización por aumentos de CO₂ puede resultar no ser tan favorable.

En algunas regiones podría aumentar la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de papa en relación con el cambio climático. Es de esperarse que diferentes plagas o enfermedades como el tizón tardío, migren a zonas que anteriormente eran seguras ya que se configuran las condiciones climáticas favorables para su aparición y desarrollo (CIP 2001).

1.3 El Clima y el cultivo de papa

1.3.1 Origen de la papa

Basándose en la biología evolucionista y apoyado en investigaciones serológicas, morfológicas y citológicas, Hawkes (1989) afirma que todas las especies primitivas de papa *Solanum tuberosum*, se encuentran confinadas en México, el suroccidente de los Estados Unidos y Guatemala, pudiendo ser esta área el origen de las especies silvestres de papa (Ochoa, 1999). De acuerdo con la hipótesis de Vavilov (1951), el lugar o centro de origen de una especie cultivada coincide con el área en donde la población de dicha especie presenta la máxima variabilidad genética, así como un marcado endemismo fitogeográfico. La mayor variabilidad de especies de papa cultivadas está presente en las altas regiones montañosas comprendidas entre el Cuzco y el Lago Titicaca, al sudeste del Perú. En este orden de ideas, esta región podría considerarse como el centro de origen del cultivo de la papa (Montaldo 1984).

La papa pertenece a la familia de las solanáceas y su nombre científico es *Solanum tuberosum* L, nombre con el que fue registrada por primera vez en 1596 por Gaspar Bauhin en *Phytopinax* y luego adoptada por Carlos Linneo en 1753 en *Species Plantarum*. Las variedades conocidas como “papa de año” en Colombia, corresponden a *Solanum tuberosum* L. subespecie *Andigena*, y las variedades “papa criolla” pertenecen a la especie *Solanum phureja*.

1.3.2 La planta de papa

La papa es una dicotiledónea herbácea con hábitos de crecimiento rastrero o erecto, generalmente de tallos gruesos y leñosos, con entrenudos cortos. Su crecimiento promedio es de un metro y produce un tubérculo con tan abundante contenido de almidón que ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz. La papa pertenece a la familia de floríferas solanáceas, del género *Solanum*, formado por otras mil especies por lo menos, como el tomate y la berenjena. La especie *S. tuberosum* se divide en dos subespecies apenas diferentes, la *Andigena*, adaptada a condiciones de días breves, cultivada principalmente en los Andes, y *tuberosum*, la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo y se piensa que desciende

de una introducción en Europa de papas *Andígena*, posteriormente adaptadas a días más prolongados (FAO, 2008).

Por encima del suelo, se encuentran los tallos y las hojas, que son los órganos de los cuales depende la fotosíntesis de la planta, ya que su tamaño y forma determinan la capacidad de la planta para sintetizar carbohidratos para su crecimiento y desarrollo de los tubérculos. También se encuentran las flores y frutos, que solo tienen importancia en el mejoramiento genético para la creación de nuevas variedades, pues en el cultivo comercial solo se utilizan los tubérculos o trozos de tubérculos más grandes como semilla para las nuevas cosechas.

Por debajo del nivel del suelo se encuentran los estolones, que son tallos laterales a partir de los cuales se forman los tubérculos que son tallos modificados para el almacenamiento de reservas, principalmente de almidón y finalmente las raíces adventicias responsables de la absorción del agua y nutrientes desde el suelo y del anclaje de la planta.

La papa es altamente susceptible a heladas y crece bien en climas fríos o templados. Requiere una estación de crecimiento con un largo mínimo de 3 a 4 meses, en la que las temperaturas no sean demasiado altas, ni demasiado bajas. En las regiones frías se cultiva durante el verano y durante el invierno en las regiones cálidas. Cerca del ecuador, donde no existe estación fresca a nivel del mar, las papas con frecuencia se plantan en áreas de elevada altitud (Aldabe y Dogliotti, 2006), en general más arriba de los 2000 msnm. Debido a su baja densidad radicular, es una especie de alta respuesta a la aplicación de fertilizantes, ya que presenta una gran demanda de nutrientes primarios como nitrógeno, fósforo y potasio, además de otros secundarios como calcio, magnesio y azufre y una serie de micro elementos como boro, zinc, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y cloro (Sierra, 1993).

1.3.3 El tubérculo

El tubérculo de la papa es el producto final del proceso de crecimiento y desarrollo de la planta y al mismo tiempo el punto inicial de una nueva planta. La planta de papa está potencialmente capacitada para producir tubérculos a partir de sus estolones o de las yemas axilares, cuando percibe del ambiente señales de que se aproxima el invierno o la

estación desfavorable para el crecimiento, siempre y cuando la planta se encuentre en un ambiente apropiado para la inducción primero y para el desarrollo del tubérculo después. Las hojas compuestas de la planta de papa producen el almidón que se desplaza hacia la parte final de los tallos subterráneos, también llamados estolones. Estos tallos sufren en consecuencia un engrosamiento y así se producen hasta 20 tubérculos cerca de la superficie del suelo. El número de tubérculos que llegan a madurar depende de la disponibilidad de humedad y nutrientes del suelo. El tubérculo puede tener formas y tamaños distintos y por lo general llega a pesar hasta 300 gramos.

Al terminar el período de crecimiento, las hojas y tallos de la planta se marchitan y los tubérculos se desprenden de los estolones. A partir de este momento, los tubérculos funcionan como depósito de nutrientes que permiten a la planta subsistir en el frío y posteriormente reverdecer y reproducirse. Cada tubérculo tiene de 2 hasta 10 brotes laterales ("ojos"), distribuidos en espiral en toda la superficie de los que brotan las nuevas plantas cuando las condiciones vuelven a ser favorables (FAO, 2008). Recién cosechado un tubérculo contiene un 80% de agua y un 20% de materia seca, la mayoría almidón. El contenido de proteína de la papa es análogo al de los cereales y es muy alto en comparación con otras raíces y tubérculos. Las papas tienen abundantes nutrientes, sobre todo vitamina C, acumulada en su piel. Además contienen una cantidad moderada de hierro, pero el gran contenido de vitamina C fomenta la absorción de este mineral. Como alimento, este tubérculo tiene vitaminas B1, B3 y B6, y otros minerales como potasio, fósforo y magnesio, así como folato, ácido pantoténico y riboflavina. También contiene antioxidantes alimentarios, los cuales pueden contribuir a prevenir enfermedades relacionadas con el envejecimiento y además contiene fibra, cuyo consumo es bueno para la salud (FAO, 2008).

1.3.4 Fases de desarrollo vegetativo del cultivo de la papa

El desarrollo de la planta empieza a partir del desarrollo de los tubérculos usados como semilla, que tienen una alta concentración de inhibidores del crecimiento que impiden que las yemas broten. La relación entre inhibidores y promotores del crecimiento va variando gradualmente, de acuerdo con la variedad y las condiciones ambientales a las que estén almacenados, pasando por etapas de dormancia y brotación apical en un proceso que puede tomar varios meses. En el estado de brotación, la yema apical comienza a brotar y si en este periodo, los tubérculos son plantados y cuentan con

buenas condiciones de humedad y temperatura, la yema apical crecerá y se desarrollará rápidamente, produciéndose por cada tubérculo semilla un solo tallo, que luego se ramificará intensamente. Si los tubérculos no son plantados durante esta etapa, las demás yemas empezaran su desarrollo entrando a un estado de brotación múltiple, en el que de realizase la siembra, los tubérculos dan origen a varios tallos cada uno, generando una densidad de siembra mucho mayor que en el estado de brotación apical. Si aun no se realiza la siembra, el número de inhibidores de crecimiento va disminuyendo a la vez que aumenta la actividad metabólica y los tubérculos perderán calidad como semilla (Aldabe y Dogliotti, 2006).

Después de la plantación o aun antes, el tubérculo semilla, desarrolla brotes y raíces. Si el tubérculo semilla ha desarrollado brotes antes de plantación, formara inmediatamente raíces y la emergencia se acelera. La humedad del suelo es necesaria para la formación de raíces y el temprano crecimiento de la planta. Baja humedad y baja temperatura retrasan la emergencia. Después que la emergencia ocurre, la parte aérea y las raíces se desarrollan simultáneamente. El crecimiento de los tubérculos puede partir lentamente de 2 a 4 semanas después de la emergencia y continúa en forma constante a través de un largo periodo. En las primeras etapas del desarrollo el crecimiento de la planta es sostenido por las reservas acumuladas en el tubérculo. La gran cantidad de reservas que este contiene permite que en condiciones óptimas de temperatura la expansión del área foliar sea muy rápida. Al irse consumiendo las reservas y aumentando el área foliar fotosintéticamente activa, está pasa a ser la fuente principal de asimilados. El cultivo de papa en condiciones óptimas de crecimiento puede llegar a cubrir totalmente el suelo 40 o 45 días después de la emergencia. Un excesivo desarrollo de follaje está relacionado con un desarrollo tardío de tubérculos, mientras que el desarrollo temprano presenta un follaje menos abundante (Contreras, 2009).

El crecimiento del follaje es el resultado de la ramificación y aparición de las hojas, así como del crecimiento de cada una de ellas. La cantidad de ramificaciones y por lo tanto el número de hojas que se produzcan depende de la duración del período de aparición de hojas y de la tasa de aparición de las mismas, proceso que está relacionado directamente con la temperatura. Cuando los tallos principales de la planta tienen un desarrollo suficiente, las yemas subterráneas del tallo que están más cerca del tubérculo madre brotan originando los estolones. Estos tallos subterráneos crecen en longitud

hasta que reciben estímulos para iniciar la tuberización. Al iniciar la tuberización cesa el crecimiento en longitud y se ensancha la región subapical del estolón. En el inicio se agranda solamente la región subapical de la punta del estolón. En este estado, por la considerable expansión radical del tubérculo, la punta en forma de gancho del estolón se endereza y la yema apical del estolón queda situada en la posición terminal del tubérculo joven. En esta fase, todo el proceso fotosintético debe traducirse en acumulación de hidratos de carbono en los tubérculos, y en proveer la energía para la respiración, lo que se traduce en un incremento del tamaño de los tubérculos. La producción en este periodo, está determinada por la fotosíntesis por unidad de área foliar, la radiación, la tasa de respiración del cultivo, la concentración de dióxido de carbono en las hojas y el porcentaje de hidratos de carbono transportados a los tubérculos. Cuando el crecimiento del follaje comienza a ser más lento y la tasa de senescencia de las hojas se incrementa, el follaje alcanza su máximo tamaño y comienza a declinar. En este momento estamos en la fase de máximo crecimiento de los tubérculos. Si la estación de crecimiento es lo suficientemente larga, el follaje muere totalmente en forma natural y sus azúcares y nutrientes minerales son removilizados y transportados hacia los tubérculos. El crecimiento de los tubérculos continúa hasta que el follaje está casi totalmente muerto. Al final del ciclo la mayoría del total de la materia seca producida por el cultivo se encuentra en los tubérculos. La muerte de la parte aérea del cultivo puede ser natural, debido a una helada, debido a enfermedades o plagas, o provocada artificialmente (Aldabe y Dogliotti, 2006).

Desde el punto de vista del uso de los asimilados disponibles, se pueden utilizar tres fases para clasificar el desarrollo del cultivo. La primera etapa va desde la plantación hasta el inicio de la tuberización, donde los tubérculos ya contienen al menos 1 gramos de materia seca. En esta etapa los asimilados se destinan al crecimiento de hojas, tallos, raíces y hacia el final de la etapa también de los estolones. Desde la plantación y hasta que cada planta tiene de 200 - 300 cm² de área foliar, la fuente principal de asimilados son los almacenados en el tubérculo semilla, y luego por el resto del ciclo del cultivo, los producidos por el área foliar y tallos aéreos.

La segunda etapa va desde el inicio de la tuberización hasta el fin del crecimiento del follaje. En esta etapa los asimilados disponibles se comparten entre el crecimiento del área foliar y el crecimiento de los tubérculos y estolones. A lo largo de esta segunda etapa, en la medida que se inician cada vez más tubérculos, una porción creciente de los

asimilados disponibles se destina a estos en detrimento del crecimiento del follaje. Primero se detiene la ramificación y la aparición de hojas nuevas y al final de la etapa cesa totalmente el crecimiento del follaje.

La última fase va desde el fin del crecimiento del follaje hasta el fin del crecimiento del cultivo que ocurre por la senescencia del follaje. El área foliar en esta etapa empieza a disminuir porque no hay desarrollo de hojas nuevas, las hojas más viejas van muriendo y el área foliar en su conjunto va gradualmente bajando su eficiencia fotosintética hasta que esta no es suficiente para mantener el crecimiento de los tubérculos. En esta etapa, entonces, todos los asimilados disponibles se destinan al crecimiento de los tubérculos.

El rendimiento final del cultivo depende de la tasa de crecimiento de tubérculos y de que tan largo es el periodo de crecimiento de esos tubérculos. Como se mencionó anteriormente, en la primera fase, los asimilados de la planta se usan en el crecimiento del follaje pero no en el crecimiento de los tubérculos, caso contrario con la última fase donde mayoría de los asimilados son usados en el crecimiento de los tubérculos a expensas de la pérdida del área foliar. Entre mayor sea la capacidad de la planta de transformar la radiación y los nutrientes en azúcares simples para el crecimiento de los tubérculos, y entre más tiempo dure este proceso de la tercer fase, mayor será el rendimiento final obtenido en la cosecha (Aldabe y Dogliotti, 2006). El tiempo de duración de la tercer fase, es decir el tiempo de duración del área foliar depende de la cantidad de área foliar de la planta al final de la segunda etapa, en otras palabras, entre más follaje, mayor es la cantidad de biomasa acumulada por la planta en las fases anteriores, mayor tiempo toma la etapa de senescencia y más crecerán los tubérculos. Esta cantidad de biomasa acumulada depende del número de hojas y de su tamaño, que a su vez están determinadas por el número de ramificaciones alcanzadas por la planta en la primer fase, antes de empezar la tuberización, es decir entre más tiempo tome la primer fase o más se retrase el proceso de tuberización, mayor será el ciclo del cultivo y con ello el rendimiento. Kooman *et al.*, (1996), encontraron que cuando se alarga un día la duración de la etapa 1, se alarga un día la duración de las etapas 2 y 3. Por lo tanto alargar un día la duración del período previo al inicio de la tuberización resultó en 3 días más de duración del ciclo de crecimiento del cultivo.

Las condiciones ambientales del cultivo en la última fase son un factor determinante en el rendimiento, pues si no son favorables, la tasa de crecimiento de tubérculos se ve afectada así en las primeras etapas se haya alcanzado un buen desarrollo y una considerable acumulación de biomasa.

1.3.5 Coeficientes genéticos para el cultivo de papa

Los modelos de simulación requieren ser calibrados para los diferentes cultivares o variedades de cada cultivo. Esta calibración se realiza determinando diferentes coeficientes genéticos por medio de procesos iterativos que permitan el mayor ajuste entre los datos reales y los datos simulados (Sarmiento y Bowen, 2002). Algunos de estos coeficientes también pueden ser calculados a partir de mediciones directas de algunas variables sobre cultivos experimentales desarrollados en condiciones óptimas, ya que estos valores determinan tasas de crecimiento y desarrollo máximo o potencial de las variables relacionadas con los cultivos. Hay que tener en cuenta que estos coeficientes genéticos dan información acerca del desarrollo fisiológico de la planta, que varía ampliamente entre variedades e incluso, se presentan también importantes variaciones para un mismo cultivar cuando cambian las condiciones en las cuales la planta se desarrolla. Cambios en las condiciones ambientales, en la cantidad de nutrientes o aplicaciones de riego, determinan la respuesta ambiental de los cultivos, y con esto los valores de los coeficientes. Según Bowen y Jaramillo (1997) si son calculados cuidadosamente, los coeficientes genéticos de una especie determinada podrán ser los mismos para todas las localidades.

Estos coeficientes genéticos tratan de parametrizar las respuestas de cada variedad a las condiciones ambientales de temperatura o brillo solar. Por ejemplo, relacionan la sensibilidad de una variedad respecto a la temperatura analizando la tasa de crecimiento de hojas, de tubérculos o de raíces etc.

Para definir una variedad de papa con propósitos de simulación con DSSAT, son necesarios cinco coeficientes (G2, G3, P2, PD y TC), que serán descritos brevemente a continuación. Los coeficientes P2 y TC, consideran el efecto del fotoperiodo y de la temperatura en el inicio de la tuberización respectivamente. P2, definido como el coeficiente de sensibilidad al fotoperiodo toma valores entre 0 y 1, donde los valores menores serán asignados para los cultivares tardíos, aquellos que se desarrollan con

menor cantidad de horas de radiación al día. TC es el valor de temperatura por encima de la cual la iniciación del tubérculo es inhibida en algún grado (Olarte *et al.*, 2000).

Para cultivares tardíos los valores de TC son más bajos, ya que las variedades de climas más fríos son más sensibles a las altas temperaturas. En variedades de ciclo corto, los valores de TC son más altos ya que la planta presenta una más baja sensibilidad a las altas temperaturas y solo temperaturas por encima de 25°C pueden ser desfavorables para el cultivo (Domínguez, 1989).

G2 es un coeficiente genético necesario que representa la tasa potencial de crecimiento foliar. En plantas jóvenes la tasa de crecimiento foliar LGR por su sigla en inglés está estrechamente relacionada con la disponibilidad de carbohidratos inicialmente en las semillas y luego provenientes de la fotosíntesis. Después de que la reserva de carbohidratos en las semillas se ve limitada, la LGR se ve fuertemente influenciada por condiciones ambientales como la temperatura del aire, la humedad del suelo y la disponibilidad de nitrógeno (Manrique, 1990).

G2 es el valor de máximo LGR para el cultivo de la papa, siendo sus unidades centímetros cuadrados de área foliar por metros cuadrados de área de cultivo por día ($cm^2 \times m^{-2} \times dia^{-1}$), valor que se calcula cuando el cultivo es realizado bajo condiciones óptimas. Los valores de G2 son por lo general calculados a partir de datos reportados de los experimentos, en los que se realizan mediciones en laboratorio del área total de hojas de la planta para diferentes intervalos de tiempo y se divide entre el periodo en el que se han tomado las mediciones, tomando finalmente el promedio de estos cocientes en diferentes plantas dentro del mismo cultivo realizado bajo las mejores condiciones (Olarte *et al.*, 2000). Asumiendo una población de 4 plantas por metro cuadrado, G2 toma valores entre los 0,03 y 0,09 si se miden las áreas en metros cuadrados (Manrique *et al.*, 1990).

El coeficiente G3, definido como la tasa potencial de crecimiento del tubérculo TGR, puede ser determinado con la Ecuación 1-1.

$$TGR = \frac{(M_{ii} - M_i)}{t_{ii} - t_i} \quad (1-1)$$

Donde M_{ii} y M_i son la masa de tubérculos secos al final y al inicio del intervalo de tiempo usado para calcular G2. Bajo condiciones crecimiento potencial, TGR será igual al valor del coeficiente G3, el cual para ser integrado en el archivo para DSSAT debe estar en unidades de gramos por planta por día ($gramos \times planta^{-1} \times dia^{-1}$).

PD es un coeficiente adimensional que reduce el crecimiento de los tubérculos en el periodo que sigue a la inducción de la tuberización, cuando la mayoría de los carbohidratos asimilados son destinados al crecimiento foliar. Este coeficiente toma valores entre 0 y 1. Los coeficientes P2 y PD son determinados realizando corridas del modelo con los demás coeficientes y parámetros como suelo, clima y manejo ajustados, buscando que las simulaciones sean lo más cercanas posibles a los datos de campo, ya que no se cuenta con metodologías analíticas para su medición.

1.3.6 Fotosíntesis en la planta de papa

El proceso fotosintético o de asimilación lo realizan las partes verdes de la planta dependiendo de factores genéticos propios de cada variedad como la estructura de la hoja, el ángulo de incidencia de las hojas en el tallo, el número y apertura de los estomas, cantidad de cloroplastos y clorofila etc. Este proceso depende también de factores ambientales como la temperatura, el fotoperiodo y la intensidad lumínica, siendo también determinantes algunas condiciones que varían durante el ciclo del cultivo como la cantidad y calidad de follaje, la edad de las hojas, la concentración de dióxido de carbono en el tejido de las hojas, la disponibilidad de nutrientes y el aporte de agua. La parte aérea de la planta de papa desarrolla este proceso, necesario para formar carbohidratos que serán transportados a zonas de crecimiento aéreo, como el follaje, flores, y frutos, así como a los órganos de crecimiento subterráneo como raíces, estolones y tubérculos (Contreras, 2009).

1.3.7 Consideraciones ambientales

La papa se adapta bien a climas predominantemente frescos y con valores no muy altos de humedad ambiental, lo anterior para que el desarrollo de la planta sea lento, favoreciendo la formación de carbohidratos que son fundamentales para el proceso de formación de los tubérculos (Faiguenbaum, 1987), disminuyendo además la posibilidad de aparición de enfermedades fungosas.

- Fotoperiodo

La domesticación y la adaptación a condiciones de climas muy diversos, produjo numerosas variedades de papa con diferencias considerables en cuanto a la respuesta al fotoperiodo. Las variedades endémicas (subespecie *Andigena*) podrían clasificarse como de día corto, variedades en las que la tuberización ocurre adecuadamente con menos de 12 horas de radiación, pero al ser llevadas a fotoperiodo largo, el periodo de crecimiento se alarga excesivamente, florece profusamente y su tuberización es escasa con tubérculos pequeños, ya que para el desarrollo del área foliar son convenientes días largos. Puede observarse que las variedades adaptadas a latitudes altas (subespecie *Tuberosum*), cuando son sembradas en condiciones de latitudes tropicales de día corto muestran una tuberización temprana, los estolones son cortos y el follaje permanece pequeño.

El acortamiento del fotoperiodo es una señal de la llegada de condiciones desfavorables, por lo que la planta se prepara para la formación de sus órganos de almacenamiento y resistencia propiciando la tuberización. Hay que aclarar que el acortamiento de los días estimula el proceso de tuberización en la mayoría de variedades pero no lo determina, pues puede empezarse este proceso aun contando con fotoperiodos largos (Aldabe y Dogliotti, 2006).

La respuesta al fotoperiodo está relacionada con la temperatura promedio. Kooman (1996) encuentra una relación de aumento lineal entre el inverso del tiempo hasta el inicio de la tuberización, que llamo tasa de desarrollo y la temperatura promedio, para cuatro variedades diferentes de papa tanto para días largos como días cortos. Manrique *et al.*, (1990) concluyeron que la duración del día óptimo depende entonces de la temperatura y de la variedad de cultivar. En cuanto a los requerimientos de luz, Arse (1996) señala que mientras mayor sea la intensidad de luz, mayor es la fotosíntesis, lo que explicaría que el cultivo pueda terminarse con éxito en los páramos incluso a altitudes mayores de 3500msnm. En general para las variedades de día largo, la relación entre el desarrollo del follaje y el crecimiento de los tubérculos se ve favorecida por estímulos como nitrógeno, días largos, temperaturas elevadas y alta humedad.

- Temperatura

La respuesta a la temperatura ambiental depende de la etapa de desarrollo del cultivo y está determinada por la relación entre la fotosíntesis y la respiración de la planta, teniendo en cuenta que en la papa, las moléculas se forman con tres carbonos en su forma primaria, por lo que está clasificada según su metabolismo como planta tipo C3, menos resistente a altas temperaturas y días demasiado largos que otros cultivos como el maíz o la caña de azúcar y además resaltando que la respiración también ocurre durante el día y está determinada directamente por la temperatura.

La papa es considerada una planta termoperiódica, indicando que necesita una variación entre la temperatura máxima y mínima de al menos 10°C. Si la diferencia es menor, el crecimiento y tuberización se ven afectados. Si esta situación se presenta con frecuencia a lo largo del ciclo vegetativo, el rendimiento y la calidad se ponen en riesgo, pues las temperaturas altas son ideales para el crecimiento de tallos y hojas, pero no para el desarrollo de los tubérculos (CENTA, 2002).

La papa se puede cultivar en lugares donde la temperatura mínima nocturna sea de 18°C como máximo, aunque este cultivo prefiere climas con temperaturas un poco más bajas. Conforme la temperatura mínima es más alta, la producción disminuye. Con temperaturas entre 12°C y 18°C la producción es mejor tanto de follaje y tallos como la producción de tubérculos (Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José de Costa Rica, 1991). Con temperaturas máximas mayores a 25°C, la respiración de la planta aumenta significativamente, aumentando a su vez el consumo de asimilados disponibles para el crecimiento de la planta, por lo que las temperaturas óptimas no deben sobrepasar este valor. Altas temperaturas antes del inicio de la tuberización tienden a favorecer el crecimiento del follaje retrasando el inicio de este proceso. Con temperaturas por debajo de los 17°C, la tasa de aparición y crecimiento de hojas se ve limitada y con esto la capacidad de absorción de radiación, que también retrasa el proceso de tuberización (Aldabe y Dogliotti, 2006). Días cortos y temperaturas bajas estimulan la iniciación de tubérculos, pero en días cortos con altas temperaturas las variedades de ciclo corto inician y desarrollan los tubérculos considerablemente más temprano que variedades de ciclo largo. Temperaturas nocturnas bajas son más efectivas que temperaturas diurnas bajas para iniciar la tuberización. Bajo condiciones de días muy

largos y altas temperaturas la formación de tubérculos puede verse disminuida (Contreras, 2009).

En la etapa de llenado de tubérculos, la variación entre la temperatura máxima y mínima puede ser un poco menor. Los valores óptimos de temperaturas máximas y mínimas están entre los 18°C y 20°C para el día y los 12°C y 14°C para la noche, con el fin de que los carbohidratos formados por el proceso fotosintético no sean consumidos por la respiración diurna y nocturna, aun cuando bajo estos valores de temperatura entre el 25 y 30% de los carbohidratos producidos son gastados en el proceso de respiración (Contreras, 2009).

Temperaturas demasiado bajas pueden afectar significativamente el cultivo, por lo que es importante tener en cuenta que diversos tipos de daños pueden ser causados cuando una helada afecta el cultivo. Puede presentarse muerte de algunas plantas, pues no todas pueden soportar de igual manera este fenómeno atmosférico. Los daños dependen de factores como duración e intensidad de la helada, contenido de humedad del suelo y de la planta y etapa de desarrollo fenológico del cultivo. El daño que soportan las plantas puede variar significativamente entre heladas y dentro del mismo campo, siendo comunes daños en los tallos y defoliación. Fairlie y Ortega (1995) simulando daños ocasionados mecánicamente sobre el cultivo en diferentes fases de desarrollo fenológico, mostraron que los estados fenológicos más susceptibles resultaron ser la emergencia y el inicio de la formación de estolones cuando el daño de la parte aérea de la planta fue superior al 50%. Mostraron también que el daño ocasionado por una helada en el inicio de la floración puede representar una disminución de hasta el 55% en el rendimiento final.

- Precipitación

Según Kalazich (1993), el agua es un elemento fundamental para el crecimiento de la planta, indispensable para la fotosíntesis, la respiración y otras funciones fisiológicas. Por otro lado es el medio de transporte de minerales y productos de la fotosíntesis, necesarios para la turgencia de las células de la planta, para la transpiración y regulación de la temperatura de las hojas. El consumo de agua por parte del cultivo es ampliamente influenciado por las condiciones climáticas, así como el rendimiento final puede variar ampliamente de acuerdo a la disponibilidad de agua ya sea de precipitación o riego

(Sepúlveda *et al.*, 1999; Jara 1999). Mucha o poca lluvia afecta el rendimiento del cultivo, ya que debido a la poca profundidad de las raíces de la papa la respuesta productiva a la irrigación frecuente es considerable y se obtienen cosechas muy abundantes con sistemas de riego automático que sustituyen a diario o cada tercer día el agua perdida por evapotranspiración y mantienen en un buen nivel la humedad del suelo. Un estrés hídrico moderado durante la etapa de expansión del follaje, frena el crecimiento del mismo y favorece la partición de asimilados hacia el crecimiento de los tubérculos, sobre todo cuando ya existen tubérculos iniciados en la planta. Este efecto del estrés hídrico puede interpretarse como un adelantamiento del fin del crecimiento del follaje a favor de la partición a los tubérculos, que puede resultar en un acortamiento del ciclo del cultivo (Aldabe y Dogliotti, 2006), con reducciones importantes en el rendimiento. Se debe considerar que el exceso de agua en el suelo, provoca un desarrollo pobre de las raíces, la pudrición de los tubérculos recién formados y de los que se utilizan como semilla, los cuales son especialmente susceptibles a la pudrición, máxime si se siembran y tapan estando húmedos. La humedad ambiental alta favorece el desarrollo de la enfermedad conocida como tizón tardío (Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José de Costa Rica, 1991).

Beniot y Grant (1985), concluyeron que no siempre es la falta de lluvias la limitante para obtener rendimientos óptimos sino el patrón de distribución irregular de las lluvias durante el año lo que provoca que el cultivo pase por períodos tanto de exceso como de escasez de agua. La cantidad óptima de agua requerida por el cultivo depende también de la variedad y 600 mm de agua distribuida en todo su ciclo vegetativo pueden ser suficientes, teniendo en cuenta que las mayores demandas se dan en las etapas de germinación y crecimiento de los tubérculos, por lo que es recomendable efectuar riegos suplementarios en los períodos críticos cuando no se presenten lluvias (Román y Hurtado, 2002).

En condiciones de la Sabana de Bogotá, investigadores de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA (Terán, 2006) midieron un aumento proporcional de hasta un 125% en los rendimientos de las variedades Diacol Capiro e ICA Unica en función de la lámina de agua aplicada, determinando rendimientos óptimos para 461mm y 457mm de agua regada respectivamente y mostrando también que para la variedad Capiro, la mayor demanda de agua se concentra en la etapa de llenado de tubérculos, aproximadamente a partir de 100 días después de la siembra. Las mejores

cosechas en cultivos de 120 a 150 días, se obtienen con cantidades entre los 500 y los 700mm de agua.

En general, la falta de agua hace disminuir la producción cuando se produce a mitad o final del período de desarrollo, más que si falta al inicio y cuando hay poca agua ésta debe concentrarse en obtener la producción máxima por hectárea en vez de aplicarse a una superficie más amplia.

1.3.8 Plagas y enfermedades del cultivo de la papa

La gota o tizón tardío es la principal enfermedad fungosa que afecta el cultivo de papa en todo el mundo. Esta enfermedad que afecta hojas, tallos y tubérculos en cualquier estado de desarrollo vegetativo y puede acabar con un cultivo en pocos días es causada por el hongo *Phytophthora infestans* que se presenta en todos los climas donde se cultiva la papa (CORPOICA, 2010). Su control se basa en el uso intensivo de fungicidas a un alto costo y muy perjudiciales para el medio ambiente. En condiciones naturales, este patógeno solo subsiste en plantas vivas, por lo tanto las principales fuentes de inóculo son las semillas provenientes de plantas afectadas por la gota, los residuos de la cosecha y en algunos casos los cultivos vecinos, ya que el patógeno se disemina por las gotas de lluvia o la acción del viento. Se ha encontrado una importante relación entre la humedad y el desarrollo del patógeno, que es favorecido por el clima, especialmente cuando hay temperatura moderada durante el día y alta humedad en las noches. Este patógeno es capaz de producir la enfermedad cuando las temperaturas están entre 5°C a 30°C, pero es esencial que haya una humedad atmosférica mayor a 90% (CIP, 2010).

La polilla guatemalteca *Tecia solanivora* causa notorios perjuicios económicos en el cultivo de papa, disminuyendo la calidad y rendimiento del producto hasta en un 100%, principalmente durante las épocas secas (Salazar y Betancourt, 2009). El adulto es una mariposita de color marrón con tres manchas en las alas y de aproximadamente 12 mm de longitud que se mueve durante la noche. La hembra deposita de 150 a 200 huevos en el suelo, principalmente en grietas y cerca de la base de la planta, de los que nacen pequeñas larvas o gusanos que se desplazan hasta los tubérculos para alimentarse produciendo galerías en su superficie. Estas larvas, que al final de su desarrollo presentan un color verde morado, abandonan el tubérculo y forman una pupa o crisálida

en los primeros 5 cm del suelo, de la que pasados unos días saldrá de nuevo el adulto (Cabildo Tenerife, 2009).

El gusano blanco de la papa *Premnotrypes vorax* es considerado uno de los insectos plaga más limitantes del cultivo de la papa en Colombia. El gusano blanco en su estado adulto se alimenta principalmente de las hojas de la papa, pero el daño de importancia económica es ocasionado por las larvas, que al alimentarse de los tubérculos hacen galerías que afectan la calidad del producto (Pérez *et al.*, 2009). Kühne (2007), encontró que la longevidad del gusano disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que por encima de 17°C las hembras expresan menos de 50% de su fecundidad potencial.

La pudrición blanda en el tubérculo es una enfermedad de muy fácil diseminación, especialmente en zonas muy húmedas y con temperaturas mayores a 20°C, aunque sin embargo se puede presentar en épocas secas y a bajas temperaturas. En Colombia esta enfermedad se ha encontrado en todas las zonas productoras del departamento de Antioquia. El ataque a los tubérculos se produce en el suelo antes de la cosecha o en el almacenamiento. La bacteria penetra por heridas o por el extremo del estolón, que comunica la papa con la planta madre. Al comienzo las lesiones son en forma de heridas circulares húmedas, ligeramente hundidas de color canela a castaño. Se presenta una clara demarcación entre el tejido sano y el enfermo. En ambiente seco, las áreas se hunden profundamente, se endurecen y se secan. Al comienzo de la infección el tejido enfermo no tiene olor, pero a medida que ésta avanza adquiere olor desagradable y se torna pegajoso, debido a la presencia de otros microorganismos secundarios (Gobernación de Antioquia, 2009).

1.3.9 Producción de papa en Colombia

La papa es un producto que cumple una importante función en la nutrición de la población del país, su demanda es altamente inelástica a los precios y su participación en la canasta de consumo es muy significativa. Es uno de los alimentos más importantes después de la carne de res, la carne de pollo y el arroz. Como en muchos otros países del mundo, la papa es muy importante por su contribución a la alimentación, al empleo y al ingreso de quienes la cultivan (Ministerio de Agricultura, 2005).

En el 2004 el cultivo de la papa en Colombia ocupó el quinto lugar en la producción agropecuaria nacional con 2,8 millones de toneladas, fue el noveno cultivo en extensión

con 161873 hectáreas y el sexto en valor de la producción. Más del 90% de los cultivadores son pequeños productores, que siembran menos de 3 hectáreas, para los cuales el sustento de sus familias depende directamente del cultivo (AGROCADENAS, 2005).

Durante los últimos años ha disminuido la rentabilidad del cultivo de papa, debido a factores como el incremento en el precio de algunos insumos, la introducción de variedades más exigentes en el control de plagas y enfermedades, la insuficiente asistencia técnica que conlleva a un uso excesivo de fertilizantes, fungicidas, plaguicidas y herbicidas. Por otro lado, los cultivos de papa se encuentran ubicados en más de un 90% sobre los 2500 msnm en zonas de ladera, lo que impide el uso eficiente de mecanización. En casi todos los casos, por no contar con agua para riego el cultivo depende del régimen de lluvias, situación que genera una producción estacional. Por último, la producción se adelanta casi en su totalidad utilizando semilla informal, que impide incremento de rendimientos y productividad. En Colombia la competitividad de la producción de papa se encuentra amenazada por las prácticas tradicionales de manejo del cultivo, que incorporan un uso inadecuado de los suelos, de insumos y de los recursos hídricos, elevando los costos de producción y reduciendo la sostenibilidad a largo plazo (Ministerio de Agricultura, 2005). En general, los problemas de calidad de la papa están relacionados con factores como el tipo de manejo que se le da al producto desde la siembra hasta la distribución al consumidor, el uso inapropiado de prácticas de siembra y recolección de cosechas, la utilización inadecuada de insumos agroquímicos en el proceso productivo, el escaso uso de semilla de buena calidad, la incidencia de enfermedades y plagas en el cultivo y los problemas derivados del mal manejo poscosecha, así como el uso de empaques inadecuados que le ocasionan daño al producto.

La producción por departamentos está centralizada en Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia con más de 85% de la producción (CEVIPAPA, 2010) y según el Ministerio de Agricultura (2005), los productores pueden clasificarse en tres grupos. Los pequeños productores quienes siembran hasta 3 hectáreas, constituyen el 90% de los productores, aportan el 45% de la producción nacional y ocupan más del 50% del área cultivada. Los medianos productores semitecnificados siembran entre 3 y hasta 10 hectáreas, constituyen el 7% de los cultivadores, participan con cerca del 35% del total de la

producción y ocupan alrededor de un 24% del área cultivada. Los grandes productores son aquellos que siembran más de 10 hectáreas, aportan el 20% de la producción nacional y representan el 3% de los productores, desarrollando sus procesos productivos en forma tecnificada, poseedores además capacidad financiera. Debido a la diversidad de tipos de productores y tecnologías, el rendimiento por hectárea sembrada varía ampliamente. Entre 1993 y 2005, el rendimiento promedio para el país, se ha mantenido entre 15 y 17,5 toneladas por hectárea, rendimiento muy bajo comparado con países como Bélgica, Luxemburgo, Alemania y Estado Unidos que tienen rendimientos promedio mayores a 40 toneladas por hectárea y relativamente bajos respecto a países latinoamericanos como Guatemala, Cuba, Argentina y México que tienen rendimientos promedio por hectárea mayores a 25 toneladas (COMFECAMPO, 2008). Para Cundinamarca, el rendimiento promedio para el año 2007 fue de 17,79 toneladas por hectárea y el rendimiento nacional fue de 17,3 toneladas por hectárea según las evaluaciones agropecuarias municipales realizadas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2005). Según el Censo Nacional de la Papa (DANE, 2002), para los años 2001 y 2002 los rendimientos promedio para Cundinamarca fueron 16,7 toneladas por hectárea para cultivos del primer semestre y 23,6 toneladas por hectárea para los de segundo semestre, viéndose estos últimos favorecidos por la mayor cantidad de precipitaciones. No existen estadísticas confiables respecto a los rendimientos por zonas, que además son muy variables, pero una relación muy cercana a la realidad, asume que para la producción industrial de Diacol Capiro el rendimiento es por lo menos un 25, es decir 25kilogramos de cosecha por cada kilogramo sembrado, lo que indicaría que para una siembra promedio de 2000 kilogramos de semilla por hectárea se obtendrían no menos de 50 toneladas por hectárea. Para la variedad pastusa, el rendimiento tiende a ser un poco menor.

En términos de los cultivares sembrados en Colombia existen más de 30 variedades de papa cultivadas, pero solo alrededor de 10 son de uso comercial reconocido, entre las cuales sobresalen variedades como Diacol Capiro, Parda Pastusa, ICA Puracé, ICA Única, Tuquerreña o Sabanera y diferentes materiales de Criolla (CORPOICA, 2010; Porras 2005). Las de consumo fresco son las más cultivadas, y corresponden a cerca del 90% de la producción e involucran variedades como Parda Pastusa, Argentina, Tuquerreña, ICA Nariño, ICA Picacho, ICA San Jorge, ICA Tequendama, Criolla o Yema de Huevo y unos cinco materiales más de importancia económica. En Boyacá y

Cundinamarca, región que representa el 65,6% del área cultivada en el país y que participa con el 67,6% de la producción, la variedad más importante es la Parda Pastusa. Según el Censo Nacional de la Papa, el 74% del área en Cundinamarca y el 50% del área en Boyacá, fueron cultivados con esta variedad (DANE, 2002). La segunda variedad en importancia es la variedad Diacol Capiro (R-12), sembrada en un 18% del área en Cundinamarca y un 21% en Boyacá. Estas dos variedades son las más cultivadas en Colombia, debido a sus excelentes cualidades para consumo y además por su importante demanda industrial (Morales, 1994).

1.3.10 Proceso productivo de la papa

La papa es un cultivo de carácter transitorio del que se obtienen dos cosechas al año, siendo la duración del cultivo función de la temperatura. En Colombia la producción comercial se realiza entre los 2000 y 3000 msnm, aunque las zonas de producción óptima en función de la calidad y cantidad del producto pertenecen a fincas localizadas entre los 2500 y los 3000 msnm. Existen dos zonas de producción marginal en las que los principales factores limitantes son las enfermedades y plagas hacia el clima templado entre 1500 y 2000 m de altitud y el efecto de las heladas en las zonas altas entre 3500 y 4000 m de altitud (Ministerio de Agricultura, 2005).

Las Temporadas de siembra están determinadas por las condiciones climáticas, especialmente temporadas de lluvias y ocurrencia de heladas. En el primer semestre se realiza la siembra de Año Grande (50% del área sembrada), entre los meses de enero a marzo y en el segundo semestre la siembra de Mitaca (30% del área), en los meses de junio a agosto. Durante el resto del año se realizan siembras escalonadas en microclimas favorables (CEVIPAPA, 2004). La variedad Diacol, variedad de uso industrial sembrada entre los 2500 y 2700 msnm tiene un ciclo vegetativo de entre 155 y 165 días entre siembra y cosecha, mientras que la Parda pastusa puede tomar hasta 180 días en campo, principalmente si se siembra a mayor altitud.

La cantidad de semilla utilizada por hectárea está determinada por la variedad, el tamaño de la semilla, la calidad de la misma, así como por la distancia entre surcos y el número de tubérculos por surco. Dicha cantidad toma valores entre los 1500 y los 2500 kilogramos por hectárea (Porrás, 2010; AGROCADENAS, 2004). Las distancias más corrientes entre surcos varían entre los 70 y los 100 cm, con una separación entre

plantas de entre 20 y 50cm. Se ha demostrado que los espacios más reducidos generan mejores rendimientos, tubérculos de tamaño más uniforme y menos riesgo de que prosperen tubérculos demasiado grandes en los cuales se pueda presentar el daño fisiológico del corazón hueco que genera tubérculos de muy baja calidad (Montaldo, 1984). Se ha visto que una muy alta densidad de siembra puede generar competencia y con ello disminución en el rendimiento, mientras que con una muy baja densidad hay un aumento en el rendimiento por planta pero disminuye el rendimiento en la superficie cultivada. El número de tubérculos por surcos y el número de brotes por tubérculo determina el número de tallos por metro cuadrado, siendo esta variable la que debe ser maximizada, ya que se trata de colocar el mayor número de tallos por metro cuadrado para lograr una máxima intersección de luz y maximizar la actividad fotosintética por unidad de área (FINAGRO, 2007).

La profundidad de siembra de la semilla depende del tamaño de la misma y varía entre los 10 y 15 cm para siembra manual, buscando que la profundidad de siembra sea de entre 3 y 5 veces el tamaño de la semilla. Para siembra mecanizada, la profundidad es mayor a 15 cm. Para realizar el control de plagas y enfermedades así como para la fertilización de los suelos los agricultores del país acostumbran a desarrollar diferentes prácticas de manejo agrícola, que responden en su mayoría a costumbres tradicionales locales en vez de a planes basados en los requerimientos del cultivo o a resultados de análisis de fertilidad de suelos. Cuando son utilizados abonos orgánicos, practica no muy generalizada debido a los problemas de patógenos presentes en el suelo, los agricultores utilizan productos compostados en una cantidad cercana a 1000 kilogramos por hectárea que en su mayoría provienen de estiércoles de gallina, pollos, cerdos, equinos o mulares, como fuentes suplementarias de fertilización y mejoramiento de las condiciones del suelo.

Algunos estudios (FONADE, *et al* 2002) afirman que generalmente la nutrición del cultivo de la papa se lleva a cabo mediante la aplicación de fertilizantes compuestos aplicados al suelo, ricos en fósforo, nitrógeno y potasio y algunos elementos secundarios como calcio, magnesio y azufre. La cantidad y relación de los fertilizantes es muy variada y por lo general se acostumbra a fertilizar en la siembra y en re-abone, usando relaciones NPK 12:24:12 o 10:30:10 en la siembra y 15:15:15 o 18:18:18 en re-abone, con cantidades de entre 1800 y 2500 toneladas por hectárea de fertilizante (Porrás, 2010).

Los patógenos de la papa presentes en el suelo cuyo control es muy difícil y perjudican la calidad y rendimiento del tubérculo, se han venido manejando a través del tratamiento de la semilla y eventualmente mediante aplicaciones de productos fitosanitarios dirigidos al suelo en la etapa vegetativa del cultivo, especialmente durante la siembra, desyerbe y aporque.

La cantidad y forma de aplicación de químicos para el control de plagas y enfermedades varía en función de la variedad, las condiciones climáticas, la presencia de fitopatógenos y el concepto del productor. Para el control de la Gota de la Papa por ejemplo, los agricultores realizan aspersiones dirigidas a la parte aérea de la planta con fungicidas sistémicos, preventivos o preventivos-curativos, a lo largo del ciclo del cultivo, sin que a la fecha se hayan desarrollado productos biológicos de comprobada eficiencia para su tratamiento. Entre otras recetas pueden encontrarse de 13 a 18 aplicaciones de fungicidas preventivos-curativos para *P. infestans* (Tizón tardío), y de 3 a 5 aplicaciones dirigidas al suelo para ataques de *T. Solanivora* (polilla guatemalteca), acompañadas de hasta 7 aplicaciones contra plagas del follaje (Porrás, 2010).

La competencia de arvenses en el cultivo de papa es poco significativa. En la mayoría de zonas se presentan algunos tipos de pasturas y algunas malezas de hoja ancha cuyo control se realiza mediante labores culturales de remoción de suelo en desyerbas y aporques o con menor frecuencia mediante la aplicación de herbicidas. La quema con fuego como práctica de adecuación de lotes no es una práctica común antes de la siembra de papa (FEDEPAPA, 2004).

1.4 El suelo y el cultivo de papa

Con la excepción menor de los sistemas hidropónicos, el suelo es esencial para la producción de cosechas. Ningún recurso individual es más importante en el logro de la agricultura que el suelo, ya que contiene los nutrientes y almacena el agua esencial para el crecimiento de las plantas (IGAC, 2000). Los suelos poseen diversas propiedades, que permiten diferenciarlos y realizar clasificaciones según textura, propiedades físicas, químicas, mineralógicas y nutricionales por ejemplo. Estas propiedades, en el caso de los suelos de usos agrícolas son factores determinantes del rendimiento de los cultivos y a su vez los cultivos y las diferentes prácticas relacionadas con la agricultura pueden

cambiar estas propiedades. Por ejemplo, el cultivo intensivo de papa por lo general trastorna fuertemente el suelo, lo degrada, lo erosiona y satura de nitratos, llevando en algunos casos a la degradación del mismo y su consecuente inutilidad para fines agrícolas. Diversas prácticas agrícolas como la agricultura de conservación, que consiste en un sistema de producción agrícola atento a economizar recursos, ofrece diversas técnicas útiles para conservar el suelo durante la producción de la papa ayudando a restablecer el suelo, estimulando la productividad y reduciendo la necesidad de usar fertilizantes y combustibles (FAO, 2008).

Un estudio de las propiedades químicas de los suelos involucra la determinación y cuantificación de la composición de sustancias tanto inorgánicas como orgánicas y la evaluación de las transformaciones a que están sujetas en todas y cada una de las fases de la formación del suelo, procesos que van a determinar la calidad y aptitud de los suelos para los diferentes fines. Las propiedades físicas de los suelos están relacionadas con las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas y ópticas, propiedades determinantes a la hora de analizar entre muchos otros procesos el intercambio de las diferentes formas de materia (agua, nutrientes, oxígeno, dióxido de carbono etc.) entre las partes aéreas de las plantas y las raíces. En este capítulo se describirán brevemente las características de los suelos más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar las simulaciones del cultivo de papa.

1.4.1 Nivel de acidez y nutrientes del suelo

La reacción del suelo se refiere a las relaciones de acidez y basicidad del mismo que influyen tanto en sus características químicas como físicas. La reacción del suelo se evalúa midiendo su pH, que se define como el logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno en la solución del suelo. La escala de pH cubre un rango que oscila de 0 a 14, considerando el valor medio de 7 como neutro, mientras que valores menores son ácidos y mayores básicos (Zapata, 2004). El rango de acidez depende de la evolución del suelo, donde son determinantes factores como el clima, el material parental, la naturaleza de los componentes orgánicos, el tiempo de evolución, el grado de eliminación de cationes como el calcio, el magnesio y el sodio, ya sea por lavado o por extracción continuada por las plantas, y el grado de su reemplazo por cationes generadores de acidez, como el aluminio y el hidrógeno. La acumulación de sales de sodio intercambiable y la acción del hombre a través de la aplicación de fertilizantes y

enmiendas también pueden modificar el pH del suelo (IGAC, 2000). La concentración y disponibilidad de los diferentes nutrientes para las plantas depende del nivel de acidez del suelo, por ejemplo los suelos con altos niveles de pH o básicos son ricos en calcio, magnesio, azufre y sodio, pero a su vez estos suelos, contienen sales solubles que desarrollan alta presión osmótica, causando plasmólisis en las células de las raíces y la consecuente muerte de las plantas, a menos que hayan desarrollado mecanismos fisiológicos de adaptación. Bajos nivel de pH, es decir suelos ácidos son ricos en hierro, cobre, zinc y boro y en suelos fuertemente ácidos (pH menor a 5,5), las concentraciones de aluminio y manganeso se hacen tóxicas para las plantas. Los contenidos de fósforo y nitrógeno para las plantas se optimizan para suelos neutros con niveles de pH entre 6 y 7,5 que serían entonces los suelos más recomendables para actividades agrícolas. El fósforo es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, como componente integral de procesos metabólicos y además indispensable para la fotosíntesis. Para valores altos de pH, el fósforo es fijado por compuestos de hierro o aluminio y para valores muy bajos por carbonatos de calcio y deja de estar disponible para las plantas.

El potasio junto con el nitrógeno, es absorbido en altas cantidades por las plantas y en estas desempeña un papel importante en el metabolismo de carbohidratos y proteínas, en la regulación de la transpiración y contenido de agua de las células y en la fotosíntesis. La deficiencia de estos elementos genera una limitación considerable en el desarrollo de las plantas. En suelos tropicales los contenidos de potasio muestran correlación directa con los valores de pH del suelo.

1.4.2 Contenido de carbono y materia orgánica

De acuerdo con Duchaufour (1984), los restos orgánicos en los suelos son descompuestos por la actividad biológica, de esta forma a través de la mineralización o biodegradación se van liberando elementos minerales y gaseosos como hidrógeno y gas carbónico. El carbono en los suelos está presente principalmente en forma de materia orgánica y en menor medida en minerales carbonatados. En suelos húmedos y expuestos al lavado, la mayor presencia de carbono está en forma de materia orgánica, mientras en suelos áridos, se presenta un mayor porcentaje de minerales carbonatados (Allison *et al.*, 1965). La determinación y cuantificación de la materia orgánica del suelo involucra la cuantificación del carbono que se puede realizar por diferentes

procedimientos analíticos. Los valores para la concentración del carbono se expresan en porcentaje respecto del total de suelo y también de la materia orgánica cuando se multiplica por el factor convencional de Van Bemmelen el cual es de 1,724.

1.4.3 Textura del suelo

La textura del suelo determina las características de aireación, permeabilidad, retención de humedad y volumen explorado por las raíces de las plantas, factores determinantes a lo largo de todo el desarrollo de los cultivos. La textura depende de la distribución de los tamaños de las partículas inorgánicas presentes en cada capa de suelo, las cuales se clasifican empezando por las de mayor tamaño como arenas, cuando el diámetro de las partículas es mayor a 0,01 mm. Se consideran limos cuando el diámetro de las partículas está entre 0,001mm y 0,01mm y las arcillas son las de menor tamaño con diámetros menores a 0,001mm (IGAC, 2000). Por lo general la abundancia de arenas se asocia con facilidad de infiltración, peligro de lavado de nutrientes, una aireación mediana a alta e intercambio gaseoso rápido y una baja retención de humedad. Los suelos con altos contenidos de arcillas, son más compactos y difíciles de manejar, presentan por el contrario alta retención de agua y elementos nutrientes, pueden presentar encharcamiento y son propensos a generar asfixia radicular. La textura más equilibrada para el buen desempeño agrícola, corresponde a los suelos francos, en los que se encuentra una distribución uniforme de arcillas, limos y arenas. Estos suelos presentan una tendencia uniforme a retener agua a la vez que permiten la difusión de gases, con que cual las funciones fisiológicas de la planta no sufrirán limitaciones.

1.4.4 Densidad Aparente, Densidad real y Porosidad

En los suelos se considera densidad aparente al cociente entre la masa y el volumen real de las partículas del suelo más los espacios porosos de la muestra (Blake, 1965). La densidad real no tiene en cuenta los poros. La diferencia entre las densidades real y aparente se conoce como porosidad, puede ser capilar y no capilar, relacionadas con aireación y retención de humedad del suelo respectivamente. El tamaño de los poros del suelo determina si es porosidad capilar o no capilar, presentándose la primera en poros pequeños, que favorecen la retención y almacenamiento de humedad. En los poros grandes se presenta la aireación y oxigenación de las raíces y el paso de agua se presenta a mayor velocidad siendo responsables del flujo vertical llamado infiltración. La

densidad aparente y porosidad del suelo determinan la difusión de gases, su permeabilidad, el grado de penetración radical y conducción térmica. Para suelos con contenidos normales de materia orgánica la densidad real toma valores cercanos a 2,6 gramos por centímetro cúbico en suelos arenosos o arcillosos. En suelos con altos contenidos de materia orgánica o de hierro estos valores suelen ser mayores.

1.4.5 Capacidad de Agua

La humedad del suelo tiene un efecto directo en el desarrollo de las plantas, según lo adecuado de su abastecimiento y la rapidez con que penetra en las raíces. Al nivel de humedad del suelo en el que las raíces ya no pueden extraer agua del suelo, se le conoce como Punto de Marchitez Permanente PMP. Este punto en que la planta empieza a marchitarse irremediablemente depende de la presión a la cual está sometida el agua en el suelo y puede darse entre las 7 y 43 atmósferas dependiendo del tipo de planta. Se ha tomado como referencia para el PMP el nivel de agua a una presión de 15 atmósferas. Por el contrario, cuando el contenido de humedad del suelo es demasiado alto y el agua ya empieza a generar encharcamiento o a perderse por escorrentía se asume que el suelo ha llegado a su Capacidad de Campo CC, para el que se ha tomado una presión de referencia de 0,33 atmósferas y es una variable proporcional al contenido de materia orgánica y al contenido de arcillas. La diferencia entre estos niveles de humedad es conocida como Humedad Aprovechable HA. Cualquier nivel de humedad por encima del PMP es denominado agua aprovechable. La cantidad de agua que pueda ser aprovechada del suelo depende de sus características, como textura, estructura y profundidad, que determinan la capacidad del suelo para almacenar agua. Los factores vegetativos como el grado de penetración radicular, así como la proliferación de las raíces son altamente específicos de muchas plantas, de igual manera que el crecimiento de sus partes vegetativas aéreas. El contenido de humedad de sus tejidos dependen del tipo de planta y de las condiciones climáticas. La eficiencia de la utilización del agua varía ampliamente entre las plantas y está condicionada por el estado del tiempo. La temperatura del aire, humedad relativa, luminosidad y la velocidad de los vientos, entre otros factores tienen influencia en la velocidad de la pérdida de humedad por las plantas y por la superficie del suelo (IGAC, 2000).

Para medir la humedad del suelo existen métodos gravimétricos, densimétricos y eléctricos (Maderey, 2005). El método de humedad gravimétrica permite calcular el porcentaje de masa de agua presente en el suelo, respecto al peso del suelo seco. El contenido de humedad H_g calculado por este método se expresa como el cociente entre la diferencia de la masa del suelo húmedo P_h y seco P_s y la masa de suelo seco P_s (ver Ecuación 1-3).

$$H_g = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \right) * 100 \quad (1-3)$$

La humedad volumétrica H_v se define como el cociente entre el volumen de agua V_a contenida en la muestra del suelo y el volumen de la muestra de suelo V_s (Ecuación 1-4).

$$H_v = \left(\frac{V_a}{V_s} \right) * 100 \quad (1-4)$$

La humedad volumétrica está relacionada con la humedad gravimétrica de la siguiente forma (Ecuación 1-5).

$$H_v = H_g * \delta a \quad (1-5)$$

Donde δa representa la densidad aparente del suelo.

1.4.6 Perfiles de suelo

Para alimentar el software DSSAT, fue necesario crear archivos con la información referente a los perfiles de suelo característicos de la zona de estudio introduciendo esta información en los archivos *soil data*. Estos perfiles de suelo deben contener información respecto a propiedades físicas y químicas del suelo, entre ellas la clasificación del tipo de suelo, pendiente de inclinación del terreno, textura, color de la superficie del suelo, drenaje, número y profundidad de capas del perfil, contenido de nitrógeno, carbón orgánico, nivel de pH en agua y en solución buffer de cloruro de potasio, capacidad de intercambio catiónico, cantidad de raíces, punto de marchitez permanente, punto de saturación y capacidad de campo. El aspecto del archivo con el perfil del suelo y los datos introducidos en este serán revisados con más detalle en el próximo capítulo, donde se mostrara la información utilizada para alimentar el modelo de simulación DSSAT.

Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2000), los suelos de las zonas donde se ubican las estaciones climatológicas que serán utilizadas para las simulaciones están clasificados en las siguientes unidades cartográficas.

- Tenjo RLQA: Relieve ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes de 1 a 7%, suelos profundos a moderadamente profundos, bien a imperfectamente drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción extremada a medianamente ácida, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada. El 50% de los suelos de esta unidad cartográfica contienen componentes taxonómicos que corresponden a suelos *Pachic Melanudands*, que corresponde a un número AC-8 dentro del estudio general de suelos de Cundinamarca (IGAC, 2000).
- Mosquera RMQA: Relieve ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes de 1- 7%, suelos profundos a muy profundos, bien a moderadamente bien drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción mediana a ligeramente ácida y fertilidad moderada a alta. Según el IGAC (2000), el 70% de los suelos de esta unidad cartográfica tiene componentes taxonómicos *Pachic Haplustands* y *Humic Haplustands*, cuyos perfiles aparecen corresponden a MU-1 y MU-3.
- El Dorado RLOA: Relieve ligeramente plano con pendientes de 1 a 3%, suelos profundos a superficiales, bien a pobremente drenados de texturas finas a medias, reacción extremada a medianamente ácida, saturación de aluminio media a baja y fertilidad moderada a baja. El 40% de los suelos de esta unidad corresponde a taxonómicamente a *Typic Endoaquepts* cuyo código de perfil dentro del estudio general de suelos del departamento corresponde al número AC-19.

Los suelos analizados en este trabajo, representativos de Mosquera y Tenjo, corresponden al orden de los *Andisoles*, muy frecuentes en los pisos térmicos templados y fríos de Cundinamarca mientras que en El Dorado, predomina el orden de los *Inceptisoles*, menos evolucionados, frecuentes en todos los pisos térmicos desde los 200 hasta los 3800 msnm (IGAC, 2000). Los primeros, por su buen contenido de materia orgánica y su alto nivel de evolución son en general más apropiados para actividades

agrícolas. Los valores de pH de los tres suelos aunque tienden a ser ácidos están en rangos adecuados para el desarrollo de cultivos, siendo el pH de Tenjo el más cercano a los valores óptimos para la disponibilidad de nutrientes.

En general, en los tres suelos el contenido de carbono orgánico es relativamente alto (Cuesta, 2005) y la relación carbono-nitrógeno muy próxima para los tres suelos está en niveles adecuados. La capacidad de intercambio catiónico en los dos suelos *Andisoles* es mucho más alta que en el suelo del El Dorado, lo que podría sugerir problemas con la disponibilidad de nutrientes para este suelo.

Tabla 1-1: Características de los suelos de las zonas de estudio.

| Municipio | Orden | Grupo Taxonómico | pH (1:1) | CO (%) | CIC (meq/100 gr) | N (%) | Da (gr/cm ³) |
|-----------|------------|---------------------------|----------|--------|------------------|-------|--------------------------|
| Mosquera | Andisol | <i>Humic Haplustands</i> | 5,6 | 10,01 | 53,4 | 0,86 | 0,72 |
| El Dorado | Inceptisol | <i>Typic Endoaquepts</i> | 5,0 | 10,53 | 18,6 | 0,91 | 1,36 |
| Tenjo | Andisol | <i>Pachic Melanudands</i> | 5,8 | 11,65 | 56,5 | 1,00 | 0,59 |

| Municipio | Profundidad (cm) | % Arcilla | % Limo | LS | CC | PMP | Drenaje |
|-----------|------------------|-----------|--------|------|------|------|----------|
| Mosquera | 143 | 30 | 32 | 0,80 | 0,56 | 0,28 | moderado |
| El Dorado | 110 | 37,3 | 41,9 | 0,70 | 0,48 | 0,35 | pobre |
| Tenjo | 150 | 32,56 | 61,26 | 0,72 | 0,66 | 0,27 | bueno |

Las variables hidrofísicas LS, CC, y PMP de la Tabla 1-1 aparecen en unidades de cm³ de agua por cm³ de suelo. Estructuralmente, el suelo de Tenjo tiene ventajas ya que el bajo valor de densidad aparente sugiere una mayor porosidad favoreciendo la aireación, oxigenación, retención de agua y desarrollo de raíces. El suelo de El Dorado es menos profundo comparado con los otros dos, lo que podría incidir en la cantidad de agua que puede almacenar, así como en la profundidad hasta la donde las raíces pueden penetrar. Texturalmente se observan diferencias en la alta cantidad de limos en el suelo de Tenjo, con un porcentaje mucho menor de arenas, respecto a los otros dos, que podría reducir la infiltración y la cantidad de agua que se pierde por percolación profunda. Respecto a las propiedades hidrofísicas, nuevamente en el suelo de Tenjo se observan las mejores condiciones ya que es mayor la humedad aprovechable HA, siendo casi tres veces más alta que la de El Dorado. Respecto al drenaje puede verse que El Dorado presenta limitaciones respecto a los otros dos suelos.

1.5 Modelación y agricultura

Los intentos por relacionar los factores climáticos con la dinámica de la agricultura, así como con otras variables que determinan la evolución de un cultivo son antiguos y están todavía en desarrollo. En principio se trató de análisis cualitativos, que fueron evolucionando a mediciones cuantitativas y análisis estadísticos, buscando una comprensión de como los sistemas biológicos son afectados por el microclima de un cultivo, como es su evolución en el tiempo y entender así el desarrollo mismo de las plantas. Se empezaron a efectuar estimaciones cuantitativas de las posibles variables que podrían incidir en la forma en que las plantas crecen y dan frutos, se clasificaron los diferentes procesos y por medio de la experimentación se construyeron teorías, que mediante la utilización de modelos matemáticos permitieron llegar a conocer la respuesta del crecimiento y desarrollo de las plantas a las condiciones ambientales (Decker, 1994).

La utilización de modelaciones aplicadas a la agricultura inicio con la disponibilidad de los medios computacionales hacia 1970. Desde entonces se han usado modelos para caracterizar y ampliar los conocimientos científicos acerca de la evolución de las plantas, su reacción a condiciones ambientales y sobre el ambiente mismo. La modelación se ha desarrollado basada en un enfoque de análisis mediante procedimientos biológicos y procesos físicos, permitiendo responder preguntas relacionadas con la interacción biológica, genética y fenológica, el manejo de cultivos y el medio ambiente y la rentabilidad, constituyendo una invaluable ayuda a la toma de decisiones sobre las prácticas culturales, la fertilización, el riego, y el uso de plaguicidas. La modelación de los cultivos puede ayudar a los encargados de formular políticas en la predicción de la erosión del suelo, la influencia de los productos agroquímicos sobre el ambiente, los efectos del cambio climático y previsiones de rendimiento (Harpal y Graeme 2004). Los modelos de simulación permiten analizar algunos aspectos de la producción agrícola y del desarrollo fenológico de las plantas que en general que no pueden hacerse eficientemente con experimentos con tradicionales (Román *et al.*, 2000).

1.5.1 Los Modelos

Los modelos en un amplio sentido pueden dividirse en modelos estadísticos y de simulación dinámica. Los primeros no necesitan información detallada de la planta pero usan técnicas estadísticas que relacionan las plantas con el medio ambiente. La mayoría

de los modelos estadísticos relacionan el rendimiento del cultivo con variables ambientales en amplias superficies de siembra y son muy variables con respecto al tipo de cultivo en cada región. Tienen como ventaja que pueden utilizar toda los datos meteorológicos disponibles y aunque no son muy precisos pueden identificar con claridad años de cosechas abundantes o de pérdidas con anticipación. Estos modelos de regresión estadística relacionan de manera directa el rendimiento de un cultivo con una o más variables ambientales y de manejo, pero no pueden ser utilizados para más de un área y/o un cultivo sin una investigación previa que permita encontrar los respectivos coeficientes de correlación. A pesar de esta limitación, se utilizan ampliamente para la predicción de rendimientos de cultivos en amplias regiones con amplia variedad de suelos, prácticas agronómicas diversas y diferentes problemas de insectos o enfermedades.

Los modelos de simulación dinámica son aquellos en los que los resultados varían con el tiempo y se realiza una caracterización de los procesos en función de las variables de estado que determinan el desarrollo de un sistema en un punto en el tiempo permitiendo conocer el estado del mismo en función de parámetros biogénicos. El modelo actúa como un verdadero cultivo, germinando, desarrollando hojas, tallos, raíces, frutos etc. (Harpal y Graeme, 2004).

Los modelos dinámicos pueden caracterizarse como modelos preliminares, comprensivos y de resumen. Los modelos preliminares alcanzan apenas un nivel exploratorio donde muestran los datos actuales y se estructuran los conocimientos científicos. En los modelos comprensivos se han comprendido e incorporado los procesos esenciales del desarrollo del cultivo. En los modelos de resumen se tiene en cuenta además los diferentes niveles de producción. Los modelos dinámicos se acercan más al rendimiento de un cultivo que los modelos de regresión estadística, sin embargo para un mejor aproximación al rendimiento real es necesaria mucha más información específica del cultivo que puede no estar disponible en cuyo caso el modelo estadístico podría ser una buena opción.

La utilización de un modelo dinámico comprensivo de simulación de cultivos requiere un equipo multidisciplinario. Planta de fisiólogos, ingenieros agrónomos, ingenieros y científicos del suelo son necesarios para ayudar a definir tanto el marco general del problema y las especificidades del medio ambiente como el crecimiento de la planta en

estudio. Entomólogos y patólogos de plantas ayudan a definir las plagas de insectos y patógenos y de los subsistemas que son partes importantes en los ecosistemas de cultivo. Un agrometeorólogo selecciona y consolida los datos del clima y los flujos de microclima en el cultivo y sus alrededores. Un programador de sistemas selecciona el lenguaje y desarrolla el marco general del modelo (Ritchee *et al.*, 1986). Después de realizar una versión inicial de modelo y un análisis de resultados de rendimiento es necesario realizar una validación del mismo, con el fin de contemplar cambios en la estructura del modelo, de los datos o parámetros que se usaron o dejaron de usarse con el fin de mejorar el modelo.

La validación es la prueba de veracidad del modelo que se realiza comparando los datos reales con las salidas del modelo. Esta verificación certifica que las relaciones funcionales asumidas son correctas. Si un modelo no se comporta de acuerdo con las expectativas, es necesario realizar algunas correcciones de las relaciones funcionales ajustando algunos coeficientes utilizados, proceso comúnmente denominado calibración del modelo. Los modelos pueden ser considerados válidos y útiles aun cuando existen algunas diferencias entre los datos experimentales y simulación de salida (Guardrian, 1977).

1.5.2 Aplicación de Modelación

El principal objetivo de la aplicación de los modelos es predecir el rendimiento final en forma de rendimiento de grano, rendimiento de fruta, raíz o tubérculo, rendimiento de biomasa para el forraje o cualquier otro producto aprovechable. Algunas aplicaciones vinculan el precio de la explotación del producto con el costo de los insumos y la producción a fin de determinar el rendimiento económico.

Según la descripción hecha por Harpal y Graemme (2004), Las características genéticas y/o fenológicas pueden ser incluidas en los modelos en forma de coeficientes relacionados con el crecimiento del cultivo, que son evaluados en los procesos de validación y calibración. Existen datos de tipo fisiológico muy importantes en el desarrollo de los cultivos que son muy difíciles de medir o calcular por medio de procedimientos científicos tradicionales, pero es posible obtenerlos usando los modelos de simulación dinámica. Estos coeficientes al ser probados bajo diversos procesos de crecimiento pueden ayudar a descartar hipótesis erróneas y a probar o generar más hipótesis acerca

de la fisiología y genética de las plantas. Desde este punto de vista, la experimentación y el modelado de los coeficientes genéticos puede ser muy útil para mejorar el conocimiento de las plantas.

Las estrategias de rotación de los cultivos constituyen otra opción que también puede ser analizada con el uso de la modelación, simulando las diferentes secuencias de cultivos a través de varios años con el fin de determinar el cambio a largo plazo de las variables del suelo en función de las diferentes estrategias de rotación (Jones *et al.*, 2003).

Los modelos pueden también usarse para estudiar específicamente la dinámica de la concentración de un nutriente específico o la materia orgánica del suelo. Se han desarrollado modelos para determinar a largo plazo la sostenibilidad de un sistema de cultivo, así como mediante el análisis de diferentes escenarios de desarrollo pueden ser utilizados para comparar alternativas de manejo del cultivo con respecto a una o más decisiones de manejo agrícola. Para incorporar en las decisiones de manejo los diferentes escenarios climáticos, los modelos usan datos climáticos diarios como entradas del modelo que pueden representar la variabilidad de las condiciones climáticas futuras. Combinando las salidas simuladas del modelo respecto a condiciones biológicas y de manejo del cultivo con factores económicos puede calcularse el riesgo asociado con diversas prácticas de manejo o el riesgo asociados con las condiciones meteorológicas mismas.

Los modelos de cultivo pueden correrse con anterioridad o durante la temporada misma de crecimiento del cultivo con el fin de integrar el crecimiento del cultivo con las condiciones climatológicas observadas y tener así una base diaria para la toma de decisiones de manejo que deban ser aplicadas. En este sentido el modelo puede ser alimentado con datos meteorológicos hasta del día anterior a cuando se realizan las simulaciones y además pueden usarse también predicciones meteorológicas y con esto poder anticiparse al efecto de las condiciones ambientales sobre el cultivo. Puede predecirse una media y un error asociado tanto a las simulaciones con datos históricos como a las simulaciones con datos generados por pronóstico, error que será cada vez menor pues las predicciones irán siendo reemplazadas con datos reales.

La modelación es ampliamente utilizada en el riego. Hay disponibles paquetes que se ocupan de la programación de riego, así como para evaluar su eficiencia, para la planificación de la cosecha y para la selección de las variedades de cultivo. En cuanto al

manejo de enfermedades y plagas el uso de la simulación ha mostrado ser bastante rentable (Pusey, 1997), en el sentido que el uso de plaguicidas es bastante caro y las pérdidas por enfermedades suelen ser considerables, además teniendo en cuenta las implicaciones ambientales, los agricultores quieren reducir al mínimo el uso de agroquímicos.

Los modelos de simulación agrícola pueden ser usados para estimar impactos del cambio climático y/o de la variabilidad climática regional en agricultura, con el fin de recomendar escenarios de manejo alternativo que permitan mitigar el efecto y los impactos negativos de fenómenos como el ENSO o el calentamiento global entre otros.

Los cambios en la concentración de GEI pueden generar alteraciones ambientales de magnitud incierta. La evaluación de estos cambios y su impacto en la productividad agrícola son de vital importancia en diferentes aspectos de la sociedad y teniendo en cuenta la complejidad de las interacciones relacionadas con el clima y las plantas, los modelos de simulación se convierten en una herramienta muy útil y tal vez la única que permite realizar evaluaciones necesarias para la toma de decisiones (Claudio *et al.*, 1992).

Se pueden realizar análisis estacionales con el uso de simulaciones agrícolas con el fin de evaluar decisiones para una sola temporada, tales como la selección de los cultivos, la densidad y espaciado de la siembra, programación de siembra y riego, selección de fertilizantes, su cantidad y programación de su utilización etc. La vinculación de modelos agrícolas con sistemas de información geográfica puede incluir en las simulaciones datos específicos de condiciones de terreno, vegetación y climatología, dando un enfoque más regional de su utilización y más precisión en los resultados.

1.5.3 Sistemas de Soporte de Decisiones DSS

Los DSS son paquetes de software que integran procesamiento numérico e información cualitativa y sirven de apoyo para la toma de decisiones. En el caso de manejo agrícola, permiten la entrada de datos respecto al tiempo de plantar, selección de variedades, fertilizantes, riego, condiciones de suelo entre otros y dan la posibilidad de analizar la mejor elección en función de la información disponible de forma fácil y eficiente. Estas decisiones son muy importantes para el desarrollo del cultivo y su elección puede ser

definitiva ya que por lo general son irreversibles y en la mayoría de los casos son inaplazables, involucrando inversiones económicas o influyendo en forma decisiva en el rendimiento del cultivo. Las posibles decisiones son muy sensibles a la variación de las condiciones meteorológicas, dependiendo de todos los factores que eventualmente podrían ser significativos y realizando un balance entre el riesgo de tomar una decisión particular y el beneficio para el cultivo (Jones, 2003).

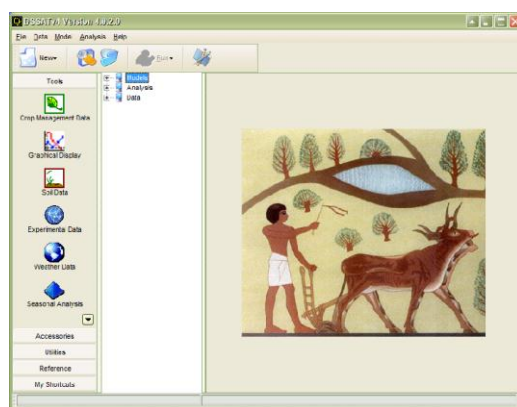
La información inicial con que se debe contar, la estructura y la información de salida del DSS, varía de acuerdo con las necesidades para las cuales haya sido diseñado, el tipo de cultivo, la zona geográfica, la precisión deseada y nivel de desarrollo deseados. Por ejemplo en Estados Unidos El Sistema Nacional de Apoyo a Decisiones Agrícolas NADSS es una red basada en un sistema de toma de decisiones geospaciales utilizado para ayudar a los productores a analizar los eventos de sequía y a tomar decisiones respecto a su mitigación. El NADSS utiliza el modelo de simulación Newhall (NSM) y los índices más comunes para el análisis de las sequías, como el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). Mediante la combinación de la información generada por los índices y los datos climáticos y agrícolas, el modelo NADSS es capaz de definir parámetros para analizar los riesgos asociados con la sequía (Cottingham y Waltman, 2004). Existe gran cantidad de literatura relacionada con los DSS en diferentes partes del mundo. En lo siguiente se describirán brevemente los principios del sistema de apoyo a la toma de decisiones de transferencia agrotecnológica DSSAT.

1.5.4 Sistema de Toma de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología DSSAT

El software DSSAT ha estado en uso y constante desarrollo durante los últimos 15 años por investigadores en todo el mundo. Este paquete incorpora módulos para diferentes cultivos en un software que facilita la evaluación y la aplicación de modelos de cultivos para diferentes propósitos (Jones y Ritchie, 2003). DSSAT permite simulaciones de 27 cultivos diferentes, con nuevas herramientas que facilitan la creación y el manejo de diversos experimentos permitiendo manipular por ejemplo los perfiles de suelos y datos meteorológicos.

DSSAT es un software que combina información de cultivos, suelos, bases de datos climatológicas para el acceso de los modelos de cultivos y programas de aplicación. Se han incluido mejoras al programa para aplicaciones estacionales y análisis de secuencias para evaluar los riesgos económicos y ambientales asociados con el cultivo como el riego, la fertilización, la disponibilidad de nutrientes del suelo, el cambio climático, la captación de carbono del suelo, la variabilidad del clima y la precisión de las estrategias de manejo del cultivo.

Figura 1-4: Interfaz DSSAT v4 4.0.2.0.



Fuente: Esta investigación.

DSSAT es uno de los principales productos desarrollados por El Marco de Referencia Internacional para la Red de Transferencia de Agrotecnología (IBSNAT), proyecto desarrollado por la agencia de desarrollo de los Estados Unidos en entre 1983 y 1993. Después de esto se ha ido desarrollando gracias a la colaboración de grupos de científicos de las universidades de la Florida, Georgia, Guelph, Hawái, del Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo de la Agricultura, La Universidad Estatal de Iowa y otros científicos relacionados con el Consorcio Internacional para Aplicaciones de Sistemas Agrícolas ICASA (ICASA, 2010).

Con el propósito de facilitar la incorporación de nuevos avances científicos y de poder vincularlos con diferentes tipos de DSS en otros cultivos, DSSAT ha sido rediseñado y programado para facilitar la interacción más eficiente de nuevas aplicaciones. La base para el nuevo sistema de modelación es un diseño de estructura modular con componentes por separado para cada disciplina científica. Tiene un módulo de suelo, módulos que pueden simular diferentes cultivos mediante la definición de especies en

archivos de entrada, un módulo para manejo de datos clima y tiempo etc. Presenta la versatilidad de permitir diseñar experimentos como por ejemplo, definida una variedad de un cultivo en particular, cambiar fácilmente el perfil del suelo, los escenarios climatológicos, o construir diferentes escenarios de uso de fertilizantes y/o riego, facilitando analizar los diferentes aspectos de los cuales depende el desarrollo de los cultivos.

Los modelos para los diferentes cultivos dentro de DSSAT, pueden simular resultados a medida que se incrementa el nivel de complejidad. En el más bajo nivel de complejidad el rendimiento del cultivo depende solamente de la cantidad de radiación, la temperatura y el potencial genético, siendo esta una simulación del rendimiento potencial, donde el agua y los nutrientes del suelo o fertilizantes no son limitantes para el desarrollo del cultivo. Aumentando la complejidad, el desarrollo del cultivo puede verse limitado por la disponibilidad hídrica, pero no por los nutrientes, acercándose más a un rendimiento real. En un tercer nivel se incluye la disponibilidad de nitrógeno como una posible limitación, mientras que en un cuarto nivel de complejidad la disponibilidad de fósforo va a ser determinante del rendimiento final, además de todas las anteriores limitantes. Aumentar el nivel de complejidad de la simulación, implica aumentar el volumen y la precisión de datos de entrada pero permite a su vez ampliar el horizonte de investigación comparando el rendimiento del cultivo con cada uno de los factores que determinan su desarrollo (Bowen *et al.*, 2001).

1.5.5 Experiencias de modelación en el cultivo de papa

El módulo SUBSTOR-POTATO (Simulación of Underground Bulking Storage Organs), diseñado para la simulación del cultivo de papa es uno de los módulos que integran al software DSSAT usando modelos matemáticos empíricos y determinísticos para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo como función del clima, el suelo, las estrategias de manejo agrícola y factores genéticos (Ritchie *et al.*, 1995). SUBSTOR puede ser ejecutado dentro de la interface DSSAT o como un programa independiente usando los archivos de entrada para el experimento y los respectivos archivos de clima, suelo, información genética etc.

Travasso *et al.*, (1996), validaron y calibraron el modelo SUBSTOR con datos experimentales de diferentes lugares y años en Argentina. Durante el proceso de

calibración del modelo calcularon los coeficientes genéticos de 4 variedades. Al realizar las simulaciones obtuvieron muy buenos ajustes con los datos de campo en la variable rendimiento aun cuando el modelo sobreestimo el IAF.

Bowen *et al.*, (2001), validaron el modelo SUBSTOR en cinco países de la región Andina comparando rendimientos simulados con datos de experimentos en campo encontrando situaciones favorables y desfavorables para el modelo. Calcularon rendimientos en el rango entre 16 y 56 toneladas por hectárea y demostraron importantes incrementos en los rendimientos con la aplicación de urea. También mostraron que en un 15% de los experimentos realizados no existió respuesta a la aplicación de fertilizante debido a la falta de agua. Sarmiento y Bowen (2002) analizaron el crecimiento y la dinámica de absorción de nitrógeno de una variedad *Andígena* en alta montaña tropical venezolana y usaron la información recolectada en este trabajo para validar y calibrar el modelo SUBSTOR, que permitió por medio de simulaciones evaluar alternativas para optimizar la fertilización nitrogenada. En este trabajo, el modelo logro simular correctamente la biomasa foliar y de tubérculos, pero subestimo biomasa de tallos y sobreestimo biomasa de raíces. Los autores sugieren una calibración más completa y detallada para poder utilizar el modelo con mayor confiabilidad.

En las condiciones de nuestro país se encontraron dos experiencias en el uso de DSSAT para simulación del cultivo de papa, ambas en condiciones de la Sabana de Bogotá. Olarte (2000), realizo la validación del modelo SUBSTOR potato de la versión 3.5 de DSSAT, para las variedades *Solanum tuberosum ssp. Andígena* variedad *Tuquerreña* y *Solanum phureja* variedad yema de huevo. En este trabajo se utilizó información diaria de variables climáticas y parámetros físico-químicos del perfil del suelo y mediante muestras quincenales a partir de la emergencia se evaluaron las variables de crecimiento y desarrollo fisiológico en cada cultivar. La validación del modelo muestra un buen ajuste para las variables peso fresco de tubérculos, peso seco de tubérculos e índice de área foliar para las variedades Tuquerreña y Yema de huevo.

Forero y Garzón (2000), calibraron el modelo SUBSTOR en condiciones de la Sabana de Bogotá para las variedades Diacol Capiro, Diacol Monserrate, Parda Pastusa e Ica Morita calculando y determinando los coeficientes genéticos G2, G3, P2 y PD de cada cultivar. Respecto al coeficiente TC, muestran que las simulaciones no son sensibles a este

parámetro. La validación del modelo calibrado mostró diferencias mínimas entre los datos simulados y medidos en los experimentos de campo. La variable que mostró el mejor ajuste fue el rendimiento fresco, seguida del número de días hasta tuberización y hasta la madurez fisiológica, mientras que se observaron algunas diferencias en el IAF.

Varios autores han utilizado modelos de simulación para evaluar el impacto del calentamiento global en el cultivo de papa (Carter *et al.*, 1996; Rosenzweig *et al.*, 1996), la mayoría en condiciones de altas latitudes y sus resultados son difícilmente aplicables a latitudes tropicales. Hijmans (2003), predice una disminución de los rendimientos de papa a escala global de hasta un 18% suponiendo medidas de adaptación y de hasta un 32% en ausencia de dichas medidas, utilizando para sus modelaciones los escenarios de cambio climático en las temperaturas y en la radiación solar, sin tener en cuenta cambios en la precipitación o incrementos en el CO₂.

Medany (2006), evaluó el impacto del cambio climático en el cultivo de papa y la utilización de medidas de adaptación. La metodología utilizada en este trabajo, consistió en validar y calibrar el modelo respecto a condiciones actuales mediante experimentos desarrollados en Egipto en la temporada de siembra de 2006-07 incluyendo tres niveles diferentes de irrigación. Los datos simulados no mostraron diferencias significativas con los datos medidos en los experimentos. En este trabajo, el modelo DSSAT fue capaz de simular el rendimiento de papa en condiciones actuales, con diferencias porcentuales de entre 0,01 y 0,08%, comparado con los datos medidos en campo. Para evaluar el impacto del cambio climático se realizaron simulaciones en fechas de siembra diferentes, con los tres niveles de irrigación (80, 100 y 120% de la evapotranspiración potencial), utilizando escenarios de cambio climático para los años 2025, 2050, 2075 y 2100 y se realizaron comparaciones respecto de los rendimientos obtenidos para el año 2005. En este trabajo se concluye que DSSAT puede ser usado satisfactoriamente para predecir el rendimiento del cultivo de papa en Egipto, y mediante el uso de los escenarios de cambio climático se determinaron tanto reducciones como aumentos de los rendimientos en función los escenarios de cambio climático, los niveles de irrigación y las fechas de siembra.

Abdrabbo (2010), utilizó el modelo SUBSTOR para simular procesos fisiológicos y el rendimiento del cultivo de papa. La calibración del modelo se realizó para dos variedades de papa en condiciones similares al trabajo de Medany (2006). Para las simulaciones de

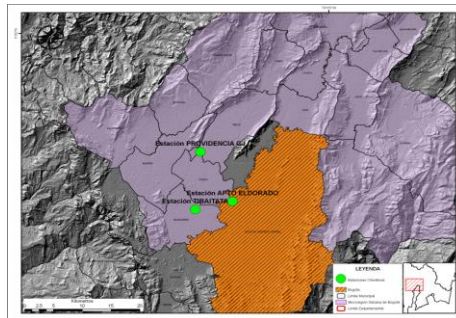
cambio climático, utilizaron las salidas de dos modelos de circulación general (CSIRO y HadCM3), usando solamente el escenario de emisiones A1, para el año 2050 usando cuatro niveles de irrigación. El modelo muestra disminuciones del rendimiento entre 11% y 13% en promedio respecto a las simulaciones de 2005 y diferencias en la respuesta de las dos variedades frente a los niveles de la irrigación.

2. Metodología del trabajo

2.1 Zona de estudio

La zona suroeste de la Sabana de Bogotá comprende los municipios de Mosquera, Facatativá, Funza, Madrid, Tenjo, El Rosal y hasta los límites con la ciudad de Bogotá. Esta zona, ubicada sobre la cordillera oriental en la región central del departamento de Cundinamarca hace parte del Altiplano Cundiboyasense. El principal río que la recorre es el río de Bogotá, que atraviesa la Sabana de sur a norte por el costado occidental de la ciudad de Bogotá. Otras corrientes secundarias que bañan la Sabana son los ríos Balsillas, Buraca, Checua, Frío, Subachoque y Tunjuelo (Environmental Ingenieros consultores, 1999). El paisaje de la Sabana de Bogotá se caracteriza por su clima frío, con fuertes contrastes de tiempo soleado y lluvioso. También se caracteriza por la calidad de los suelos que ha sido confirmada por diferentes análisis de laboratorio, en especial, los suelos de Tibaitatá, clasificados como unos de los poquísimos suelos de primera que existen en todo el país. En estos suelos es característica la existencia de láminas de arcillas muy duras por lo que se usan preferiblemente para pasturas.

Figura 2-1: Estaciones climáticas de la zona de estudio, Sabana de Bogotá.



Fuente: esta investigación.

En la Sabana, las heladas dificultan la continuidad y éxito de todos los cultivos que no se realicen bajo invernadero, por lo que son comunes los cultivos de flores y hortalizas con este tipo de tecnologías. La contaminación biológica y química del río Bogotá, disminuye la calidad de los productos que se riegan con sus aguas y es necesario hacer uso de aguas subterráneas o de algunas de las corrientes pequeñas que todavía tienen bajos niveles de contaminación (Carrizosa, 2007).

2.2 Información utilizada

Para el desarrollo de este trabajo se analizó información climatológica registrada en tres estaciones pertenecientes a la red de estaciones meteorológicas del IDEAM, ubicadas en los municipios de Mosquera, Tenjo y Bogotá. Para realizar las simulaciones del rendimiento de papa se utilizaron series de tiempo diarias de las variables precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y brillo solar, registradas durante los años 1992, 1993, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010. Fueron utilizados los valores mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima generados por el modelo regional PRECIS y el HadCM3 bajo los escenarios A1B y A2, para los periodos 2011-2040 y 2041-2070 suministrados también por el IDEAM, para generar series de datos diarios y realizar las simulaciones del rendimiento del cultivo de papa bajo escenarios de cambio climático.

La ubicación de las estaciones, sus coordenadas geográficas en grados y minutos y su altitud en metros aparecen en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Estaciones climatológicas de la zona de estudio.

| | | | |
|-----------|----------------|-----------|-----------|
| Estación | G. Providencia | Tibaitatà | El Dorado |
| Municipio | Tenjo | Mosquera | Bogotá |
| latitud | 4° 47' | 4°41' | 4.°42' |
| longitud | 74°12' | 74°12' | 74°09' |
| altitud | 2560 | 2543 | 2547 |

Con el fin de realizar la caracterización climática de la zona de estudio se utilizaron las series mensuales de precipitación acumulada y brillo solar y los promedios mensuales de temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima. También se usaron las series de temperaturas máximas y temperatura mínimas absolutas. Esta información fue

usada junto con la serie histórica del índice oceánico ONI para analizar el impacto de la oscilación ENOS sobre las condiciones climáticas en la zona de estudio.

Los datos de propiedades físicas y químicas de los suelos fueron tomados del Estudio General de Zonificación y Caracterización de Tierras del IGAC (2000) y los datos del cultivo de papa fueron tomados de los trabajos de Forero *et al.*, (2000), Terán *et al.*, 2006, Olarte *et al.*, 2000 y una comunicación personal con la Federación Nacional de Papicultores FEDEPAPA (Porras, 2010).

2.2.1 Series mensuales y anuales

Para realizar la caracterización climática de la zona de estudio, así como para entender la variabilidad climática y las tendencias de cambio climático, se utilizaron las series mensuales de las variables climáticas precipitación, temperatura máxima, media. Las series de tiempo mensuales de los valores absolutos de temperatura máxima y mínima, así como los acumulados mensuales de precipitación y brillo solar y los promedios mensuales de temperatura media, fueron sometidas a un control de calidad usando el software ANCLIM, que somete cada serie de tiempo a diferentes pruebas estadísticas como el test de Alexanderson y la prueba de Mann entre otras, para detectar los datos atípicos y además aquellos puntos en los cuales la serie deja de ser homogénea. Este software retira valores los atípicos de acuerdo con criterios relacionados con la dispersión de los datos que pueden ser establecidos por el usuario y los reemplaza con datos generados siguiendo diferentes algoritmos(Stepanek, 2007). El software utiliza una serie de referencia que debe estar completa y homogénea, para poder completar los datos faltantes en las demás series llamadas series candidatas. En este caso la estación Tibaitatá se tomó como estación de referencia por poseer el menor número de datos faltantes y por ser la serie de mayor extensión temporal. Los datos faltantes en la estación candidata para el caso de la precipitación se calculan multiplicando el valor en la serie de referencia por el promedio histórico de la serie candidata y luego dividiendo el resultado por el promedio de la serie de referencia. Para el caso de valores de temperatura o brillo solar los valores son calculados estimando el promedio de cada serie durante un periodo dado y los valores faltantes son reemplazados por un valor calculado en cada año por el valor de la serie de referencia sumado al promedio de la serie candidata y restado del promedio de la estación de referencia (Stepanek, 2007).

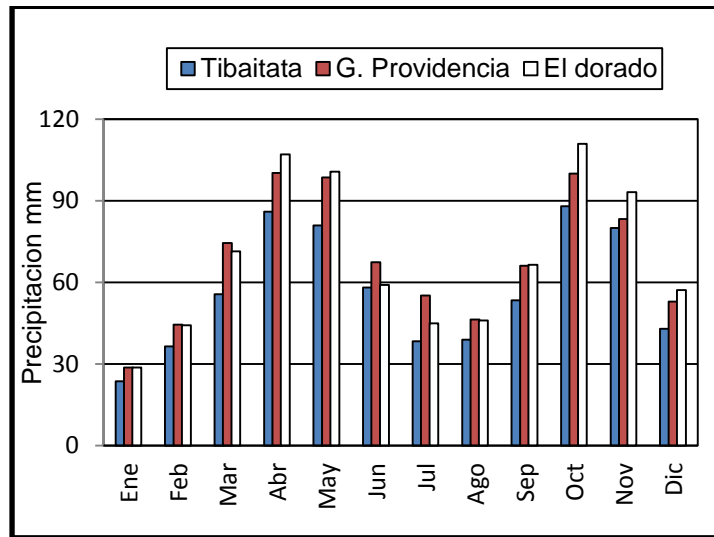
ANCLIM puede realizar homogenizaciones en las series después de detectar los puntos en los cuales identifica un cambio de media. Esta opción no fue tomada en cuenta, pues esos cambios que pueden ser asociados a errores de medición o transcripción de datos, también pueden estar asociados a tendencias propias de las series de tiempo provocados por ejemplo, por cambios en el uso del suelo de la región que rodea la estación relacionados con construcciones civiles, cultivos, tala de bosques o urbanización. Eventualmente estos cambios de media pueden ser relacionados con manifestaciones locales del cambio climático, por lo que las series de tiempo fueron sometidas a una prueba estadística para determinar si existen tendencias de cambio. El test no-paramétrico de Mann-Kendall, fue utilizado con el fin de determinar si las series reflejan evidencias significativas de tendencias de aumento o disminución en el tiempo para cada una de las variables climáticas. Se hicieron análisis de tendencia a las series de promedios mensuales de temperatura máxima y mínima y a los valores acumulados mensuales de precipitación y brillo solar. Para analizar tendencias de cambio año tras año en los valores anuales de temperatura y precipitación, a partir de las series de tiempo mensuales se construyeron series anuales usando el criterio de disponer de por lo menos 9 de los 12 datos mensuales para generar un promedio anual de temperatura y en el caso de precipitación era muy importante contar con los doce acumulados anuales para generar el acumulado anual.

2.3 Temporadas agroclimáticas

El comportamiento anual de las lluvias sobre la zona de estudio es determinado por el doble paso de la ZCIT sobre la Sabana de Bogotá, generando dos temporadas secas y dos temporadas de lluvia (Boshell, 2009). Este patrón determina a su vez el comportamiento de otras variables ambientales como las temperaturas, la radiación solar, la humedad y además determina el comportamiento de diferentes ciclos en los cultivos y en las prácticas de manejo acostumbradas por los productores. También determina los ciclos de vida de algunas plagas y de sus enemigos naturales, y condiciona el desarrollo de enfermedades. En general influye en forma directa sobre la capacidad productiva e incluso determina la seguridad y condiciones de vida de los productores. Este comportamiento bimodal se observa claramente en la variación mensual de las lluvias sobre la zona de estudio, mostrado en la Figura 2-2.

Peña *et al.*, (2010), analizaron las series históricas del altiplano Cundiboyasence por temporadas climáticas, asumiendo que las temporadas secas se presentan entre los meses de enero a marzo (primera temporada seca PTS) y de julio a septiembre (segunda temporada seca STS), mientras que los meses de abril a junio y de octubre a diciembre constituyen respectivamente la primera y segunda temporadas de lluvia PTL y STL.

Figura 2-2: Promedios mensuales multianuales de precipitación



En la Figura 2-2, puede verse claramente como el mes de diciembre es históricamente más seco, que marzo y septiembre, por lo cual se considera que la PTS del año inicia en diciembre y termina en febrero, mientras que en marzo empieza la PTL, que terminaría en el mes de mayo. La STS, a mitad de año se extendería entre los meses de junio a agosto, mientras la STL comprendería los meses de septiembre a noviembre. La distribución de las lluvias por temporadas puede verse afectada por diferentes fenómenos atmosféricos, principalmente por la incidencia de fenómenos como El Niño o La Niña, que alteran tanto en duración como intensidad los patrones normales. El análisis por temporadas agroclimáticas constituye una alternativa metodológica de análisis climático para la zona de estudio, que como se verá más adelante, disminuye el volumen de datos y la variabilidad de los mismos y permite analizar de una forma más simple los patrones de comportamiento de las variables climáticas y su influencia sobre los cultivos. La influencia de La oscilación ENOS y el cambio climático sobre las variables climáticas de la zona de estudio se analizará en función de este enfoque por temporadas agroclimáticas.

2.3.1 Desviación estándar y coeficiente de variación

La desviación estándar es una medida de la dispersión de los datos respecto de sus valores promedio muy usada en diferentes tipos de análisis estadísticos, que presenta la ventaja de que sus unidades físicas son las mismas unidades de la variable que se analiza, pero presenta como desventaja que sus valores absolutos dependen de la magnitud de la variable, por lo que no puede ser utilizada para comparar dos variables de naturaleza o escalas diferentes. El coeficiente de variación es una medida de la dispersión relativa de los datos, exenta de unidades y se representa como porcentaje de variación, de tal forma que permite comparar las dispersiones de conjuntos de datos con magnitudes y distribuciones diferentes.

2.4 Análisis de Correlación

El coeficiente de correlación de Pearson, es un índice que mide el grado de asociación entre distintas variables (Wilks, 2006). El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución y fácil interpretación que toma valores entre -1 y 1. Si tenemos un par de variables cuyo coeficiente de correlación de Pearson es igual a 1, se dice que la correlación es perfecta y positiva, indicando que exactamente en la medida que aumenta una de las variables, aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta y difícilmente ocurrirá con variables climáticas, ya que cualquier fenómeno climático por lo general depende del comportamiento de varias variables, sin embargo entre mayor sea el valor de la correlación, se puede estar más seguro de que existe algún tipo de asociación los fenómenos descritos por dichas variables. Si el coeficiente se acerca a -1, se habla de correlación perfecta negativa e indicaría que en la medida que aumenta una de las variables, la otra tiende a disminuir. Para variables que no están relacionadas entre sí, la correlación toma valores cercanos a cero. El cuadrado del coeficiente de correlación, conocido como coeficiente de determinación, indica el porcentaje de la variación de una de las variables que está asociado o puede ser explicado con la variación de la otra.

Los análisis de correlación de series climáticas mensuales por lo general no dan resultados satisfactorios, así exista una asociación evidente entre las variables analizadas, ya que se tienden a relacionar comportamientos estacionales diferentes y

esto tiende a disminuir la magnitud de las correlaciones. Por lo tanto se recomiendan correlaciones para valores promedios o acumulados de varios meses dentro de las series (IDEAM, 2010b).

Debido a que los patrones de precipitación a escala local son modulados por diferentes fenómenos a escala regional o global como la ZCIT o la oscilación ENOS (IDEAM, 2001), pero no siempre de manera simultánea ya que cada fenómeno involucra cierto grado de inercia en su propagación, su influencia puede variar de uno a varios meses. Se utilizaron correlaciones sincrónicas o sin rezago (Lag 0), para analizar el grado de asociación simultánea entre las variables climáticas de la zona de estudio y el comportamiento del Pacífico, representado mediante el índice ONI. También se probaron rezagos de 1, 2 y 3 meses (Lag 1, Lag 2, Lag 3), para identificar si había una mayor asociación con estos desfases de tiempo.

Se calculó la correlación entre el promedio trimestral del ONI y el acumulado de precipitación para cada temporada agroclimática, con y sin rezagos, con el fin de establecer el nivel de influencia de la oscilación ENOS sobre la precipitación durante cada una de las temporadas agroclimáticas del año. Se realizaron pruebas de correlación entre los valores mensuales del índice ONI y los datos mensuales de las variables climáticas precipitación, temperatura máxima media, temperatura mínima media, temperatura media y brillo solar. Se realizaron correlaciones sincrónicas (Lag 0) y con rezagos de 1, 2 y 3 meses (Lag 1, Lag 2 y Lag 3) y con las medias móviles de las variables climáticas para identificar el grado de influencia del comportamiento del pacífico sobre las variables climáticas de la zona de estudio.

2.5 Variabilidad Climática Inter-anual

El nivel de impacto de la oscilación ENOS sobre las condiciones climáticas de la zona se analizó para cada una de las temporadas agroclimáticas, comparando los valores de las variables climáticas para cada temporada durante los eventos El Niño y La Niña, con los promedios históricos para cada temporada registrados en las tres estaciones meteorológicas de la zona de estudio con el fin entender en qué medida las condiciones de calentamiento o enfriamiento en el Pacífico se relacionan con el aumento o disminución en los valores de las variables climáticas de la Sabana de Bogotá. Se tuvo en cuenta que la duración temporal de cualquiera de las fases de la oscilación es variable

y no se puede hablar de un año o semestre completo El Niño o La Niña, pues en la mayoría de los casos dichas condiciones en el Pacífico predominan durante solo algunos meses del año. Si mínimo durante dos de los tres meses de cada temporada agroclimática las condiciones del Pacífico indican presencia de alguna de las fases de la oscilación, se asumen estas condiciones para dicha temporada. De esta forma se evidencia la presencia de las fases de la oscilación en la Tabla 2-2, construida a partir de los datos mensuales del ONI, donde los eventos El Niño se observan con color rojo y los eventos La Niña con azul.

Tabla 2-2: Temporadas agroclimáticas en relación con la ocurrencia de El Niño y La Niña. PTS: primera temporada seca, PTL: primera temporada de lluvia, STS: segunda temporada seca, STS: segunda temporada de lluvia.

| TEMPORADAS AGROCLIMATICAS | | | | AÑO | TEMPORADAS AGROCLIMATICAS | | | | AÑO |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|---------------------------|-----|-----|-----|------|
| PTS | PTL | STS | STL | 1970 | PTS | PTL | STS | STL | 1991 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1971 | PTS | PTL | STS | STL | 1992 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1972 | PTS | PTL | STS | STL | 1993 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1973 | PTS | PTL | STS | STL | 1994 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1974 | PTS | PTL | STS | STL | 1995 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1975 | PTS | PTL | STS | STL | 1996 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1976 | PTS | PTL | STS | STL | 1997 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1977 | PTS | PTL | STS | STL | 1998 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1978 | PTS | PTL | STS | STL | 1999 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1979 | PTS | PTL | STS | STL | 2000 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1980 | PTS | PTL | STS | STL | 2001 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1981 | PTS | PTL | STS | STL | 2002 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1982 | PTS | PTL | STS | STL | 2003 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1983 | PTS | PTL | STS | STL | 2004 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1984 | PTS | PTL | STS | STL | 2005 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1985 | PTS | PTL | STS | STL | 2006 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1986 | PTS | PTL | STS | STL | 2007 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1987 | PTS | PTL | STS | STL | 2008 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1988 | PTS | PTL | STS | STL | 2009 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1989 | PTS | PTL | STS | STL | 2010 |
| PTS | PTL | STS | STL | 1990 | PTS | PTL | STS | STL | 2011 |

Para realizar las simulaciones del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual se seleccionaron años en los que las condiciones climáticas de la zona reflejaron claramente la influencia de la oscilación. Para la selección de estos años, se tuvo en cuenta el comportamiento de las variables climáticas, tratando de captar las condiciones más contrastantes entre sí en la precipitación y temperaturas, ya que como se discutirá más adelante son las que muestran mayor grado de asociación. También se consideró el comportamiento del ONI, de manera que indicara que las condiciones El Niño, La Niña o Neutras se mantuvieran durante la mayor parte del año, o por lo menos durante la temporada de siembra que se utilizó para las simulaciones (marzo-agosto) y además teniendo en cuenta la disponibilidad y calidad de información a escala diaria de

las variables precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y brillo solar, requeridas para realizar las simulaciones del cultivo con DSSAT.

2.6 Análisis de tendencia de Mann-Kendall

Se utilizó la prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias de aumento significativas en las series de datos anuales construidas a partir de las series mensuales entregadas por el IDEAM y también para las series de datos por temporadas agroclimáticas, con el fin identificar si esas tendencias en los valores anuales tienen alguna distribución a lo largo del año, es decir comprobar si alguna de las temporadas del año se está haciendo más o menos lluviosa o calurosa año tras año. A éstas series se les realizó un control de calidad y un llenado de datos faltantes mediante el software ANCLIM, descrito brevemente en la sección 2.2.1 que no era rigurosamente necesario ya que una de las virtudes de la prueba de Mann-Kendall, es que permite datos faltantes, aunque en la medida de que falten menos datos, el resultado de la prueba puede lograr mayor confianza estadística. Esta prueba estadística no paramétrica permite analizar la existencia de tendencia de aumento o disminución en una serie de tiempo, basada no en los datos mismos sino en los rangos de cada uno respecto a los demás datos de la serie, lo que la hace ampliamente robusta frente a datos atípicos o altamente desviados.

La prueba de Mann-Kendall ha sido ampliamente usada en estudios de ciencias ambientales gracias a su gran simplicidad y a que es bastante robusta frente a datos considerablemente dispersos e incluso con muchos datos faltantes (Yunling y Yiping, 2005). La prueba asume la presencia de una tendencia monotonica y por ende no permitiría identificar si hay tendencia estacional o cualquier otro tipo de ciclo presente en los datos. Para aplicar esta prueba basta con construir un estadístico de prueba que depende de la varianza de los datos y de la sumatoria del número de veces en los que las diferencia entre dos datos X_i y X_j es positiva o negativa, siendo $i > j$. La varianza de los datos es asumida como constante a lo largo de las serie de tiempo y puede ser calculada fácilmente en función del número de datos. Este estadístico de prueba según Mann y Kendall, presenta una distribución normal y es comparado en una prueba estadística de dos colas para diferentes niveles de significancia estadística. El valor que tome el estadístico de prueba permitirá ubicarlo en la zona de rechazo de la hipótesis nula que afirma la no existencia de tendencia en la serie estadística aceptando la hipótesis

alternativa que indicaría la existencia de tendencia. El signo del estadístico indica si tendencia es positiva o negativa. (Salmi *et al.*, 2002).

2.7 Método de Estimación de pendiente de Sen

Se utilizó el método no paramétrico de Sen para cuantificar la tendencia de cambio en el tiempo de las series climáticas. Esta metodología realiza una estimación de la variación de la serie en función del tiempo asumiendo una tendencia lineal. Se asume como estimativo de la variación de la serie de tiempo (Estimativo de Sen) a la mediana de todas las pendientes que pueden ser calculadas entre los datos de la serie. Los intervalos de confianza para este valor de pendiente son calculados en función de la varianza de la serie y el número de datos. (Salmi *et al.*, 2002).

Con las series anuales y por temporadas agroclimáticas construidas a partir de las series mensuales, utilizando la metodología de Sen se calculó la tendencia anual de estas variables para construir así un referente del efecto local del cambio climático en la zona de estudio que se comparó con los resultados de los modelos regionales del clima corridos por el IDEAM. Se utilizaron las series de tiempo anuales para cada temporada agroclimática, con el fin de identificar señales de cambio climático que posiblemente no pueden ser identificadas en las series anuales, ni predichas por los modelos de simulación del clima.

2.8 Escenarios de cambio climático

Utilizando modelos globales de circulación MGC de baja resolución que tienen una grilla horizontal de 1°aproximadamente, entre los que se destaca por su buena capacidad para modelar el clima presente, tanto en las variables que describen la circulación atmosférica viento y presión, como en la precipitación y temperaturas a escala anual y estacional (IDEAM, 2010c) el modelo HadCM3Q, y modelos regionales de alta resolución MRC que pueden trabajar con grillas de resolución espacial de 25 kilómetros aproximadamente, como el modelo japonés GSM (Global Spectral Model) del Meteorological Research Institute MRI y el modelo regional PRECIS del Reino Unido que toman las condiciones iniciales generadas por modelos de baja resolución ofrecidos por centros de investigación internacionales como el MRI, el Centro Hadley del Reino Unido y el Community Climate

System Model (modelo CCSM) de los Estados Unidos (IDEAM, 2010), el IDEAM proyectó cambios en el clima futuro para Colombia, realizando una simulación previa del clima presente con datos registrados de precipitación, temperatura del aire y humedad relativa. Mediante las ecuaciones de ajuste encontradas en el proceso de validación del modelo respecto a los datos del clima presente se calcularon las tendencias de cambio que aplicadas a los datos simulados por los modelos regionales para los diferentes escenarios de cambio climático permitieron obtener resultados representativos de las variables meteorológicas a lo largo del territorio nacional para el periodo 2011-2100 bajo los escenarios A1B, A2, B2, A1B con sulfatos y A2 con sulfatos. De estas proyecciones climáticas generadas por el IDEAM (2010), se analizaron para las tres estaciones de la zona de estudio los escenarios A1B, A2 y B2, por ser aquellos que muestran mayores diferencias entre sí, tomando dos periodos de análisis, el primero del año 2011 a 2040 y el segundo de 2041 a 2070.

2.9 Datos de Entrada para DSSAT

A manera de guía para la utilización DSSAT, se describirá paso a paso los insumos de información para la simulación del rendimiento potencial del cultivo de papa.

2.9.1 Variables de clima

DSSAT necesita datos diarios de las variables temperatura máxima y temperatura mínima, radiación solar y precipitación. Si se busca que la simulación responda significativamente a los rendimientos reales, estas cuatro variables fundamentales para el modelo, en lo posible deben ser registradas por una estación meteorológica muy cercana al sitio del experimento, principalmente la variable precipitación que presenta una mayor variabilidad espacial, incluso en zonas geográficamente homogéneas. De ser necesario para efectos de calibración del modelo se puede optar por ubicar un pluviómetro en el lugar mismo del experimento. Las unidades de la precipitación diaria para alimentar DSSAT son milímetros y las temperaturas máximas y mínimas diarias deben estar en grados Celsius. Si no se cuenta con datos de la radiación solar incidente, situación común para muchos lugares, utilizando datos diarios de brillo solar y mediante la aproximación de Angstrom puede realizarse una estimación de los datos de radiación necesarios para las simulaciones. Los datos de radiación solar, ya sea medidos o

derivados se introducen en unidades de mega julios por metro cuadrado por día. Datos diarios de vientos y humedad relativa en caso de estar disponibles pueden ser incluidos en el modelo mejorando los resultados de las simulaciones.

Como escenarios representativos de variabilidad climática interanual El Niño, Neutro y La Niña se utilizaron los años 1992, 1993 y 2008 respectivamente. Para realizar las simulaciones del rendimiento de papa bajo escenarios de cambio climático se construyeron series de datos diarios a partir de los promedios mensuales de los periodos 2011-2040 y 2041-2070, representativos de los años 2025 y 2055 respectivamente. También se realizaron simulaciones para el periodo comprendido entre los años 2005 a 2010 en condiciones de Tibaitatá, ya que solamente de esta estación se disponía de datos climáticos diarios necesarios para las simulaciones. El objetivo de simular este periodo fue generar un promedio actual de los rendimientos potenciales del cultivo para la zona de Tibaitatá que permitiera comparar las simulaciones bajo escenarios de variabilidad y cambio climático.

Los criterios para la selección de los años para las simulaciones fueron la disponibilidad y calidad de los datos diarios, en el sentido que el número de datos faltantes dentro de un periodo de cultivo fuera lo menor posible, que no existirán valores de precipitación negativos, ni valores de temperaturas máximas menores que las temperaturas mínimas para el mismo día. También se tuvo en cuenta que los datos de temperaturas no estuvieran fuera de un rango de más o menos 3 veces la desviación estándar respecto del valor medio de cada mes. También se tuvo en cuenta que los datos de radiación solar no podían tener valores menores al valor calculado para la radiación solar difusa con cielo completamente nublado cuando el número de horas de brillo solar es cero calculado con la aproximación da Angstrom. Fue necesario realizar un proceso previo de llenado de datos ya que el software no permite huecos en las series para los periodos que van a ser simulados. Los huecos en temperatura máxima, mínima o brillo solar se completaron con los promedios mensuales para el mes en que estos datos hacían falta. Para la precipitación, solo se completaron aquellos periodos en que no hacían falta varios datos seguidos, en cuyo caso este dato este se remplazó por cero. Se realizaron comparaciones de las simulaciones con diferentes valores en los datos faltantes que mostraron que el modelo no es demasiado sensible cuando faltan algunos pocos datos dentro del periodo de simulación.

Para las simulaciones bajo escenarios de cambio climático, fue necesaria la generación de datos diarios a partir de los datos mensuales de los diferentes escenarios suministrados por el IDEAM. Se utilizó la herramienta Marksim 1 (Jones y Jones, 2002) que permite la generación de series de tiempo climáticas para modelamiento de cultivos, desarrollada por el Centro internacional de Agricultura Tropical CIAT, como una forma útil y sencilla de obtener series de tiempo sintéticas enfocadas principalmente a la simulación agrícola con DSSAT, diseñada para lugares donde no hay estaciones climáticas.

Marksim usa promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima, las coordenadas geográficas y la altitud como datos de entrada para la generación de series de tiempo diarias de las cuatro variables necesarias para la simulación con DSSAT. Marksim usa dos niveles de modelación para la generación de los datos, primero un generador de lluvia estocástico basado en un modelo marcoviano de tercer orden, en el cual la probabilidad de contar con un día húmedo depende de si hubo lluvia o no en los tres días anteriores. Este método ha mostrado resultados altamente significativos para el 92% de las estaciones en zonas tropicales y en un segundo nivel de modelación la cantidad de precipitación es ajustada a una función de distribución de probabilidad gamma teniendo en cuenta el principio de la máxima verosimilitud de acuerdo con la media y los parámetros de forma de la distribución para cada mes que son determinados usando técnicas de remuestreo (Jones *et al.*, 2002).

Dentro de Marksim, las series de temperaturas máximas y mínimas son generadas usando el generador climático de DSSAT (Pickering *et al.*, 1994, tomado de Jones 2002), calculando los valores de temperatura teniendo en cuenta si un día cualquiera es húmedo o seco y calculando las desviaciones estándar de los datos haciendo uso de una combinación de ecuaciones de regresión.

Para la generación de datos de radiación, Marksim calcula la radiación solar en la superficie de la tierra teniendo en cuenta el potencial de radiación en la cima de la atmósfera que es un parámetro atmosférico que depende del día del año y un coeficiente de transmisividad atmosférica de la radiación solar que es función de la declinación, la longitud media del día, la distancia del sol, el día del año y la latitud. La transmisividad es estimada como función de la transmisividad del cielo sin nubes, las temperaturas máximas y mínimas y dos parámetros empíricos (Jones *et al.*, 2002). Con Marksim se generaron series diarias de las cuatro variables mencionadas, a partir de los promedios

mensuales de temperatura máxima, mínima y precipitación para años en los que se contaba con datos diarios, con el fin de comparar y evaluar la funcionalidad de estas series para realizar las simulaciones bajo escenarios de cambio climático.

Las series diarias de radiación usadas para las simulaciones bajo escenarios de variabilidad climática fueron construidas a partir de los datos diarios de brillo solar registrados en las estaciones del IDEAM usando la aproximación de Angstrom (FAO, 2006, Simbaqueva, 2003). De La Casa *et al.*, (2003) mostraron que los rendimientos potenciales de papa que se obtienen utilizando datos de radiación estimada por métodos de regresión como el método de Angstrom en simulaciones con DSSAT resultan casi idénticos a los simulados con registros de radiación solar.

- Aproximación de Angstrom

Los datos diarios de radiación solar son escasos por la complejidad de instrumentos de medición necesarios para su registro. Si no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, esta variable puede ser estimada con datos de brillo solar o fotoperiodo mediante la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar global en la superficie del suelo, con la radiación incidente en el tope de atmosfera, también llamada radiación extraterrestre, la duración máxima posible del día, la insolación diaria o brillo solar e integra también características geográficas locales (Rietveld, 1977).

La fórmula de Angstrom que permite calcular la radiación solar incidente en la superficie del suelo R_s , tiene la siguiente forma (Ecuación 2-1)

$$R_s = R_a \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad (2-1)$$

La radiación solar en el tope de la atmosfera R_a , depende de la latitud del lugar y varía para cada día del año. Puede ser calculada en función de la constante solar, la distancia relativa tierra-sol y la declinación solar (Duffie y Beckman, 1980), aunque las tablas de sus valores medios en función de la latitud están disponibles en la publicación de FAO (2006), así como la duración máxima teórica del día o duración de la insolación N , que también puede ser calculada en función de la latitud y la declinación solar (Quereda, 2005). El brillo solar n o fotoperiodo es una variable que depende de la nubosidad y

corresponde al número de horas al día de radiación directa y se mide mediante un instrumento ubicado en las estaciones climáticas llamado heliómetro (IDEAM, 2001).

Las constantes a y b , también llamadas parámetros locales de ajuste o coeficientes de la relación de Angstrom (IDEAM, 2005), son una medida de la cantidad de radiación que es percibida en tierra cuando hay presencia de nubes, es decir radiación difusa y de la radiación recibida con cielo despejado o radiación directa. Estos parámetros son determinados localmente buscando el mejor ajuste entre datos medidos y calculados. Para la Sabana de Bogotá estos parámetros toman valores de 0,26 y 0,51 respectivamente (Simbaqueva, 2003).

- Datos diarios de temperatura máxima y mínima

Como se verá más adelante, la generación de datos diarios de temperatura y precipitación utilizando generadores como Marksim no fue satisfactoria, por lo que fue necesario utilizar otros métodos de generación de datos. Teniendo en cuenta que los datos diarios de temperatura máxima o mínima presentan una distribución normal, característica que fue comprobada mediante histogramas y pruebas estadísticas (Wilks, 2006), utilizando el valor promedio de cada mes y su respectiva distribución estándar, se generaron aleatoriamente series de datos para los periodos que se necesitaban simular.

Para evaluar la utilidad de este método se compararon los datos generados con las series de temperaturas máximas y mínimas de años en los que se tenían datos diarios y con los datos para los mismos periodos generados con Marksim.

- Datos diarios de precipitación

Como se discutirá más adelante, la generación de datos diarios de precipitación con Marksim tampoco fue satisfactoria. El método usado para la generación de las temperaturas no es útil en este caso, ya que la precipitación diaria no tiene una distribución normal. Para generar datos diarios de precipitación a partir de valores mensuales es necesario asumir una distribución de estos datos que coincida con el acumulado mensual, distribución que puede variar mes a mes y no es fácil de parametrizar. Para evitar el problema de la generación de datos diarios de precipitación, fueron utilizadas las series de tiempo de años que en el pasado tuvieran acumulados

similares a los que son estimados bajo los diferentes escenarios. Por ejemplo, el promedio de precipitación para el periodo 2011-2040 bajo el escenario A2 es de 678 mm al año. Para la simulación de este año, se utilizaron los datos diarios de precipitación de la estación Tibaitatá, del año 1989, que sumaron en total de 679 mm para todo el año, de esta forma se utiliza una distribución de los datos de precipitación propia del lugar donde se quiere realizar la simulación.

Dentro de DSSAT, en la carpeta *Weather*, se almacenan los archivos con terminación *.WTH* con la información climática para cada año a simular. El nombre de cada archivo lleva cuatro letras que indican el lugar, dos números que indican el año y dos números que indican el número del experimento. Cada archivo debe llevar los datos geográficos de la estación climática donde fueron medidos y deben estar ordenados en columnas, tal como se indica en la Figura (2-3). El nombre del archivo representado es *TIBA9201.WTH*. La primera columna del archivo contiene la información del año y día juliano para el periodo de simulación. Por ejemplo, la fila cuyo primer número es 92020 corresponde al día 20 de enero del año 1992. La segunda columna contiene la variable radiación, luego la temperatura máxima, seguida de la temperatura mínima y por último la variable precipitación.

Figura 2-3: Ejemplo de archivo de datos climáticos de Tibaitatá para el año 1992

| WEATHER DATA : Tibaita, Mosquera Colombia | | | | | | | |
|---|------|--------|------|------|-------|-------|-------|
| @ INSI | LAT | LONG | ELEV | TAV | AMP | REFHT | WNDHT |
| GACM | 4.41 | -74.12 | 2543 | 13.2 | -99.0 | -99.0 | |
| 92001 | 17.1 | 19.1 | 6.0 | .0 | | | |
| 92002 | 18.4 | 20.6 | 1.2 | .0 | | | |
| 92003 | 19.7 | 21.1 | 3.3 | .0 | | | |
| 92004 | 17.9 | 19.7 | 2.0 | 5.5 | | | |
| 92005 | 9.5 | 17.2 | 8.3 | .0 | | | |
| 92006 | 12.2 | 19.6 | 8.5 | .0 | | | |
| 92007 | 11.4 | 19.7 | 8.1 | .0 | | | |
| 92008 | 23.0 | 22.0 | 4.4 | .0 | | | |
| 92009 | 23.8 | 21.7 | -0.4 | .0 | | | |
| 92010 | 21.5 | 21.4 | 1.4 | .0 | | | |
| 92011 | 14.0 | 19.5 | 1.0 | .0 | | | |
| 92012 | 21.4 | 21.1 | 2.4 | .0 | | | |
| 92013 | 24.7 | 21.7 | 5.5 | .0 | | | |
| 92014 | 22.8 | 20.8 | 4.8 | .0 | | | |
| 92015 | 18.4 | 20.6 | 2.2 | 2.0 | | | |
| 92016 | 25.6 | 21.2 | .0 | .0 | | | |
| 92017 | 21.3 | 20.9 | -1.5 | .0 | | | |
| 92018 | 24.2 | 20.5 | 3.8 | .0 | | | |
| 92019 | 22.7 | 21.5 | 2.1 | .0 | | | |
| 92020 | 20.6 | 20.1 | 1.3 | .0 | | | |
| 92021 | 18.0 | 20.3 | .6 | .0 | | | |
| 92022 | 23.1 | | 1.0 | .0 | | | |
| 92023 | 23.7 | 21.7 | 2.3 | .0 | | | |
| 92024 | 17.9 | 19.8 | 8.4 | 14.3 | | | |

En la parte superior del archivo, aunque el encabezado no es obligatorio, se escribe el nombre de la estación, la ciudad y país de ubicación, luego la latitud, longitud y altitud, así como la temperatura promedio y la altura de referencia a la que se toman los datos de temperaturas. Si no se cuenta con toda la información se puede dejar el espacio vacío

o llenarlo con -99.9. El archivo puede tener datos climáticos faltantes, pero si esos vacíos de información coinciden con periodos que van a ser simulados, en el momento de ejecutar la simulación aparecerá un aviso de error y la simulación no será ejecutada. Es necesario tener mucho cuidado con la estructura del archivo, para que los datos sean leídos de manera correcta. Para corroborarlo, después de correr las simulaciones en la carpeta *potato*, dentro de DSSAT podrán visualizarse los datos utilizados por el modelo en los archivos de salida *ET.OUT* y *SoilWat.OUT*

2.9.2 Variables del Suelo

El modelo simula los diferentes procesos fisiológicos teniendo en cuenta propiedades físicas y químicas del suelo. El balance hídrico del suelo, realizado por DSSAT se basa en el modelo de Ritchie (1998), donde los conceptos de capacidad de campo CC y punto de marchitez permanente PMP se utilizan como base para determinar el agua disponible en cada capa de suelo. Las pérdidas por escorrentía son función del tipo de suelo, la humedad del suelo y la precipitación. La infiltración es calculada como la precipitación menos la escorrentía y el drenaje ocurre cuando la humedad del suelo es mayor que la capacidad de retención de agua en la capa más profunda (Iglesias, 2006). La evaporación potencial es calcula por la relación de Priestley-Taylor, donde la evaporación total es función de la evaporación potencial, el índice de área foliar IAF y el tiempo tal como lo describe Ritchie (1998), mientras que la transpiración se ve modificada por el IAF, la evaporación del suelo y el déficit de agua en el suelo. La humedad del suelo se calcula diariamente como la precipitación menos la evaporación menos el escurrimiento y el drenaje.

El perfil de suelo debe contener coeficientes relacionados con el drenaje, la escorrentía, la evaporación, la reflexión de la radiación solar y un factor de crecimiento radical, que fueron definidos de acuerdo con las condiciones locales descritas por el IGAC (2000) y la metodología recomendada por Iglesias (2006), tal como se describe a continuación.

- Albedo SALB

Esta variable depende del color de la capa superficial (Tabla 2-3). Si este color no es conocido, DSSAT usara el valor por default 0,13.

Tabla 2-3: Albedo del suelo

| Color | SALB |
|----------|------|
| Café | 0,13 |
| Rojo | 0,14 |
| Negro | 0,09 |
| Gris | 0,13 |
| Amarillo | 0,17 |

Fuente: iglesias 2006

- Límite de Evaporación SLU1

El límite de evaporación de agua del suelo generalmente oscila entre 5 y 12 mm/día, variando de acuerdo con la textura de la capa superficial (Tabla 2-4).

Tabla 2-4: Límite de evaporación.

| Textura | SLU1 (mm/día) |
|--|---------------|
| Textura gruesa (arenoso) | 5 - 8 |
| Textura Media | 8 - 11 |
| Suelos medios a pesados (arcillas > 30%) | 10 -12 |

Fuente: iglesias 2006

- Tasa de drenaje SLDR

Los valores cercanos a cero se usan para suelos con muy pobre drenaje, mientras los valores cercanos a 1, se ajustan para los suelos con drenaje excesivo (Tabla 2-5).

Tabla 2-5: Drenaje.

| Drenaje | SLDR |
|---------------|------|
| Excesivo | 0,8 |
| Algo excesivo | 0,8 |
| Bueno | 0,6 |
| Moderado | 0,4 |
| algo pobre | 0,2 |
| Pobre | 0,05 |

Fuente: iglesias 2006

- Curva de escorrentía SLRO

Este coeficiente toma valores entre 60 y 100. Su valor varía en función de la inclinación del terreno, la textura, la profundidad y permeabilidad del suelo (Tabla 2-6).

Tabla 2-6: Coeficiente de escorrentía

| Grupo de suelo | Pendiente <5% | Pendiente entre 5% y 10% | Pendiente >10% |
|----------------|---------------|--------------------------|----------------|
| A | 64 | 68 | 71 |
| B | 76 | 80 | 83 |
| C | 84 | 88 | 91 |
| D | 87 | 91 | 94 |

Fuente: Iglesias 2006

Grupo A: potencial de escorrentía muy bajo, suelos profundos, muy bajo contenido de arcillas y limos, altamente permeables.

Grupo B: potencial de escorrentía moderadamente bajo, la mayoría de suelos arenosos, menos profundos que los del grupo A.

Grupo C: potencial de escorrentía moderadamente alto, suelos superficiales con considerables contenidos de arcillas y coloides, pero menos que los grupo D.

Grupo D: potencial de escorrentía alto, incluye suelos arcillosos, con sub-horizontes impermeables cerca de superficie.

- Factor de crecimiento de Raíces SRGF

Este factor es utilizado para estimar el crecimiento relativo de las raíces en cada una de las capas del suelo. En suelos bien drenados y sin barreras físicas o químicas para el crecimiento de las raíces este factor puede ser calculado en función de la profundidad de cada capa de suelo (ver Ecuación 2-2).

$$SRGF = EXP(-4 * Z / 200) \quad (2-2)$$

El valor de Z indica la profundidad hasta la mitad de cada capa de suelo en centímetros. En la capa superficial, el valor del factor es 1 y luego el SRGF debe reducirse si se considera la existencia de barreras para el crecimiento de raíces. Para las simulaciones también es necesario introducir la profundidad desde la superficie hasta el límite inferior

de cada capa del suelo, así como los diferentes niveles de humedad como el PMP, la CC y el punto de saturación del suelo, la densidad aparente, contenido de carbono, nitrógeno y fósforo, nivel de acidez del suelo y relación de limos, arcillas y arenas para cada capa. Los niveles de humedad para cada capa deben incluirse en unidades de volumen de agua por volumen de suelo, para lo que se utilizó la densidad aparente y la relación entre humedad gravimétrica y volumétrica descritas en la sección 1.4.5 (Ecuaciones 1-3 a 1-5).

- Porcentaje de nitrógeno total SLNI

El contenido de nitrógeno, se calculó, partiendo del porcentaje de carbono orgánico SLOC, tomado de los estudios del IGAC (2000) y la siguiente relación (Ecuación 2-3).

$$SLNI = SLOC * 1.724 / 20 \quad (2-3)$$

Para realizar las simulaciones fueron construidos tres perfiles de suelo, representativos de la ubicación de las estaciones climáticas. Parte de la información para la construcción de los perfiles se tomó del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca, realizado por el IGAC (2000), donde los suelos de los municipios de Tenjo, Mosquera y cercanos al aeropuerto El Dorado corresponden a las unidades cartográficas simbolizadas como RLQA, RMQA y RLOA respectivamente (descritas anteriormente en la sección 1.4.6). La información que no fue encontrada en este estudio fue tomada de trabajos anteriores como el de Olarte *et al.*, (2000), Forero (2000), e Iglesias (2006) entre otros. Para la validación del modelo se utilizaron los datos de los análisis de suelos realizados por Terán *et al.*, (2006).

La carpeta *soil* dentro de DSSAT contiene los archivos de suelo para las simulaciones, y es allí donde se introduce la información de suelos para los experimentos. Los perfiles para este trabajo se construyeron reescribiendo el archivo *PU.SOL* (ver Figura 2-4).

Figura 2-4: Ejemplo de archivo con los perfiles de suelo en DSSAT.

```
*PULU010002 SOILSPAU SL 150 50 ANDISOL, Pachic Melanudands, Fatehpur Series
@SITE COUNTRY LAT LONG SCS FAMILY
Tenjo Colombia 4.47 -74.12 Pendiente
@ SCOM SALB SLUI SLDR SLRO SLNF SLPF SMHB SMPX SMKE
BK 0.09 10 0.60 80 1.00 1.00 SA011 SA003 SA015
@ SLB SLMH SLLL SDUL SSAT SRGF SSKS SBDM SLOC SLCL SLSI SLCF SLNI SLHW SLHB SCEC
60 Ap 0.27 0.66 0.72 1.00 -99 0.59 11.6 32.5 61.2 -99 1.00 5.8 -99 56.5
110 Bw 0.42 0.63 0.79 0.19 -99 0.91 2.0 34.8 32.6 -99 0.17 5.4 -99 31.3
150 2AB 0.52 0.74 0.80 0.08 -99 0.78 6.1 46.7 49.8 -99 0.53 5.4 -99 57.4

*PULU000002 SOILSPAU SL 110 INCEPTISOL, Typic Endoaquepts IGAC 2008
@SITE COUNTRY LAT LONG SCS FAMILY
El Dorado Colombia 4.42 -74.09 Typic Endoaquepts
@ SCOM SALB SLUI SLDR SLRO SLNF SLPF SMHB SMPX SMKE
BK 0.12 11.0 0.20 80 1.00 1.00 SA011 SA003 SA015
@ SLB SLMH SLLL SDUL SSAT SRGF SSKS SBDM SLOC SLCL SLSI SLCF SLNI SLHW SLHB SCEC
25 Ap 0.350 0.480 0.700 1.00 -99 1.36 10.53 37.3 41.9 -99 0.91 5.0 -99 18.6
50 Bw 0.170 0.390 0.590 0.48 -99 1.64 7.37 22.4 47.0 -99 0.64 4.6 -99 11.0
110 C 0.210 0.420 0.580 0.20 -99 1.76 0.16 21.8 56.0 -99 0.01 4.4 -99 9.4

*PULU010011 SOILSPAU SL 143 50 ANDISOL, Pachic Haplustands, Fatehpur Series
@SITE COUNTRY LAT LONG SCS FAMILY
Mosquera Colombia 4.41 -74.12 Pachic Haplustands
@ SCOM SALB SLUI SLDR SLRO SLNF SLPF SMHB SMPX SMKE
BK 0.12 11.0 0.40 80 1.00 1.00 SA011 SA003 SA015
@ SLB SLMH SLLL SDUL SSAT SRGF SSKS SBDM SLOC SLCL SLSI SLCF SLNI SLHW SLHB SCEC
36 Ap 0.280 0.560 0.800 1.000 -99 0.72 10.01 30 32.0 -99 0.86 5.6 -99 53.4
78 A2 0.300 0.490 0.700 0.326 -99 0.68 7.99 22 24.0 -99 0.69 6.0 -99 25.8
92 AB 0.510 0.670 0.890 0.182 -99 0.64 4.73 8 16.0 -99 0.41 6.3 -99 44.3
118 Bw1 0.480 0.680 0.890 0.122 -99 0.74 1.64 8 16.0 -99 0.14 6.2 -99 32.7
143 Bw2 0.470 0.660 0.880 0.074 -99 0.60 1.51 36 20.0 -99 0.13 6.2 -99 32.9

SCOM:codigo de color del suelo; SALB:albedo; SLUI:evaporacion limite; SLDR:velocidad del movimiento del
agua; SLRO:potencial de escorrentia; SLNF:factor de mineralizacion; SLPF:factor de fotosintesis; SMHB:
metodo de determinacion de pH; SMPX:metodo de determinacion de fosforo; SMKE:metodo de determinacion de
potasio; SLB:profundidad de la base de cada capa; SLMH:horizontes; SLLL:limite hidrico minimo;SDUL:limi
te superior de drenaje; SSAT:limite superior de saturacion; SRGF:factor de crecimiento radicular; SSKS:
desconocido; SBDM:densidad aparente; SLOC:porcentaje de carbono organico;SLCL:porcentaje de arcillas;
SLSI:porcentaje de limos; SLCF:porcentaje de particulas mayores a 2mm; SLNI:porcentaje de nitrogeno;
SLHW:ph en agua; SLHB: desconocido; SCEC:capacidad de intercambio catiónico
```

2.9.3 Variables de Genotipo

En DSSAT, dentro de la carpeta *Genotype* aparecen los archivos que contienen los coeficientes genéticos o fisiológicos que definen las diferentes variedades de cada uno de los 27 cultivos que pueden ser simulados. Para el caso de papa en los archivos *PTSUB040.CUL* y *PTSUB980.CUL* deben introducirse los valores de los coeficientes que definen la variedad que quiera simularse.

La Figura 2-5, muestra la apariencia del archivo, que en el caso de la papa debe llevar los valores de los cinco coeficientes (G2, G3, PD, P2 y TC) para cada cultivar, ya que el coeficiente G4 toma el mismo valor para todos los cultivares. Los valores de los coeficientes deben ir después de introducir el número de identificación del cultivar, con el que será identificado desde el archivo *.PTX* del experimento y el nombre de cada variedad. El archivo trae en la parte superior la definición de los códigos relacionados. Como se explicó en la sección 1.3.5, estos coeficientes genéticos son calculados a partir de experimentos cuidadosos y su deducción constituye la calibración del modelo para una variedad y un lugar determinado. Trabajos de calibración como los de Olarte *et al.*, (2000) y Forero (2000), permitieron obtener estimaciones de estos coeficientes para diferentes variedades de papa en la Sabana de Bogotá.

Figura 2-5: Ejemplo del archivo con coeficientes fisiológicos *PTSUB040.CUL*

```

*POTATO CULTIVAR COEFFICIENTS: PTSUB040 MODEL
! COEFF      DEFINITIONS
! =====
! VAR#       Identification code or number for a specific cultivar
! VAR-NAME   Name of cultivar
! ECO#       Ecotype code or this cultivar, points to the Ecotype in the
!            ECO file (currently not used).
! G2         Leaf area expansion rate in degree days
! G3         Potential tuber growth rate
! G4         Currently not used in the model
! PD         Index that supresses tuber growth during the period
!            that immediately follows tuber induction
! P2         Index that relates photoperiod response to tuber initiation
! TC        Upper critical temperature for tuber initiation

@VAR#  VAR-NAME..... ECO#  G2  G3  G4  PD  P2  TC
IB0001 MAJESTIC      IB0001 2000. 22.5 0.20 0.8 0.6 17.0
IB0002 SEBAGO        IB0001 2000. 22.5 0.20 0.7 0.8 15.0
IB0003 RUSSET BURBANK IB0001 2000. 22.5 0.20 0.6 0.6 17.0
IB0004 KATHADIN      IB0001 2000. 25.0 0.20 0.7 0.6 19.0
IB0005 ATLANTIC      IB0001 2000. 25.0 0.20 0.9 0.6 17.0
IB0006 MARIS PIPER   IB0001 2000. 25.0 0.20 0.8 0.4 17.0
IB0007 KING EDWARD   IB0001 2000. 22.5 0.20 1.0 0.6 17.0
IB0008 DESIREE       IB0001 2000. 25.0 0.20 0.9 0.6 17.0
IB0009 LT-1          IB0001 2000. 25.0 0.20 0.9 0.8 21.0
IB0010 C14-343       IB0001 2000. 25.0 0.20 0.9 0.4 21.0
IB0011 PASTUSA       IB0001 900.  6.3 0.20 0.7 0.3 25.0
IB0012 CAPIRO        IB0001 1236. 8.8 0.20 0.7 0.7 25.0
IB0013 TUQUERREÑA    IB0001 973.2 8.3 0.20 1.0 0.8 25.0
IB0014 CAPIRO        IB0001 1100. 8.8 0.20 0.7 0.4 20.0
IB0015 PASTUSA       IB0001 900.  6.3 0.20 0.6 0.3 25.0

```

2.9.4 Variables de Manejo Agrícola

Las variables de manejo agrícola necesarias para las simulaciones son la fecha y método de siembra, profundidad de la siembra, cantidad de plantas por hectárea al momento de siembra y emergencia, distancia entre surcos y entre plantas, así como densidad de semilla sembrada en kilogramos por hectárea. Se introduce también información referente al tipo, cantidad y frecuencia de riego si es realizado. En relación con la fertilización, si se realiza debe introducirse la fecha y cantidad de aplicación de fertilizante, así como la profundidad y el tipo de fertilizante usado. En relación con el cultivo anterior debe introducirse la cantidad de residuos, contenido de nitrógeno y fosforo de los residuos, así como la profundidad y fecha de su incorporación al suelo. En este trabajo, esta información se introdujo en función de las prácticas tradicionales de los cultivadores de la zona suministrada por FEDEPAPA (Porras, 2010).

2.9.5 Condiciones iniciales

El modelo necesita iniciar la simulación con alguna información respecto a las condiciones de humedad y contenido de nutrientes del suelo en el momento de la siembra. Esta información puede ser obtenida por mediciones a diferentes profundidades en el momento de la siembra o algunos días antes de ésta del contenido de agua, nitratos, amonio y fosforo disponible. Para este trabajo no se utilizó este módulo, ya que

estas condiciones pueden variar ampliamente y no se dispone de información unívoca al respecto.

2.9.6 Variables Medidas en el Cultivo

La información descrita anteriormente es suficiente para correr el modelo, aunque DSSAT puede simular con la ausencia de varios de estos datos, pero la exactitud del modelo dependerá de la validez y la cantidad de información inicial. Dicha exactitud puede ser evaluada comparando las salidas de las simulaciones con datos medidos directamente en el cultivo relacionados con la biomasa acumulada en las plantas, el desarrollo foliar, las condiciones parciales de humedad o nutrientes en el suelo (Bowen *et al.*, 2001). Estas estimaciones, si son tomadas pueden introducirse para realizar pruebas de validación y para calibrar el modelo.

2.9.7 Salidas del Modelo del DSSAT

Después de cada simulación el modelo genera los archivos con las salidas que pueden ser escogidas de acuerdo a los intereses de la investigación. Existe un amplio conjunto de posibilidades en cuanto a los archivos de salida que pueden mostrar datos diarios referentes al balance hídrico del cultivo, nivel de fotosíntesis, datos de las variables de desarrollo y crecimiento del cultivo entre ellas índice de área foliar IAF, peso fresco y seco de hojas, del follaje, de las raíces y los tubérculos. Los análisis de pestes y enfermedades que afectan el cultivo de papa no están disponibles en la versión 4.0. También se pueden obtener datos relacionados con el estado de humedad y contenido de nutrientes del suelo.

2.9.8 Experimentos en DSSAT

DSSAT contiene el módulo XBuild, que permite crear y editar experimentos de acuerdo con los objetivos de la investigación (Hoogenboom, 2003). Aunque la interfaz de XBuild es sencilla, constantemente los cambios ingresados en ella no son escritos en las líneas de código que usa DSSAT para las simulaciones, por lo que se recomienda modificar los datos de los experimentos directamente sobre las líneas de código del archivo con terminación *.PTX* que se encontrara en la carpeta de cada cultivo dentro de la carpeta

DSSAT que generalmente se crea en el disco C cuando se instala el software. Desde este archivo DSSAT ubica los demás archivos de suelo, clima y cultivar para los experimentos, así como es desde allí donde deben introducirse los demás parámetros que permiten el diseño del experimento que se quiera simular.

- **Treatments:** permite elegir las opciones de modelación a tener en cuenta en el escribiendo 1 o 0. Se puede elegir si van a ser usadas características de los cultivares, datos de los lotes de siembra, análisis de suelos, variar condiciones iniciales, irrigación, fertilización, aplicación de químicos labranza etc.
- **Cultivars:** ingresar el código y nombre de cultivar o cultivares a simular.
- **Fields:** en este lugar se ingresan el nombre de la estación climatológica y el código de archivos de clima y del perfil del suelo, así como algunas características del cultivo como drenaje si lo hay, inclinación, área del cultivo etc.
- **Soil analysis:** ingresar datos de análisis de suelos si los hay.
- **Initial conditions:** condiciones iniciales como fecha de inicio de simulaciones, así como información relacionada con el estado del terreno y residuos del cultivo anterior.
- **Planting details:** detalles de la siembra como fecha y cantidad de semillas, método y profundidad de siembra, distribución y orientación de los surcos.
- **Environment modifications:** ajuste sobre con las variables climáticas como aumentos o disminuciones de temperatura, lluvia, radiación, dióxido de carbono etc.
- **Harvest details:** detalles de fecha y forma de realización de la cosecha.
- **Simulation control:** aquí se ajustan los aspectos del cultivo que quieran ser analizados en los archivos de salida de las simulaciones. En la Figura 2-6, se ilustra la forma del archivo *.PTX* que contiene cada experimento.

Figura 2-5: Ejemplo de archivo de experimento TIBA9201.PTX

```

*EXP.DETAILS: TIBA9201PT TIBA0201PT TIBA9201 TIBAITATA, MOSQUERA 2002 WEATHER SIMULA
*GENERAL
@PEOPLE
ROJAS
@ADDRESS
UNIVERSIDAD NACIONAL
@SITE
BOGOTA COLOMBIA
@ PAREA PRNO PLEN PLDR PLSP PLAY HAREA HRNO HLEN HARM.....
  -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99

*TREATMENTS -----FACTOR LEVELS-----
@N R O C TNAME..... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
  1 1 0 0 Potato Model validation 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1

*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
  1 PT IB0013 TUQUERREÑA

*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA... FLSA FLOB FLDT FLDD FLDS FLST SLTX SLDP ID_SOIL FLNAME
  1 TIBA0001 TIBA0201 0 0 DR000 0 0 00000 -99 0 PULU010002 -99
@L .....XCRD .....YCRD .....ELEV .....AREA .SLEN .FLWR .SLAS
  1 0 0 0 0 0 0 0

*SOIL ANALYSIS
@A SADAT SMHB SMPX SMKE SANAME
  1 02005 -99 -99 -99 -99
@A SABL SADM SAOC SANI SAPHW SAPHB SAPX SAKE
  1 15 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99

*INITIAL CONDITIONS
@C PCR ICDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP ICRIP ICRID ICNAME
  1 PT 02041 1500 0 1 1 -99 2500 2.67 0 100 15 -99
@C ICBL SH20 SNH4 SNO3
  1 10 .22 3.4 9.8
  1 25 .22 3.2 7.3
  1 40 .22 2.5 5.1
  1 65 .22 2.2 4.7

*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE PPOP PPOE PLME PLDS PLRS PLRD PLDP PLWT PAGE PENV PLPH SPRL
  1 02051 02066 5.1 5.1 S R 86 0 15 1020 -99 -99 -99 8
  -99
    
```

3. Discusión y resultados

3.1 Caracterización climática de la Sabana de Bogotá

En la Tabla 3-1 aparecen algunos datos relacionados con los valores promedio de las variables climatológicas de la zona de estudio y un par de índices útiles para la clasificación climática calculados a partir de las series de tiempo mensuales proporcionadas por el IDEAM.

Tabla 3-1: Caracterización Climática de la Sabana de Bogotá

| Estación | Tibaitatà | G. Providencia | El Dorado |
|-------------------------------|-----------|----------------|-----------|
| Municipio | Mosquera | Tenjo | Bogotá |
| Latitud | 4°41' | 4°47' | 4° .42' |
| Longitud | -74° .12' | -74° .12' | -74° .09' |
| Altitud (m) | 2543 | 2560 | 2547 |
| Precipitación anual (mm) | 671,8 | 813,5 | 815,4 |
| Temperatura media (°C) | 13,3 | 13,7 | 13,7 |
| Temperatura máxima media (°C) | 19,5 | 19,4 | 19,3 |
| Temperatura mínima media (°C) | 6,9 | 6,8 | 7,9 |
| Brillo solar anual (horas) | 1640,4 | 1188,2 | 1589,3 |
| Factor de Lang | Fsa 52,1 | Fsa 59,4 | Fsh 60,6 |
| Índice de Martonne | 27,6 | 32,2 | 32,0 |

Las tres estaciones pertenecen al clima frío según la clasificación climática de Caldas, que solo se tienen en cuenta la altitud y la temperatura media. Según Caldas, este clima está limitado entre los 2000 y 3000 msnm para la altitud y entre los 12 y los 17,5°C para la temperatura media.

Según el cálculo del factor de Lang, definido como el cociente entre la precipitación anual y la temperatura media (IDEAM, 2001) y usando también la clasificación de Caldas, las estaciones G. Providencia y Tibaitatà pertenecen al clima frío semiárido (Fsa), mientras

que la estación de El Dorado pertenece a clima frío semihúmedo (Fsh) ya que en esta estación el valor del factor de Lang se encuentra por encima de 60,1.

Según la clasificación climática de Martonne, las tres estaciones pertenecen al clima húmedo. IDEAM (2001), realizó la clasificación según el factor de humedad de Thornthwaite, que relaciona la precipitación y la evapotranspiración potencial, determinando así la disponibilidad hídrica del suelo y clasificó la zona con un factor de humedad de entre -20 y 20 que categoriza estos suelos como suelo secos. Por lo tanto, los suelos de esta zona deben tener un manejo especial con el propósito de aumentar la retención de humedad para temporadas de bajas precipitaciones. Esto se puede lograr con técnicas de labranza que mejoren las condiciones físicas del suelo (densidad aparente, aumento del agua aprovechable, disminución del PMP y aumento de la CC), así como con el uso de sistemas de disminución del impacto del aumento de la temperatura, tales como cobertura vegetal, árboles y abonos verdes, entre otros (CORPOICA, 2008).

3.1.1 Precipitación

La precipitación sobre la Sabana de Bogotá es modulada por el doble paso de la ZCIT, que genera dos temporadas de lluvia y dos temporadas secas sobre la zona central del país (Figura 3-1). La PTS, conforma la época de verano sobre la Sabana de Bogotá con precipitaciones menores a los 50 mm por mes, siendo el mes de enero históricamente el mes más seco, con precipitaciones que en promedio no superan los 30 mm de lluvia, incluso con años en los no se registraron lluvias en algunas zonas.

Durante la segunda temporada seca STS, la lluvias no disminuyen tanto como durante la PTS, ésta es más bien una temporada de transición entre los dos periodos húmedos (Environmental Ingenieros consultores, 1999).

Como se observa en la Tabla 3-2, hacia el mes de abril, durante la primera temporada lluviosa PTL se presenta un máximo de precipitación, con un nivel de lluvias mensual de aproximadamente 100 mm, aunque en algunos años muy lluviosos este valor ha sobrepasado los 200 mm mensuales en el mes de marzo en la estación El Dorado.

Figura 3-1: Precipitación media mensual para las estaciones de la Sabana de Bogotá

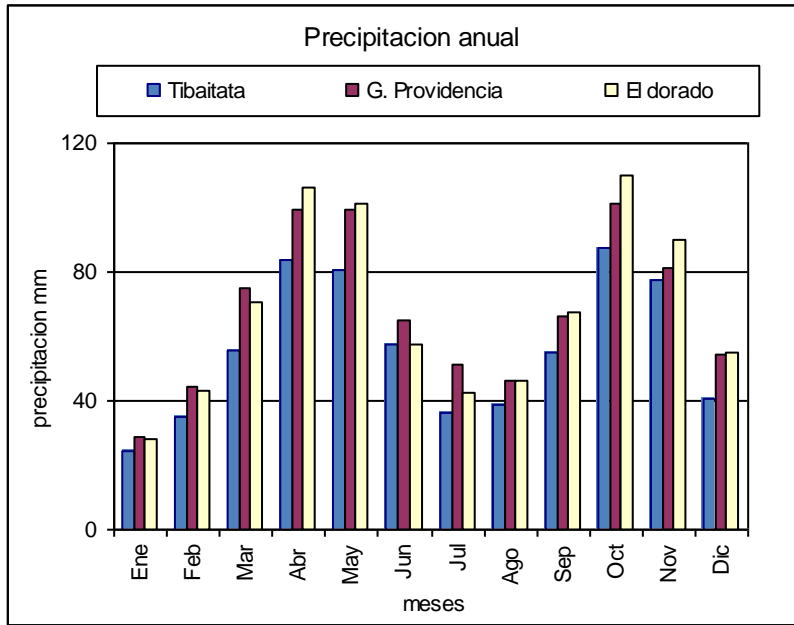


Tabla 3-2: Promedio mensual de precipitación, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana de Bogotá.

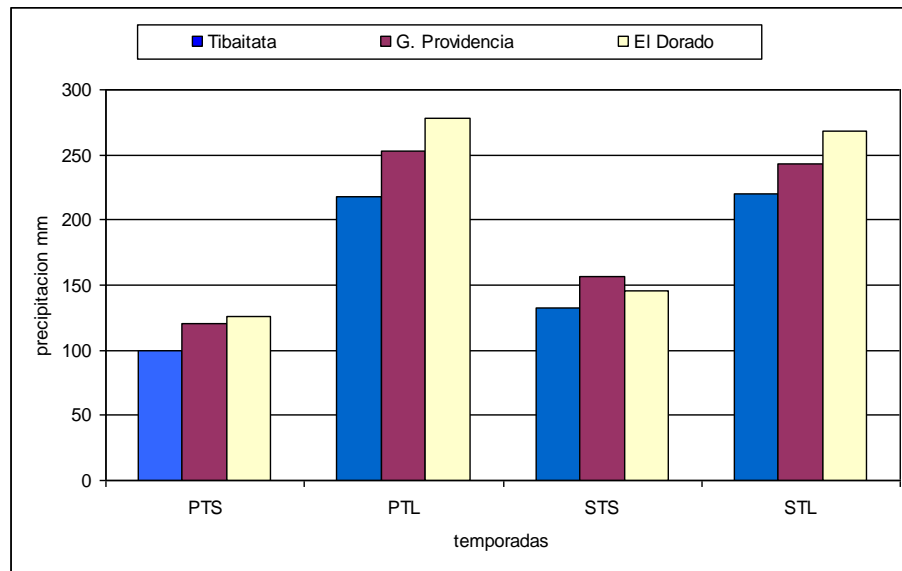
| Tibaitatá | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|
| Promedio (mm) | 22,3 | 35,9 | 57,2 | 92,8 | 83,5 | 58,7 | 40,9 | 38,1 | 49,6 | 85,9 | 79,3 | 46,1 |
| S | 21,7 | 25,5 | 27,9 | 40,8 | 38,7 | 25,5 | 18,9 | 18,8 | 29,2 | 35,3 | 38,8 | 30,0 |
| C.V | 97,6 | 70,9 | 48,7 | 44,0 | 46,4 | 43,5 | 46,3 | 49,4 | 58,9 | 41,0 | 49,0 | 65,0 |
| G. Providencia | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (mm) | 28,6 | 44,4 | 74,4 | 100,1 | 98,5 | 67,3 | 55,1 | 46,3 | 66,0 | 99,9 | 83,3 | 52,9 |
| S | 18,6 | 26,3 | 34,0 | 40,6 | 39,8 | 36,5 | 33,3 | 29,2 | 38,0 | 53,6 | 44,2 | 34,5 |
| C.V | 64,8 | 59,3 | 45,7 | 40,5 | 40,4 | 54,2 | 60,4 | 63,1 | 57,6 | 53,7 | 53,1 | 65,2 |
| El Dorado | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (mm) | 28,7 | 44,2 | 71,3 | 107,0 | 100,7 | 59,0 | 44,9 | 45,9 | 66,4 | 110,9 | 93,1 | 57,1 |
| S | 25,8 | 31,3 | 43,9 | 53,1 | 46,5 | 29,1 | 24,1 | 24,0 | 37,0 | 48,8 | 42,8 | 35,4 |
| C.V | 90,1 | 70,8 | 61,5 | 49,6 | 46,2 | 49,4 | 53,7 | 52,3 | 55,7 | 44,0 | 46,0 | 61,9 |

Los volúmenes de lluvia se ven disminuidos hasta llegar a valores entre los 40 y 50mm en el mes de julio, con disminuciones más drásticas en la estación de Tibaitatá, donde en promedio se registrala menor cantidad de precipitaciónde las tres estaciones de la Sabana. Durante la segunda temporada de lluvia STL, que se extiende aproximadamente desde septiembre hasta noviembre, la precipitación vuelve a aumentar considerablemente, siendo octubre el mes más lluvioso del año con 110 mm de

precipitación en promedio. Los valores mensuales de precipitación más altos se han registrado en el municipio de Tenjo, superando los 230 mm, aunque en promedio la estación que registra el más alto acumulado anual de pluviosidad es la estación El Dorado con 818,3 mm, mientras en la estación G. Providencia el promedio es de 813 mm. En la estación de Tibaitatà, la precipitación es casi un 20% menor que en las otras dos estaciones. Esta diferencia de precipitación puede ser explicada entre otras causas por condiciones locales como la orografía que puede generar una mayor precipitación en el municipio de Tenjo en El Dorado por el efecto calórico y los núcleos de condensación adicionales efecto de la polución en la ciudad de Bogotá.

Se observa que la señal de la variabilidad climática intra-anual es muy homogénea para las tres estaciones, mostrando gran similitud en los valores promedio de precipitación para las dos temporadas de lluvia, mientras que la PTS es en promedio más seca que la STS. En la Figura 3-2, puede verse con claridad la similitud entre las dos temporadas de lluvia.

Figura 3-2: Precipitación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá.



Al analizar las series de precipitación por temporadas agroclimáticas construidas con la suma de valores mensuales de los tres meses que conforman cada temporada, no solo se disminuye el número de series y el volumen de datos a analizar, sino que se reduce

también la variabilidad de los datos de las series de tiempo, tal como se puede observar al comparar las Tablas 3-2 y 3-3. De esta forma se simplifican los análisis climáticos.

Tabla 3-3: Acumulado de precipitación, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá.

| Tibaitatá | PTS | PTL | STS | STL |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Promedio (mm) | 99,5 | 220,4 | 135,2 | 221,1 |
| S | 48,0 | 77,3 | 39,2 | 62,7 |
| C.V | 48,3 | 35,1 | 29,0 | 28,3 |
| G. Providencia | | | | |
| Promedio (mm) | 119,5 | 273,1 | 168,7 | 249,2 |
| S | 57,6 | 66,0 | 70,1 | 82,6 |
| C.V | 48,2 | 24,2 | 41,5 | 33,1 |
| El Dorado | | | | |
| Promedio (mm) | 125,7 | 279,0 | 149,8 | 270,4 |
| S | 66,1 | 95,9 | 52,0 | 81,9 |
| C.V | 52,6 | 34,4 | 34,7 | 30,3 |

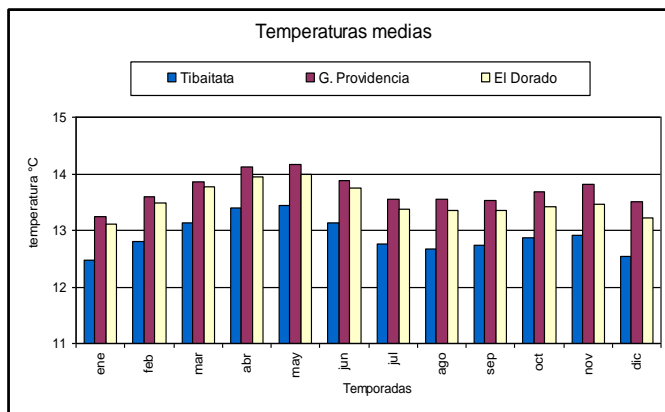
3.1.2 Temperatura

- Temperatura media

La temperatura media de la zona es cercana a los 13,5°C, con variaciones relativamente bajas, tanto espacial como temporalmente dado que es una zona geográficamente homogénea. La diferencia de los valores de temperatura media entre las tres estaciones es menor a 1°C durante todo el año. Como se observa en la Figura 3-3, los promedios más altos de temperatura media se presentan en la estación G. Providencia, mientras los más bajos fueron registrados en la estación de Tibaitatá, con una diferencia menor a 1°C.

El comportamiento de la temperatura media a lo largo del año es muy similar en las tres estaciones y al parecer es modulado por el comportamiento de la precipitación y la nubosidad, que aumenta hacia las temporadas de lluvia y disminuyendo en las temporadas secas. Los valores más altos de la temperatura media alrededor de los 14°C se registran en la estación de G. Providencia hacia la PTL, mientras que los más bajos se observan en la estación de Tibaitatá hacia la PTS.

Figura 3-3: Temperatura media promedio mensual multianual para las estaciones de la Sabana de Bogotá.



Los valores altos de la temperatura media durante las temporadas de lluvia coinciden con los valores altos de las temperaturas mínimas, ya que en estas temporadas el exceso de nubosidad no permite un exagerado enfriamiento nocturno, que trae como consecuencia temperaturas mínimas más altas que en el resto del año y un aumento de la temperatura media.

Tabla 3-4: Promedio mensual de temperatura media, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana

| Tibaitatá | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 12,5 | 12,9 | 13,2 | 13,5 | 13,5 | 13,2 | 12,8 | 12,7 | 12,8 | 12,9 | 13,0 | 12,6 |
| S | 1,0 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,9 |
| C.V | 8,4 | 10,0 | 6,2 | 6,1 | 5,5 | 5,4 | 6,1 | 6,1 | 5,6 | 5,7 | 4,9 | 7,2 |
| G. Providencia | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 13,2 | 13,6 | 13,9 | 14,1 | 14,2 | 13,9 | 13,6 | 13,6 | 13,5 | 13,6 | 13,8 | 13,5 |
| S | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,6 |
| C.V | 5,1 | 5,9 | 4,1 | 3,8 | 3,9 | 3,4 | 3,9 | 3,9 | 2,9 | 4,1 | 2,8 | 4,3 |
| El Dorado | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 13,1 | 13,5 | 13,8 | 14,0 | 14,0 | 13,8 | 13,4 | 13,3 | 13,4 | 13,4 | 13,5 | 13,2 |
| S | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| C.V | 5,1 | 5,3 | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,9 | 3,7 | 3,7 | 3,2 | 3,4 | 2,7 | 4,6 |

Durante las temporadas secas, las temperaturas medias tienden a disminuir, así las temperaturas máximas sean en promedio más altas, ya que la ausencia de nubes

permite un intenso enfriamiento del aire en las horas de la noche, con descensos de temperatura muy importantes en horas de la madrugada, cuando se hacen frecuentes los fenómenos de heladas, contribuyendo a que en estos meses los valores de temperatura media sean más bajos que durante la temporadas de lluvia.

En el caso de la temperatura media, con las series por temporadas agroclimáticas no solo se reduce el coeficiente de variación sino también la desviación estándar, mostrando claramente que este tratamiento disminuye la dispersión respecto de los datos mensuales.

Tabla 3-5: Promedio de temperatura media, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana

| Tibaitatà | PTS | PTL | STS | STL |
|-----------------------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 12,8 | 13,4 | 12,9 | 12,9 |
| S | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 |
| C.V | 6,0 | 5,7 | 5,6 | 5,1 |
| G. Providencia | | | | |
| Promedio (°C) | 13,4 | 14,0 | 13,7 | 13,6 |
| S | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| C.V | 5,1 | 3,8 | 3,3 | 2,9 |
| El Dorado | | | | |
| Promedio (°C) | 13,3 | 13,9 | 13,5 | 13,4 |
| S | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| C.V | 4,6 | 3,6 | 3,4 | 2,7 |

En la estación de Tibaitatà la dispersión de los datos de temperatura media es mayor, ya que la desviación y el coeficiente de variación tienen valores mayores a las otras dos estaciones (ver Tablas 3-4 y 3-5), aun cuando los valores medios de esta variable son ligeramente menores, lo que indica que en esta estación se registra una mayor variabilidad entre meses más y menos cálidos.

Aunque el comportamiento de la temperatura mínima a lo largo del año es similar en las tres estaciones, en El Dorado toma valores significativamente mayores a los registrados en las otras dos estaciones que no muestran diferencias significativas entre sí.

- Temperatura mínima

Figura 3-4: Temperatura mínima promedio mensual multianual para la Sabana de Bogotá.

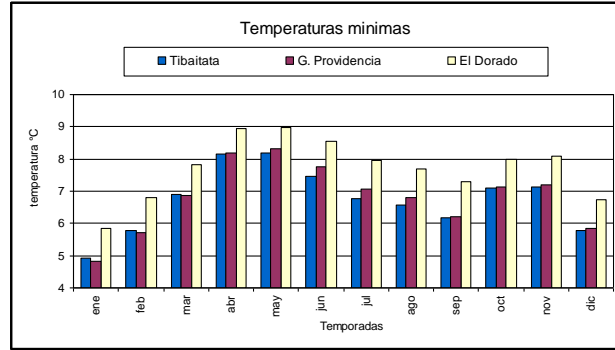


Tabla 3-6: Promedio mensual de temperatura mínima, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana

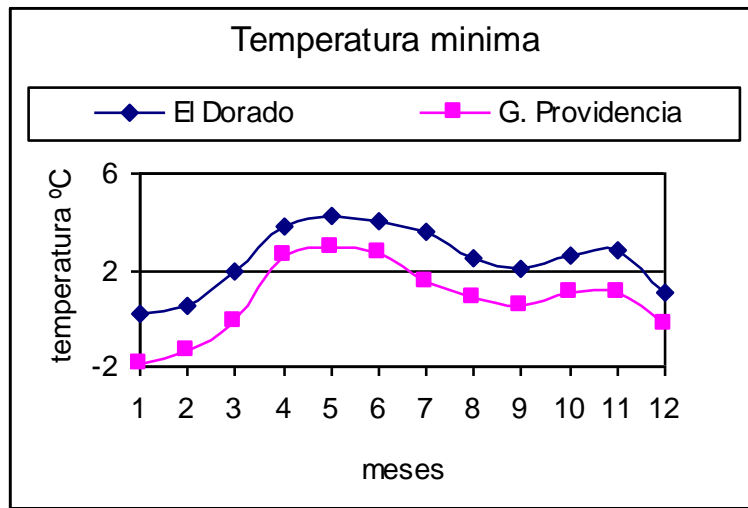
| Tibaitatá | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 4,9 | 5,7 | 6,9 | 8,1 | 8,2 | 7,5 | 6,8 | 6,6 | 6,2 | 7,1 | 7,1 | 5,8 |
| S | 1,1 | 1,4 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 1,1 |
| C.V | 22,3 | 25,2 | 12,1 | 10,7 | 10,7 | 10,3 | 13,2 | 11,0 | 11,7 | 12,7 | 12,3 | 18,6 |
| G. Providencia | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 4,8 | 5,7 | 6,9 | 8,2 | 8,3 | 7,7 | 7,1 | 6,8 | 6,2 | 7,1 | 7,2 | 5,9 |
| S | 1,7 | 1,6 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 1,1 | 0,8 | 1,2 |
| C.V | 35,3 | 28,8 | 16,5 | 11,5 | 10,7 | 10,0 | 13,4 | 12,6 | 13,0 | 14,7 | 11,8 | 20,3 |
| El Dorado | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 5,8 | 6,8 | 7,8 | 8,9 | 9,0 | 8,5 | 8,0 | 7,7 | 7,3 | 8,0 | 8,1 | 6,7 |
| S | 1,3 | 1,6 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 1,3 |
| C.V | 22,9 | 23,5 | 12,5 | 10,3 | 8,9 | 6,9 | 9,1 | 9,8 | 9,6 | 9,2 | 10,7 | 19,0 |

Como puede observarse en la Figura 3-4, la diferencia entre estaciones es aproximadamente de 1°C, haciéndose un poco mayor durante las temporadas secas. Esta diferencia en la temperatura de las noches corrobora que en la estación de El Dorado la probabilidad de ocurrencia de heladas es menor. Según IDEAM (2008), el número de eventos de heladas que ocurrieron durante periodo 1985-2008 estuvo por encima de los 260 en estación de G. Providencia, mientras que en Tibaitatá se registraron alrededor de 100 eventos y en El Dorado se registraron menos de 80 eventos. Los indicadores de variabilidad de los datos son mayores en la estación G. Providencia (Tabla 3-6), donde fueron registrados los valores más bajos de temperatura de la zona. Durante el mes de febrero del año 2007, en esta estación, la temperatura descendió

hasta $-8,8^{\circ}\text{C}$, mientras que los más bajos registros de temperatura mínima en las estaciones Tibaitatà y El Dorado fueron de $-6,4$ y $-5,4$ en los años 1977 y 1995, respectivamente.

Para las tres estaciones, los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de heladas son los de la PTS (diciembre, enero y febrero), aunque para la estación G. Providencia también hay probabilidad importante de ocurrencia de heladas en otros meses, durante la STS y STL. Vale la pena mencionar que un evento de helada puede cubrir espacialmente toda la zona de estudio, como por ejemplo el caso ocurrido durante la primer década de febrero de 2007, cuando los valores de temperaturas de las noches alcanzaron valores por debajo de los 0°C varios días seguidos en las tres estaciones de la zona de estudio.

Figura 3-5: Promedio multianual de las temperaturas mínimas absolutas mensuales, registradas en las estaciones El Dorado y G. Providencia.



En la Figura 3-5, se observa la marcada diferencia entre las temperaturas mínimas de las estaciones El Dorado y G. Providencia, aun cuando no existe diferencia importante en altitud y las estaciones están separadas menos de 15 kilómetros en línea recta. Esta diferencia de temperaturas de las noches registrada en la estación de El Dorado puede estar asociada al efecto de isla de calor urbana, generado por la acumulación extra de calor en los materiales propios de la urbanización de la ciudad, además de la contaminación y el consumo energético (Wang *et al.*, 1990).

Vale la pena mencionar también que la temperatura mínima promedio tiene mayor variación a lo largo del año que la temperatura media, ya que los valores mínimos registrados hacia la PTS están alrededor de los 5°C, mientras los más altos durante la PTL alcanzan los 9°C, presentando una importante variación en pocos meses. En la Figura 3-6, construida con los promedios para cada temporada agroclimática, se puede ver como durante la PTL la temperatura mínima es en promedio mayor que el resto del año, recordando que en esta temporada se mantiene cierta probabilidad de ocurrencia de heladas principalmente durante el mes de marzo (IDEAM, 2008).

Figura 3-6: Temperatura mínima promedio por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá.

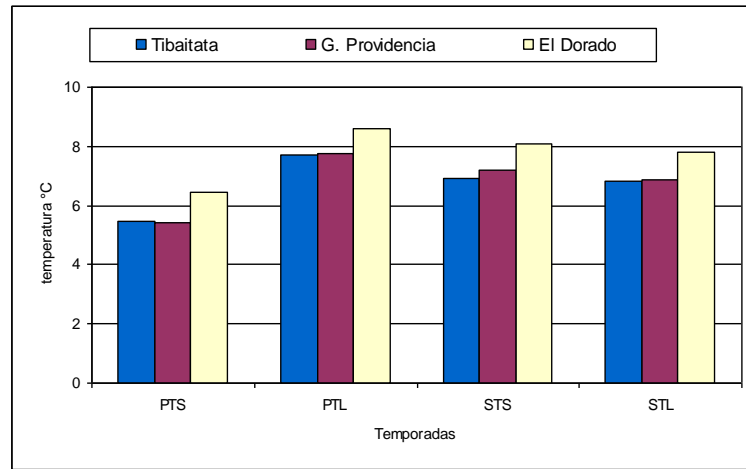


Tabla 3-7: Promedio de temperatura mínima, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana

| Tibaitatá | PTS | PTL | STS | STL |
|----------------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 5,5 | 7,7 | 6,9 | 6,8 |
| S | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,6 |
| C.V | 16,7 | 8,9 | 9,0 | 9,0 |
| G. Providencia | | | | |
| Promedio (°C) | 5,4 | 7,8 | 7,2 | 6,8 |
| S | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 0,7 |
| C.V | 19,8 | 10,0 | 10,4 | 10,1 |
| El Dorado | | | | |
| Promedio (°C) | 6,5 | 8,6 | 8,1 | 7,8 |
| S | 1,1 | 0,7 | 0,6 | 0,6 |
| C.V | 17,2 | 8,7 | 6,9 | 7,8 |

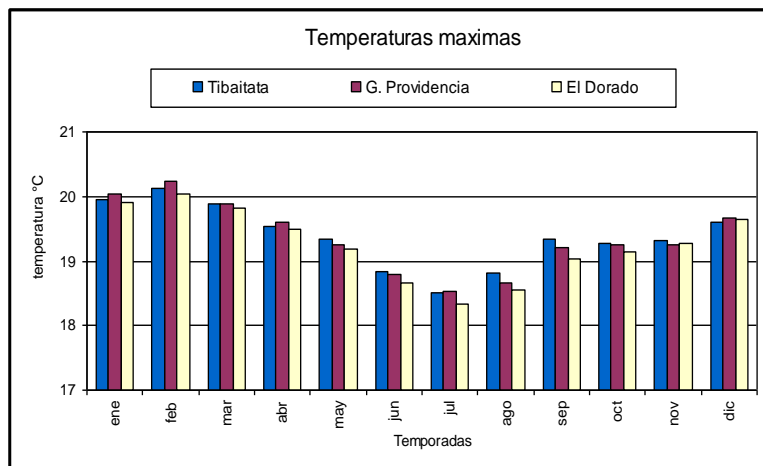
Al analizar las series de temperatura mínima por temporadas (Tabla 3-7), se observa una mayor disminución en los coeficientes de variación de las series y en las desviaciones de los promedios que en las temperaturas medias.

▪ Temperatura Maxima

El comportamiento anual de las temperaturas máximas no coincide con el comportamiento de las temperaturas medias o mínimas. En la Figura 3-7 se observa que los valores más altos de temperatura máxima se presentan al final de la PTS, hacia el mes de febrero, mientras los valores más bajos en la STS durante el mes de julio. Esto implica que los valores más altos de temperaturas máxima, no ocurren necesariamente durante las temporadas secas, pues aunque durante la PTS se observan los valores máximos, constituyendo la temporada de verano en la Sabana de Bogotá, durante la STS, se observan los promedios más bajos, incluso claramente por debajo de los valores de temperatura máxima durante las dos temporadas de lluvia.

No se observan diferencias importantes para lastemperaturas máximas entre las dos temporadas de lluvia, tomando valores alrededor de los 19,4°C para ambas temporadas, mientras que durante la PTS la temperatura esta másde 1°C por encima en promedio, respecto a la STS (Figuras 3-7 y 3-8).

Figura 3-7: Temperatura máximapromedio mensual multianual para las estaciones de la Sabana de Bogotá.



A diferencia de las temperaturas medias o mínimas, se observan diferencias muy pequeñas de las temperaturas máximas entre las tres estaciones, siendo ligeramente mayor para la estación G. Providencia durante la PTS y hasta al mes de abril y luego desde el mes de mayo y hasta noviembre los promedios más altos de temperatura máxima se observan en la estación de Tibaitatá. Todos los meses del año las temperaturas máximas son menores en la zona del aeropuerto El Dorado, donde las temperaturas mínimas son siempre en promedio más altas.

Tabla 3-8: Promedio mensual de temperaturas máximas, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana

| Tibaitatá | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 19,9 | 20,1 | 19,9 | 19,5 | 19,3 | 18,8 | 18,5 | 18,8 | 19,3 | 19,3 | 19,3 | 19,6 |
| S | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 |
| C.V | 3,6 | 5,0 | 3,9 | 2,8 | 2,5 | 2,7 | 3,7 | 3,0 | 3,2 | 3,2 | 2,5 | 3,1 |
| G. Providencia | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 20,0 | 20,2 | 19,9 | 19,6 | 19,2 | 18,8 | 18,5 | 18,7 | 19,2 | 19,3 | 19,2 | 19,7 |
| S | 1,0 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,8 |
| C.V | 4,8 | 5,9 | 4,5 | 3,2 | 3,2 | 2,7 | 3,9 | 3,3 | 4,1 | 4,2 | 3,2 | 4,1 |
| El Dorado | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (°C) | 19,9 | 20,0 | 19,8 | 19,5 | 19,2 | 18,7 | 18,3 | 18,5 | 19,0 | 19,1 | 19,3 | 19,6 |
| S | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 |
| C.V | 4,0 | 5,0 | 4,1 | 3,0 | 2,9 | 3,3 | 2,7 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 3,0 | 3,6 |

En la tabla 3-8, puede observarse como la dispersión de los datos de temperaturas máximas es menor que la dispersión de los datos de temperaturas medias y mínimas, e igual que en el caso de las temperaturas mínimas en la estación G. Providencia se observan los mayores valores de dispersión.

La variación o amplitud diaria de la temperatura del aire es bastante marcada, sobrepasando en muchos casos los 25°C principalmente durante las temporadas secas. La radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra puede aumentar la temperatura del aire hasta valores cercanos a los 25°C en las tardes soleadas y luego en las noches, la ausencia de nubosidad permite el enfriamiento radiactivo del aire en superficie hasta alcanzar temperaturas incluso por debajo de los -5°C en las madrugadas de estas temporadas secas. Durante los periodos de lluvia esta amplitud térmica diaria es mucho menos marcada.

Figura 3-8: Temperatura máxima por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá.

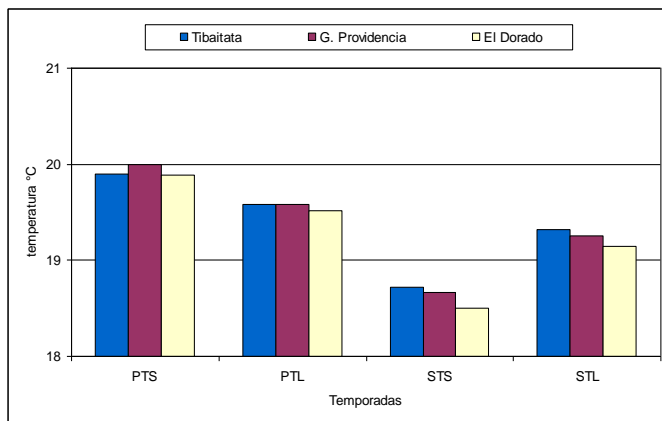


Tabla 3-9: Promedio de las temperaturas máximas, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana.

| Tibaitatá | PTS | PTL | STS | STL |
|----------------|------|------|------|------|
| Promedio (°C) | 19,9 | 19,6 | 18,7 | 19,3 |
| S | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| C.V | 3,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| G. Providencia | | | | |
| Promedio (°C) | 20,0 | 19,6 | 18,7 | 19,3 |
| S | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,7 |
| C.V | 4,5 | 3,3 | 3,0 | 3,6 |
| El Dorado | | | | |
| Promedio (°C) | 19,9 | 19,5 | 18,5 | 19,1 |
| S | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,6 |
| C.V | 3,7 | 3,0 | 2,5 | 2,9 |

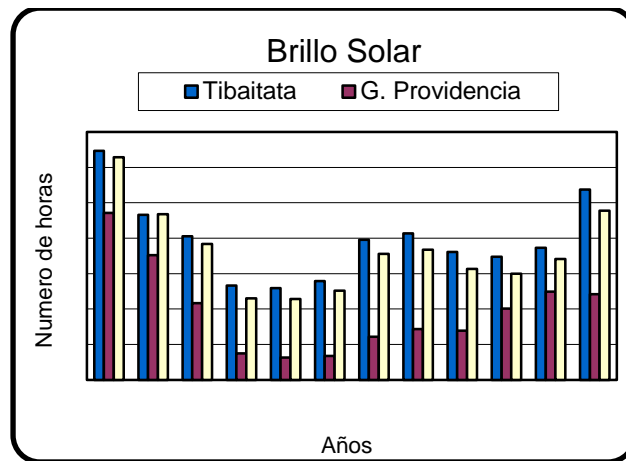
3.1.3 Brillo solar

Esta variable presenta un acumulado mucho más alto para las estaciones Tibaitatà y El Dorado que para G. Providencia, donde el valor anual es más de un 25% menor. En la Figura 3-9, puede observarse fácilmente, que no hay diferencias importantes entre la cantidad de horas de brillo solar mensual registrada entre las estaciones Tibaitatá y El Dorado. Los registros en la estación G. Providencia siempre son más bajos, e incluso durante los meses de abril a agosto (principal periodo de cultivo de papa en la zona),

están muy por debajo de la mitad de la cantidad de horas de brillo solar registradas en las otras dos estaciones.

Durante los meses de enero y febrero, las diferencias en los registros de brillo solar se hacen más pequeñas. Estas diferencias pueden estar asociadas principalmente a características atmosféricas de meso - escala como la presencia de nubes orográficas, aunque también podrían estar asociadas con características fisiográficas del lugar de emplazamiento del instrumento de medición, como orientación de la pendiente o incluso por la reflexión de las montañas por su vegetación.

Figura 3-9. Promedio mensual multianual de brillo solar para las estaciones de la Sabana



Los meses con más altos valores de brillo solar coinciden con los meses de menores precipitaciones y cielos despejados durante la PTS y STS, mientras que en los meses con mayores precipitaciones se observan los valores de brillo solar mensual más bajos (Tabla 3-10). Incluso en algunos años los valores de brillo solar no superaron las 50 horas en todo el mes, lo que indicara que en estas épocas (principalmente hacia el mes de mayo), los cultivos contaron en promedio con menos de 2 horas de radiación solar directa al día. Por ejemplo, en la estación G. Providencia durante abril de 2006 se registraron apenas 24 horas de brillo solar en todo el mes siendo el menor registrado para la zona.

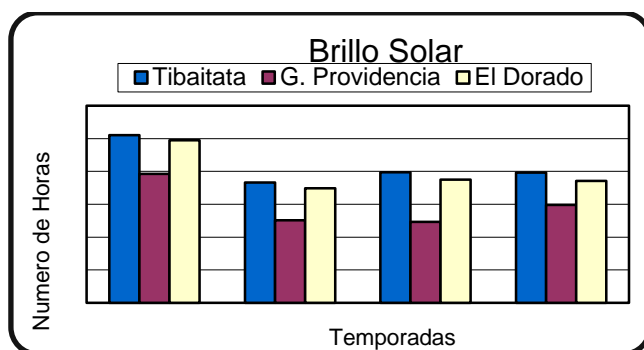
Es interesante resaltar que aunque los niveles de precipitación son muy similares en las estaciones G. providencia y El Dorado, en el brillo solar se observan diferencias importantes. También es importante destacar que los menores valores de insolación a lo

largo del año, en promedio ocurren para las dos temporadas a mediados del año PTL y STS, es decir que entre los meses de marzo a agosto se cuenta con menor insolación que para el resto del año. Este comportamiento está muy relacionado con la variación anual de las temperaturas máximas.

Tabla 3-10: Promedio mensual multianual de brillo solar, desviación estándar y coeficiente de variación para las estaciones de la Sabana.

| Tibaitatá | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Promedio (horas) | 189,4 | 153,2 | 141,2 | 113,2 | 111,9 | 115,7 | 139,1 | 142,7 | 132,3 | 129,6 | 134,6 | 167,5 |
| S | 28,0 | 30,4 | 24,0 | 19,2 | 20,4 | 22,6 | 21,5 | 15,7 | 19,6 | 17,6 | 19,6 | 25,9 |
| C.V | 14,8 | 19,9 | 17,0 | 16,9 | 18,2 | 19,5 | 15,4 | 11,0 | 14,8 | 13,6 | 14,5 | 15,5 |
| G. Providencia | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (horas) | 185,8 | 153,5 | 136,8 | 106,0 | 105,6 | 110,4 | 131,1 | 133,5 | 122,6 | 120,0 | 128,2 | 155,6 |
| S | 30,5 | 34,0 | 23,3 | 19,6 | 20,1 | 21,7 | 25,2 | 16,8 | 18,0 | 16,2 | 19,2 | 31,1 |
| C.V | 16,4 | 22,2 | 17,0 | 18,5 | 19,1 | 19,7 | 19,2 | 12,6 | 14,7 | 13,5 | 15,0 | 20,0 |
| El Dorado | | | | | | | | | | | | |
| Promedio (horas) | 154,2 | 130,5 | 103,4 | 74,9 | 72,5 | 73,5 | 84,3 | 88,7 | 87,8 | 100,3 | 109,8 | 108,3 |
| S | 30,7 | 31,9 | 20,4 | 18,9 | 15,6 | 20,4 | 19,5 | 13,3 | 20,5 | 18,0 | 20,7 | 26,4 |
| C.V | 19,9 | 24,4 | 19,7 | 25,2 | 21,6 | 27,7 | 23,1 | 15,0 | 23,3 | 17,9 | 18,9 | 24,4 |

Figura 3-10: Promedio de brillo solar por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana de Bogotá.



Vale mencionar también que la variable brillo solar presenta una mayor dispersión en la estación de El Dorado, aun cuando los acumulados mensuales son considerablemente menores que en las otras dos estaciones, indicando mayores contrastes entre meses con cielos nublados y cielos despejados.

Comparando la variable precipitación con el brillo solar, no es claro que para las temporadas de lluvia se cuente necesariamente con menores valores de brillo solar,

aunque si es claro que la temporada más seca coincide con los más altos valores de brillo solar (Figura 3-10) y como se mencionó anteriormente, durante esta misma temporada las temperaturas máximas son marcadamente más altas y las mínimas más bajas, constituyendo la PTS como la temporada con mayores exigencias de tipo climático para los cultivos, ya que se sobrepone las mayores probabilidades de ocurrencia de fenómenos como las heladas y las sequias.

El análisis por temporadas agroclimáticas muestra que para las cinco variables analizadas, los mayores valores de desviación estándar y de dispersión de los datos se presentan durante la PTS.

Tabla 3-11: Promedio de brillo solar, desviación estándar y coeficiente de variación por temporadas agroclimáticas para las estaciones de la Sabana

| Tibaitatá | PTS | PTL | STS | STL |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| Promedio (horas) | 510,6 | 366,3 | 397,6 | 396,4 |
| S | 53,1 | 41,4 | 45,7 | 39,3 |
| C.V | 10,4 | 11,3 | 11,5 | 9,9 |
| G. Providencia | | | | |
| Promedio (horas) | 489,3 | 344,8 | 371,5 | 368,8 |
| S | 57,3 | 44,8 | 49,0 | 34,8 |
| C.V | 11,7 | 13,0 | 13,2 | 9,4 |
| El Dorado | | | | |
| Promedio (horas) | 387,9 | 250,8 | 246,5 | 297,9 |
| S | 61,2 | 40,3 | 44,7 | 41,8 |
| C.V | 15,8 | 16,1 | 18,1 | 14,0 |

3.2 Variabilidad climática interanual

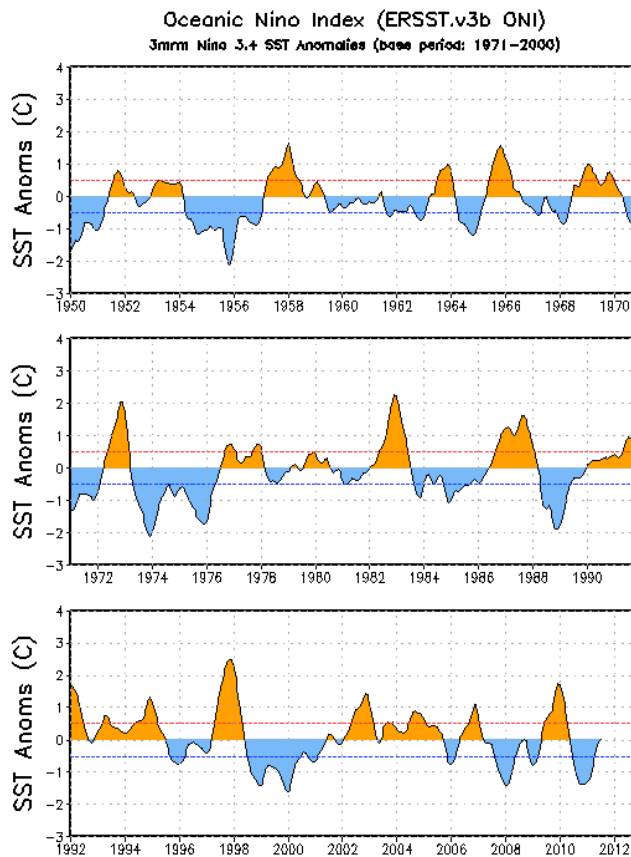
3.2.1 Análisis histórico del Índice oceánico El Niño ONI

Como se mencionó anteriormente, las diferencias en las condiciones climáticas en Colombia año tras año están asociadas con las variaciones de la temperatura superficial del Pacífico tropical, que varía en función de la oscilación ENOS, cuyo principal indicador es el índice ONI (IDEAM, 2010b, IDEAM, 2001).

La Figura 3-11, muestra la variación temporal del índice oceánico ONI en los últimos 60 años, sin incluir el último periodo de enfriamiento La Niña que empezó a desarrollarse a partir de junio del 2010. Las condiciones El Niño (ONI > 0,5), de color rojo son anomalías

de temperatura de mayor intensidad y más frecuentes, mientras las condiciones La Niña ($ONI < -0,5$), representadas con color azul son menos recurrentes, pero como en los años de 1955, 1975 y 2000 tienen una mayor duración. Como se explicó anteriormente (sección 1.1.2), cuando las condiciones de calentamiento o enfriamiento del Pacífico se mantienen por lo menos durante 5 meses seguidos, con valores del ONI por encima de 0,5 o por debajo de -0,5 se habla de presencia del fenómeno El Niño o La Niña respectivamente.

Figura 3-11: Comportamiento del índice oceánico El Niño ONI para el periodo 1950-2010.



Fuente: Centro de predicción Climática NOAA (CPC 2011)

En general, las condiciones El Niño tienden a presentarse a partir del cuarto o quinto mes del año, alcanzando su máximo desarrollo hacia el final del año, para terminar en condiciones neutras hacia mediados del siguiente año, extendiéndose entre 11 y 13 meses en promedio. Salvo el evento de 1968-69 donde las condiciones de El Niño se

presentaron a partir del mes de noviembre, El Niño tiende a empezar su desarrollo entre los meses de mayo a agosto.

Solamente el evento cálido de 1986-88 que se prolongó por 19 meses consecutivos, mantuvo condiciones El Niño durante un año calendario completo, el año de 1987. Entre 1991 y 1995, se presentaron dos eventos El Niño con una duración de 15 y 11 meses respectivamente, separados entre sí, por 21 meses de condiciones neutras. Algo similar ocurrió en los años 1969, 1977 y entre el 2002 y el 2005, aunque los periodos neutros intermedios fueron mucho más cortos, indicando que luego que tiene lugar un evento de calentamiento y regresan las condiciones de normalidad al Pacífico, puede reactivarse nuevamente el fenómeno y retornar a condiciones de temperatura por encima de lo normal hasta 3 veces seguidas, como durante el periodo 2002-07.

Esta es una de las posibilidades, ya que como ocurrió en los años 1964, 1973, 1988, 1998 y 2010, el océano Pacífico pasó de condiciones El Niño a condiciones La Niña en menos de 2 meses. También se ha observado que luego de un evento El Niño, predominan condiciones neutras durante periodos de tiempo relativamente largos (de 1 a 4 años) para que luego aparezcan en el Pacífico condiciones de enfriamiento.

Los eventos La Niña, menos frecuentes que El Niño, se han extendido incluso hasta por más de 30 meses, como en los eventos de 1954-57 y 1973-76 y ya entrando el presente siglo el evento La Niña de 1998-2000, que se extendió por 24 meses. De la misma forma que El Niño, La Niña tampoco tiende a desarrollarse a partir del final o del principio del año.

Con excepción de los eventos de los años 1998-00 y 2000-01 que estuvieron separados por tres meses de condiciones neutras muy cercanas a condiciones La Niña ($ONI = -0,4$), no se ha presentado dos eventos de enfriamiento seguidos. Es decir, no se han observado eventos de enfriamiento del Pacífico, que luego de llegar a su fase máxima y neutralizarse vuelvan a activarse, salvo en el año 2000 que podría también verse como un solo evento con dos fases máximas, tal como se observó en los eventos La Niña de 1954-57, 1973-76.

Después qué termina un evento de enfriamiento del Pacífico, se ha observado que pueden predominar las condiciones neutras durante ciertos periodos de tiempo o por el

contrario puede desarrollarse rápidamente, incluso en menos de tres meses la fase de calentamiento de la oscilación, tal como ocurrió en los años 1957, 1972 y 1976.

3.2.2 Variabilidad climática interanual en la Sabana de Bogotá

En diversas investigaciones (IDEAM, 2010b; Fernández, 2009; Pabón y Torres, 2007; Pabón y Montealegre, 2000) se estudiaron las relaciones entre la oscilación ENOS y las condiciones climáticas en diferentes lugares del país. Dichos trabajos convergen en que la afectación en los regímenes de lluvias y temperaturas por las diferentes fases de la oscilación no cumplen patrones comunes espacial ni temporalmente. Sin embargo, ciertas características que serán discutidas a continuación fueron identificadas durante el desarrollo de esta investigación.

- Correlaciones entre los valores ONI y las variables climáticas en la Sabana de Bogotá.

El Índice oceánico El Niño ONI, principal indicador de la oscilación ENOS, presenta diferentes niveles de correlación con las variables climáticas de la Sabana de Bogotá.

Las mejores correlaciones se encontraron con las temperaturas máximas y medias. Correlaciones menos significativas se obtuvieron con la precipitación, mientras que para la temperatura mínima y el brillo solar los coeficientes de correlación no son significativos al nivel de 0,05.

Tabla 3-12: Coeficientes de correlación sincrónica entre la serie mensual del índice ONI y las series mensuales de las variables climáticas precipitación (Ppt), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) y brillo solar (BS) en la Sabana de Bogotá.

| | Ppt | Tmax | Tmed | Tmin | BS |
|----------------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Tibaitatá | | | | | |
| Correlación | -0,19 | 0,38 | 0,37 | -0,009 | 0,008 |
| p-valor | 0,001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,25 | 0,27 |
| G. Providencia | | | | | |
| Correlación | -0,23 | 0,49 | 0,32 | -0,07 | 0,07 |
| p-valor | 0,0003 | <0,0001 | <0,0001 | 0,26 | 0,26 |
| El Dorado | | | | | |
| Correlación | -0,25 | 0,38 | 0,47 | -0,045 | 0,07 |
| p-valor | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,48 | 0,26 |

Tal como lo mostró IDEAM (2010b), los valores del coeficiente de correlación (Tabla 3-12), sugieren buenos niveles de asociación entre las lluvias en la zona y el índice ONI. La asociación con este índice es aún mayor para la temperaturas máximas y medias. Así mismo, este análisis permite ver que el comportamiento de la temperatura mínima y el brillo solar no está asociado con variaciones del índice ONI. La mejor correlación para la precipitación se presenta en la estación El Dorado, mientras que para la Temperatura máxima la mejor correlación se presenta en la estación G. Providencia.

La Tabla 3-13 muestra que la correlación entre el ONI y la precipitación mensual utilizando rezagos de 1 y 2 meses (Lag 1 y 2) no cambia significativamente, manteniendo buenos niveles de asociación. La asociación disminuye si se aumentan los rezagos a 3 o 4 meses.

Tabla 3-13: Coeficientes de correlación entre la serie mensual del índice ONI y las series mensuales de precipitación sin rezago, con rezagos de uno y dos meses (Lag 1 y Lag 2), suavizadas mediante media móvil de 3 puntos y sin tendencia en la Sabana de Bogotá.

| Tibaitatá | Ppt | Lag 1 | Lag 2 | Suma móvil | Sin tendencia |
|----------------|---------|---------|---------|------------|---------------|
| Correlación | -0,19 | -0,2 | -0,18 | -0,31 | -0,01 |
| p-valor | 0,001 | 0,0002 | 0,05 | <0,0001 | 0,76 |
| G. Providencia | | | | | |
| Correlación | -0,23 | -0,21 | -0,18 | -0,37 | 0,007 |
| p-valor | 0,0003 | 0,0002 | 0,05 | <0,0001 | 0,42 |
| El Dorado | | | | | |
| Correlación | -0,25 | -0,26 | -0,25 | -0,35 | -0,01 |
| p-valor | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,87 |

Si en vez de correlacionar los valores mensuales, con o sin rezagos, se utilizan las medias móviles de tres meses a efecto de filtrar oscilaciones de tipo estacional de las series de precipitación, se observan, tal como lo mencionó IDEAM (2010b) aumentos significativos en los niveles de asociación entre el índice ONI y la precipitación en las tres estaciones de las zona de estudio cuando se retira el componente de tendencia de las series de tiempo de precipitación, restando cada dato mensual de su dato anterior, la asociación con el índice ONI se reduce significativamente, indicando que el aumento o disminución de precipitación en la zona de un mes a otro, no está relacionado con el

comportamiento de la temperatura del pacifico, mientras que sí hay una asociación importante, cuando se analiza la cantidad de lluvia acumulada, como por ejemplo en tres meses consecutivos, como lo sugieren las altas correlaciones con la media móvil.

- Correlaciones por temporadas agroclimáticas

Como se mencionó anteriormente (sección 1.1.4) y de acuerdo con IDEAM (2005), el efecto climático de la oscilación ENOS depende de la época del año en que se presenta la fase extrema del fenómeno. Por lo general El Niño o la Niña empiezan su desarrollo desde los meses de abril o mayo, mientras que su máximo desarrollo toma lugar hacia final o principio del año, por lo que es de esperarse que este patrón module el impacto de la oscilación sobre las condiciones climáticas.

Correlacionando las series de precipitación acumulada con los valores promediados del índice ONI para cada temporada agroclimática mejoraron notablemente los coeficientes de correlación respecto a los calculados con valores mensuales o con la suma móvil incluyendo todos los meses del año. Muy buenos niveles de asociación se observan para la PTS, mientras que para la PTL los coeficientes de correlación no son significativos. Para las STS y STL, se observan niveles de asociación entre moderados y altos (Tabla 3-14). Estos valores de correlación tienden a mejorar con rezagos entre uno y dos meses, principalmente para la segunda temporada seca. Los más altos niveles de correlación se observan para la estación G. Providencia, lo que permitiría pensar que allí el impacto sobre las condiciones climáticas frente a una fase máxima de la oscilación es más intensa, principalmente durante las temporadas secas. Se observa con claridad que durante la PTL, los niveles de asociación son demasiado débiles, lo que indica que durante esta temporada los aumentos o disminuciones de la precipitación en la zona no estarían directamente asociados con un fenómeno El Niño o La Niña o de manera recíproca puede pensarse que estos dos fenómenos modifican en una menor medida las precipitaciones durante esta temporada del año. Este resultado es similar al de IDEAM (2010b), que mediante el cálculo de correlaciones mensuales entre la TSM del Pacífico y la precipitación de El Dorado encontró más bajos niveles de asociación entre las variables pero manteniendo el mismo patrón a lo largo del año.

Tabla 3-14: Coeficientes de correlación entre las series de precipitación acumulada durante cada temporada agroclimática en las estaciones de la Sabana de Bogotá y el índice ONI promediado por cada temporada agroclimática, sin rezagos (Lag 0) y con rezagos de uno y dos meses (Lag 1 y Lag 2).

| Lag 0 | PTS | PTL | STS | STL |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Tibaitatá | -0,64 | 0,00 | -0,34 | -0,34 |
| G. Providencia | -0,71 | -0,05 | -0,60 | -0,31 |
| El Dorado | -0,64 | 0,07 | -0,51 | -0,39 |
| Lag 1 | | | | |
| Tibaitatá | -0,66 | -0,06 | -0,29 | -0,34 |
| G. Providencia | -0,73 | -0,09 | -0,57 | -0,30 |
| El Dorado | -0,65 | 0,03 | -0,49 | -0,40 |
| Lag 2 | | | | |
| Tibaitatá | -0,67 | -0,08 | -0,19 | -0,37 |
| G. Providencia | -0,64 | 0,01 | -0,39 | -0,44 |
| El Dorado | -0,74 | -0,09 | -0,43 | -0,31 |

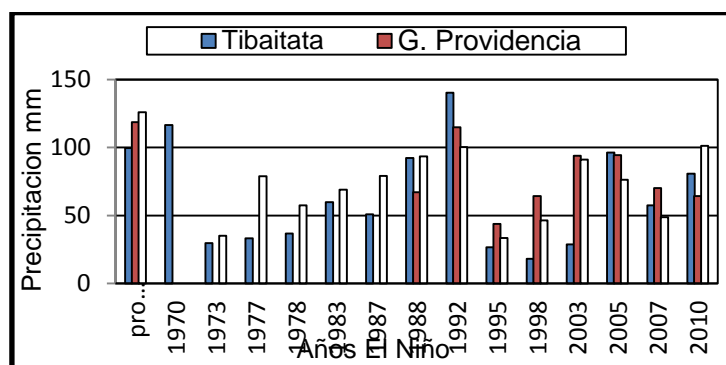
- Comportamiento de las variables climáticas de la Sabana de Bogotá durante los eventos El Niño y La Niña

De acuerdo con los valores de los coeficientes de correlación es de esperarse que cuando el índice ONI tome valores altos durante los eventos El Niño, las temperaturas máximas y medias de la zona tiendan a valores altos, mientras que en una menor medida los valores de precipitación tiendan a tomar valores bajos. De manera recíproca, valores bajos del ONI (eventos La Niña) estarían relacionados con disminución de la temperatura y aumentos en las precipitaciones. Este comportamiento, a juzgar por los coeficientes de correlación es más claro durante la PTS, su intensidad disminuye pero sigue siendo importante para la STS y STL y casi que desaparece para la PTL. Sin embargo los valores de la precipitación y temperaturas en la zona de estudio no están exclusivamente determinados por el comportamiento de la oscilación ENOS ya que las correlaciones aunque significativas no son perfectas ni concluyentes, de tal forma que otras fuentes de variabilidad climática pueden influir en su comportamiento.

Por ejemplo, durante la PTS la variable precipitación, muestra las más significativas correlaciones con el ONI (Tabla 3-14), sin embargo aunque durante los eventos El Niño han sido muy frecuentes los valores de precipitación por debajo de los promedios

históricos para la época, también se han presentado ocasiones en que los acumulados de precipitación sobrepasan los valores promedios y toman valores históricamente más altos (Figura 3-12).

Figura 3-12: Comportamiento de la precipitación durante la PTS bajo eventos El Niño.



Una descripción del comportamiento de las variables climáticas para cada temporada agroclimática durante los eventos El Niño y La Niña, puede ser consultada en el anexo B.

- Escenarios de Variabilidad Climática Interanual ENOS

La Tabla 3-15, muestra los valores anuales de las variables climáticas para los años 1992, 1993 y 2008, seleccionados como escenarios de variabilidad climática interanual Niño, Neutro y Niña respectivamente. Es claro el fuerte contraste entre los valores acumulados de precipitación durante los eventos Niño de 1992 y Niña de 2008, mientras que el evento Neutro tiende a valores más cercanos al promedio.

De forma contraria y de acuerdo con los análisis de correlación, la temperatura máxima tiende a valores más altos durante los eventos El Niño, mientras durante el evento La Niña se presentaron valores hasta 3°C más bajos. Para el brillo solar y la temperatura mínima, nuevamente durante estos años no hubo una clara señal de aumento o disminución, ya que por ejemplo en el año de 1993 las temperaturas mínimas tuvieron valores más bajos que los del año El Niño.

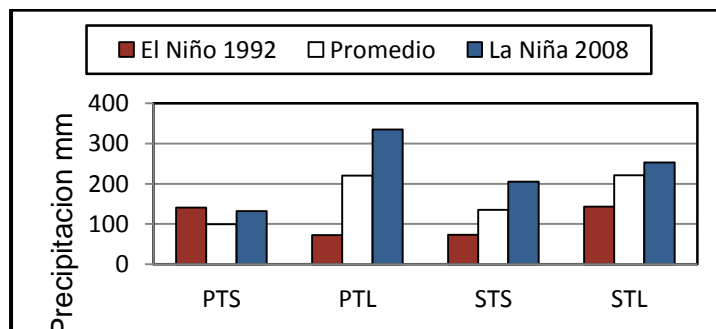
Para las estaciones Tibaitatá y G. Providencia, los valores negativos de la temperatura mínima en los años 1993 y 2008, indicarían que incluso durante los eventos la Niña o en años con neutralidad en el Pacífico existe la probabilidad de ocurrencia de heladas. Los valores promedios de temperatura media no muestran diferencias importantes.

Tabla 3-15: valores anuales de las variables climáticas para 1992, 1993 y 2008.

| Estación Tibaitatà | | | | | | |
|-------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| Año | Escenario | Temperatura máxima absoluta (°C) | Temperatura Mínima absoluta (°C) | Temperatura media (°C) | Precipitación (mm) | Brillo solar (horas) |
| 1992 | El Niño | 25.1 | -3.8 | 13.1 | 410 | 1716.2 |
| 1993 | Neutro | 23.4 | -4.6 | 13.0 | 708.8 | 1520.8 |
| 2008 | La Niña | 22.0 | 0 | 13.4 | 890.9 | 1486.4 |
| Estación G. Providencia | | | | | | |
| 1992 | El Niño | 25.4 | -5.0 | 13.5 | 566.3 | 1201 |
| 1993 | Neutro | 24.4 | -4.2 | 13.4 | 779.9 | 1223 |
| 2008 | La Niña | 23.4 | -0.8 | 13.5 | 1033.1 | 1035 |
| Estación El Dorado | | | | | | |
| 1992 | El Niño | 24.9 | -1.90 | 14.3 | 434.7 | 1735.2 |
| 1993 | Neutro | 23.4 | 0.53 | 14.1 | 760.8 | 1679.3 |
| 2008 | La Niña | 22.3 | 1.10 | 13.2 | 1206.8 | 1403.3 |

Es importante aclarar que la influencia de la variabilidad climática que se refleja en los valores acumulados anuales, se genera por alteraciones sobre el comportamiento de las temporadas de lluvia tanto en intensidad como en duración. Al comparar la distribución de las lluvias durante los años 1992 y 2008, respecto de los valores promedio (Figura 3-13), puede observarse cómo durante el evento la Niña del 2008 se mantiene el patrón de comportamiento bimodal, pero aumentando los volúmenes de precipitación en cada temporada, mientras durante el evento el Niño de 1992, el patrón bimodal prácticamente desaparece. Para este caso particular del año 1992, la drástica disminución de las precipitaciones durante la PTL, influyó de manera determinante en la disminución de los rendimientos de múltiples cultivos como algodón, sorgo y papa (Carvajal *et al.*, 1999).

Figura 3-13: Comportamiento de la precipitación por temporadas agroclimáticas durante los años 1992 y 2008.



3.3 Análisis del Cambio Climático en la Sabana de Bogotá

3.3.1 Análisis de tendencias

Usando la prueba estadística de Mann-Kendall para identificar la existencia de tendencia de aumento o disminución en las variables climatológicas y la metodología de Sen para cuantificar esta tendencia en las series anuales para el periodo comprendido entre el año 1985 y el 2008, se encontró una tendencia de aumento progresivo altamente significativa en las temperaturas máximas y medias en las estaciones de Tibaitatá y G. Providencia, mientras que la temperatura mínima mostró aumentos significativos en las tres estaciones de la zona de estudio.

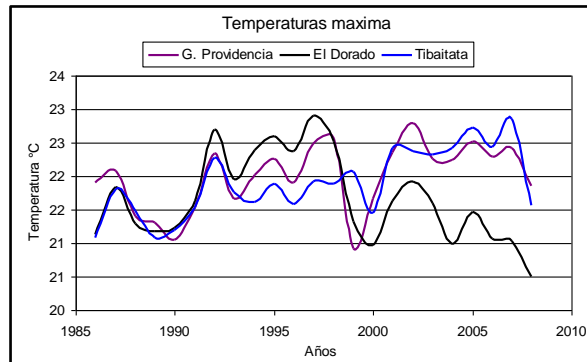
Contrario al comportamiento de las otras dos estaciones, las temperaturas máximas y medias de la estación de El Dorado no presentan tendencias significativas (Tabla 3-16).

Tabla 3-16: Significancia estadística y estimativo de tendencia anual de las temperaturas para las estaciones de la Sabana de Bogotá

| Temperatura Máxima | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| Estación | Significancia estadística | Variación anual |
| Tibaitatá | *** | 0.052 °C/año |
| G. Providencia | * | 0.038 °C/año |
| El Dorado | - | -0.016 °C/año |
| Temperatura Media | | |
| Tibaitatá | *** | 0.042 °C/año |
| G. Providencia | *** | 0.049 °C/año |
| El Dorado | - | 0.004 °C/año |
| Temperatura Mínima | | |
| Estación | Significancia estadística | Variación anual |
| Tibaitatá | *** | 0.033 °C/año |
| G. Providencia | *** | 0.064 °C/año |
| El Dorado | ** | 0.059 °C/año |

.*** tendencia altamente significativa (99.9%), ** tendencia moderadamente significativa (99%), *tendencia significativa (95%), +tendencia poco significativa (90%).
– tendencia no significativa.

Figura 3-14: Series históricas de las temperaturas máximas promedio anual para el periodo 1986-2008 en la Sabana de Bogotá



Al analizar el comportamiento en el tiempo las temperaturas máximas en la estación el Dorado (Figura 3-14), puede observarse un brusco cambio de comportamiento alrededor del año 1998, razón por la que la tendencia de aumento que se mantenía resultó ser no significativa. Este cambio de media en la serie de tiempo puede estar asociado a una alteración de los instrumentos de medición o un cambio brusco de las condiciones de emplazamiento en las vecindades de la estación climática.

En la Figura 3-14 puede observarse cómo la diferencia de los promedios anuales de temperatura máxima registrada en las estaciones se hizo notable durante los últimos 10 años, mientras que en las otras dos estaciones, se mantienen comportamientos muy similares. En las tres estaciones se detectan tendencias de aumento en los volúmenes anuales de precipitación, más significativos para las estaciones G. Providencia y El Dorado, mientras que en la estación Tibaitatá la tendencia resultó no ser significativa.

De acuerdo con los enunciados del IPCC (2007), se puede esperar que exista una tendencia de aumento generalizada en las temperaturas máximas y mínimas en las estaciones, siendo más marcado el aumento de las temperaturas mínimas.

Puede haber también, adicional al cambio en los instrumentos de medición un efecto de disminución de las temperaturas dentro de los complejos urbanos, que ha sido atribuido al efecto conocido como isla de calor, ya que la polución, las construcciones civiles y su sombra podrían impedir el paso de radiación solar en horas del día (Angel *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 1990). Según los análisis de tendencias, estas diferencia podrían intensificarse con el paso del tiempo.

Tabla 3-17: Significancia estadística y estimativo de tendencia anual de la precipitación para las estaciones de la Sabana de Bogotá.

| Precipitación | | |
|----------------|---------------------------|-----------------|
| Estación | Significancia estadística | Variación anual |
| Tibaitatá | - | 6.55 mm/año |
| G. Providencia | + | 9.88 mm/año |
| El Dorado | * | 13.13 mm/año |

.*** tendencia altamente significativa (99.9%), ** tendencia moderadamente significativa (99%), *tendencia significativa (95%), +tendencia poco significativa (90%).
 – tendencia no significativa

3.3.2 Análisis de los escenarios de cambio climático para la Sabana de Bogotá

Los escenarios A2 y A1B muestran las mayores diferencias respecto de las condiciones climáticas actuales para la zona de estudio. El comportamiento de las variables climáticas a lo largo del año para los dos periodos de análisis (2011-2040 y 2041-2070) mantiene ciertas similitudes, aun cuando los valores de los promedios de las variables climáticas tengan ciertas diferencias entre sí. Como se ilustra en la Figura 3-15 y 3-16, a corto plazo (periodo 2011-2040), los escenarios A2, B2 y A1B convergen en una disminución de los valores anuales de lluvia con disminuciones principalmente durante la STL, mientras que las dos temporadas secas tienden a ser menos secas.

Figura3-15: Promedios mensuales de precipitación para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado

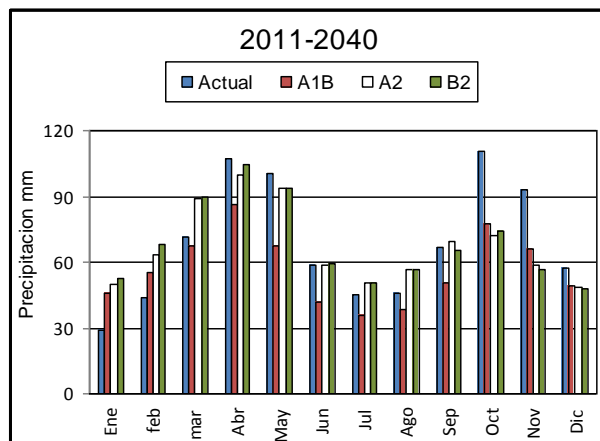
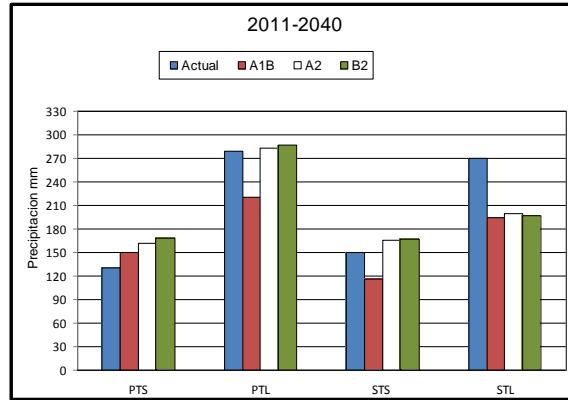


Figura 3-16: Promedios de precipitación acumulada por temporadas agroclimáticas para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado

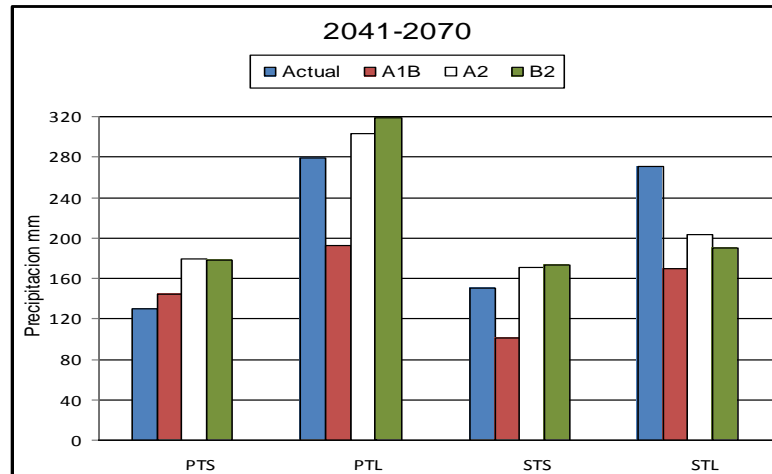


El escenario A1B muestra las más drásticas reducciones de precipitación, con la aclaración que bajo este escenario las lluvias estarían más distribuidas a lo largo del año. La reducción durante la STS es menor que durante las temporadas de lluvia, e incluso durante la PTS habría ligeros aumentos. Según este modelo, de las tres estaciones la estación El Dorado sería la más afectada por la reducción de las precipitaciones. Los escenarios A2 y B2 muestran resultados muy convergentes, cercanos entre si todos los meses del año. Por temporadas agroclimáticas, los escenarios A2 y B2 muestran ligeros aumentos de precipitación, salvo para la STL, donde la disminución en los tres escenarios es casi del 30%. En el escenario A1B, durante la PTL y la STS, periodo utilizado para las simulaciones ocurrirían disminuciones de precipitación entre un 20 y 30%, mientras en el A2 y B2 se presentarían en promedio ligeros incrementos.

A más largo plazo (2040-2071), los escenarios A2 y B2 siguen siendo bastante próximos, sugiriendo ya para esta época ligeros aumentos en los volúmenes anuales de precipitación principalmente durante la PTL, mientras que la STL tendería a ser incluso más seca de lo previsto para el periodo 2011-2040. Contrario a estos dos escenarios, en el A1B los volúmenes de lluvia tienden a disminuir aún más que para el primer periodo de análisis, hasta valores alrededor de unos 25% menores de los valores anuales actuales, pero con el mismo comportamiento de distribución de las lluvias un poco más uniforme a lo largo del año. Las mayores reducciones en los tres escenarios siguen siendo durante

la STL, mientras que durante la PTS los tres escenarios muestran ligeros aumentos, sobre todo los escenarios A2 y B2.

Figura 3-17: Promedios de precipitación acumulada por temporadas agroclimáticas para el periodo 2041-2070 bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado.



Bajo los escenarios de cambio climático, las temperaturas máximas para la estaciones Tibaitatá y G. Providencia muestran ligeras disminuciones en los promedios anuales para periodo 2011-2040, mientras que para El Dorado los tres escenarios convergen en ligeros aumentos del promedio anual de temperatura máxima. En las tres estaciones los escenarios muestran que el comportamiento actual de la temperatura máxima, con sus mayores valores hacia la PTS y los más bajos hacia mitad de año cambiaría a una distribución más uniforme con los valores más altos hacia los meses de agosto y septiembre.

Los promedios anuales de temperatura para este periodo difieren en menos de 2 décimas de grado en los tres escenarios, aunque el A1B muestra un futuro ligeramente más cálido (Figura 3-18), con los máximos aumentos de temperatura alrededor de 1°C presentándose hacia el mes de julio, mientras que durante la PTS las temperaturas estarían aproximadamente 0,5°C por debajo de los valores actuales.

Figura 3-18: Promedios de temperatura máxima por temporada agroclimática para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático en la estación El Dorado.

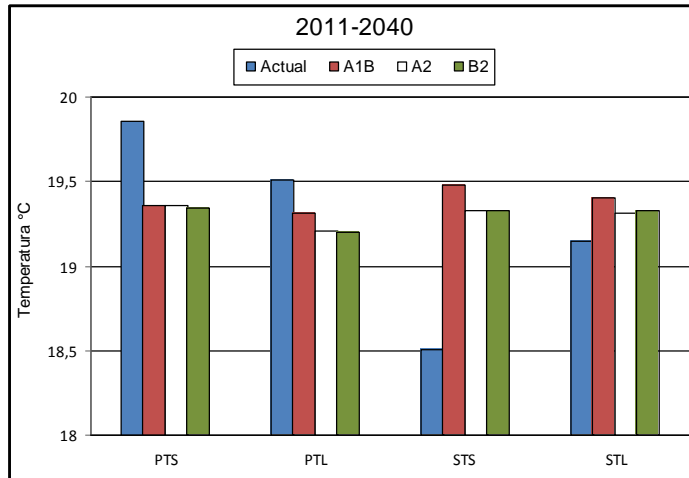
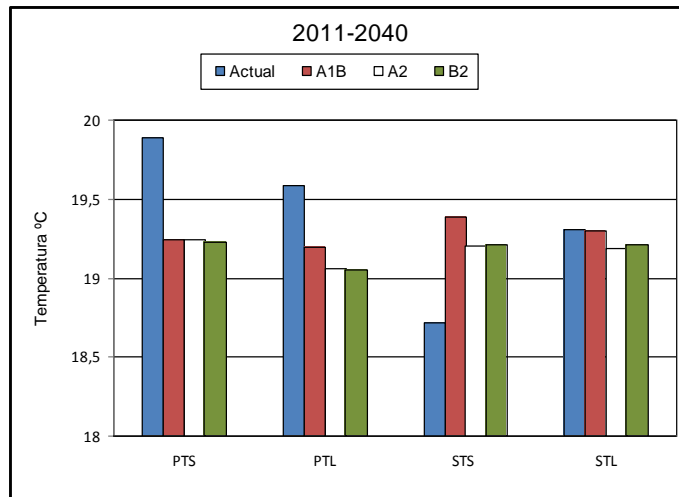


Figura3-19: Promedios de temperatura máxima por temporada agroclimática para el periodo 2011-2040 bajo escenarios de cambio climático en la estación Tibaitatá.



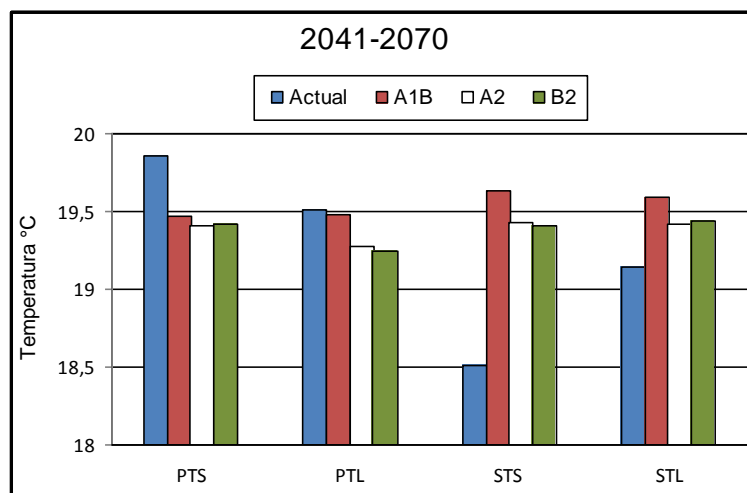
En los tres escenarios se presentarían disminuciones en los promedios de temperatura máxima durante la PTS y PTL, mientras que para las STS se presentarían incrementos ligeramente mayores en la estación El Dorado. Para la STL, los promedios serían

ligeramente menores que los actuales en Tibaitatá y G. Providencia, pero ligeramente mayores para la estación El Dorado.

Para el periodo 2041-2070, los promedios de temperatura máxima mantienen el mismo comportamiento que para el periodo anterior (Figura 3-20), pero con un aumento aproximado de $0,1^{\circ}\text{C}$.

En general sería importante la variación de la distribución de las temperaturas máximas a lo largo del año, ya que hacia la STS los valores estarían 1°C por encima de los valores actuales, mientras que hacia la PTS por el contrario en los tres escenarios las temperaturas máximas promedio disminuirían alrededor de $0,7^{\circ}\text{C}$, siendo menor la reducción bajo el escenario A1B. Enmascarando estos cambios que podrían llegar a ser importantes para diferentes sistemas biológicos, los promedios anuales no tendrían cambios importantes. Los máximos aumentos en los promedios anuales alrededor de $0,3^{\circ}\text{C}$ ocurrirían bajo el escenario A1B en la estación El Dorado, mientras en las otras dos estaciones, incluso bajo los escenarios A2 y B2 los promedios podrían continuar por debajo de los valores actuales.

Figura 3-20: Promedios mensuales de temperatura máxima para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación El Dorado.



Según los modelos del IDEAM (2010), la temperatura mínima sería la variable que presenta los mayores cambios en los valores promedios anuales, pero a diferencia de lo ocurrido con la temperatura máxima y la precipitación, estas variaciones son claramente

de aumento en las tres estaciones bajo los tres escenarios y se conservaría la distribución actual de la variable a lo largo del año.

La Figura 3-21 muestra el comportamiento de la temperatura mínima promedio para el periodo 2011-2040, para la estación de G. Providencia. Los escenarios A2 y B2 siguen mostrando resultados muy similares entre sí, pero a diferencia de lo ocurrido con la temperatura máxima el escenario A1B ahora muestra los menores aumentos en el tiempo.

Se ve claramente que los máximos aumentos respecto a los valores actuales se presentarían hacia la PTS, mientras que las mínimas variaciones hacia la STS, incluso con reducciones para esta temporada bajo el escenario A1B. Este escenario, de manera particular muestra ligeras reducciones también durante la PTL, sin embargo, los valores promedios anual bajo los tres escenarios serian de aumento. Según estos resultados, los máximos incrementos en los valores promedios anuales de temperatura mínima se presentarían en la estación Tibaitatá, alrededor de 1,7°C.

A más largo plazo, manteniendo distribuciones similares a lo largo del año, los modelos muestran aumentos de entre 1,5 y 3°C en los promedios anuales de temperatura mínima, con los mayores incrementos hasta por encima de 4°C en el mes de diciembre en la estación de Tibaitatá.

Figura 3-21: Promedios mensuales temperatura mínima para el periodo 2011-2040 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación G. Providencia.

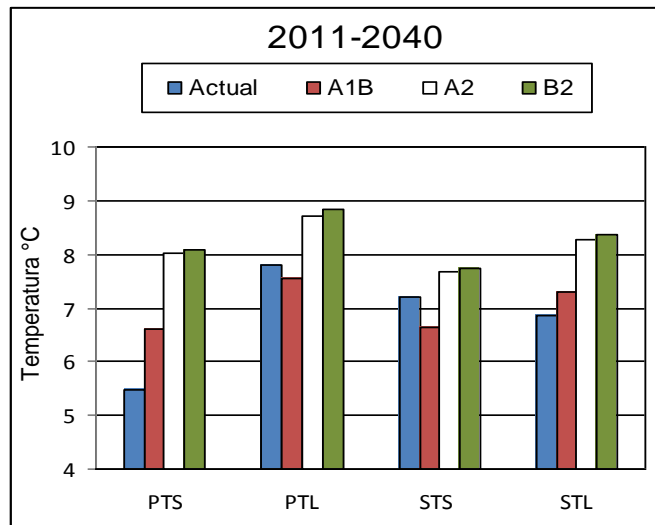
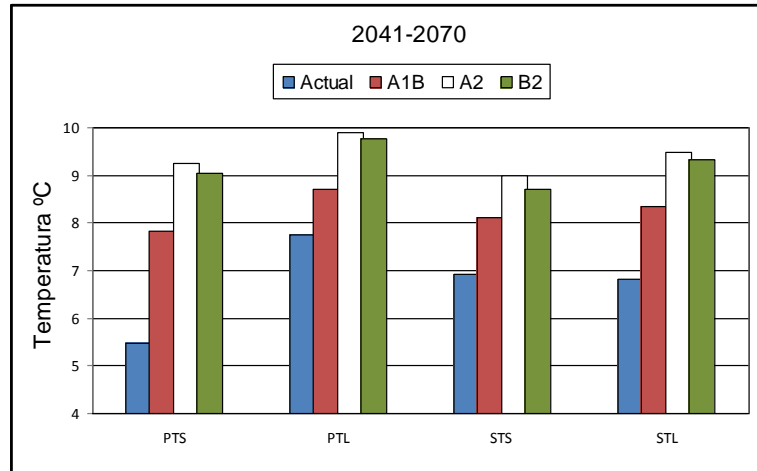


Figura 3-22: Promedios mensuales temperatura mínima para el periodo 2041-2070 bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B en la estación Tibaitatá.



3.4 Evaluación de variedades de papa locales para simulaciones con DSSAT

Las experiencias en validación y calibración de variedades de papa para efectos de simulación con DSSAT en el país no son muy numerosas. Solo se encontraron referencias bibliográficas de dos trabajos en los que se realizó el ajuste para 6 variedades de papa, cuatro en condiciones de la Sabana de Bogotá y dos variedades en zonas montañosas de Soacha, igualmente cerca de la Sabana de Bogotá. Forero y Garzón (2000), realizaron la validación de crecimiento de la papa con el modelo DSSAT para cuatro variedades bajo condiciones de cultivo comercial, entre ellas la Parda Pastusa y Diacol Capiro. La variedad Tuquerreña también ha sido objeto de investigación en modelación, siendo calculados y calibrados los coeficientes requeridos por el software DSSAT (Olarte *et al.*, 2000).

Esta variedad, tiene una baja representación en la producción nacional (menor al 5%) y sus características no coinciden con las características de la Sabana de Bogotá. Esta variedad nativa de maduración tardía, tiene un ciclo de cultivo de 6 a 7 meses de acuerdo con la temperatura y presenta buena adaptación a zonas altas entre los 2800 y hasta los 3200 msnm. En cultivos comerciales presenta un rendimiento promedio de 20 toneladas por hectárea (FINAGRO, 2007). En el trabajo de Olarte *et al.*, (2000), se realizó la calibración de la variedad *S phureja*, llamada también variedad yema de huevo (papa

criolla), variedad de ciclo corto que alcanza apenas una producción nacional de 150000 toneladas al año, representando menos del 5% de la producción nacional (Chaparro, 2008).

Tabla 3-18: Coeficientes genéticos para algunos cultivares de papa.

| Variedad | G2 (cm ² xm ² xdia ⁻¹) | G3 (grxplanta ⁻¹ xdia ⁻¹) | PD | P2 | TC (°C) |
|----------------|---|---|-----|-----|---------|
| Capiro | 1236 | 8.8 | 0.2 | 0.7 | 25 |
| Monserate | 1450 | 9.2 | 0.2 | 0.4 | 25 |
| Morita | 400 | 6.3 | 0.2 | 0.3 | 25 |
| Pastusa | 900 | 6.3 | 0.2 | 0.3 | 25 |
| Tuquerreña | 973.2 | 8.3 | 0.2 | 0.8 | 25 |
| Yema de Huevo | 304.8 | 5.5 | 0.2 | 0.6 | 25 |
| Arbolona | 200 | 43.0 | 0.1 | 0.1 | 4.1 |
| Sebago | 2000 | 22.5 | 0.2 | 0.7 | 15 |
| Russet Burbank | 2000 | 22.5 | 0.2 | 0.6 | 17 |
| Desiree | 2000 | 25 | 0.2 | 0.9 | 17 |

En la Tabla 3-18 aparecen en su orden los coeficientes genéticos de las seis variedades calibradas en condiciones locales mediante investigaciones en la Universidad Nacional de Colombia, Diacol Capiro, Monserate, Morita, Pastusa, Tuquerreña y Yema de huevo, la variedad Arbolona calibrada en Venezuela (Sarmiento y Bowen, 2002) y para comparación tres variedades cultivadas en altas latitudes cuyos coeficientes vienen por default dentro software DSSAT, Sebago, Russet y Desiree. Se observa una importante diferencia en los valores de los coeficientes G2 y G3 de las variedades nacionales, con los cultivares de otras latitudes que toman valores de 2000 cm²xm²xdía⁻¹ y mayores a 20 gramosxplanta⁻¹xdía⁻¹ respectivamente. Esta diferencia se debe a que estos altos coeficientes pertenecen a variedades de alto rendimiento y ciclo de desarrollo con temperaturas mayores a las locales. Así mismo se observan diferencias importantes en el coeficiente G2 con la variedad venezolana, debido a que esta es una variedad de paramo y el experimento de calibración se desarrolló a 3400 msnm. Se pueden observar diferencias importantes en los valores de TC. En este sentido, Forero y Garzón (2000) opinaron que el modelo no es sensible a las variaciones de TC y sugirieron podría ser un error en la estructura del modelo. Olarte *et al.*, (2000) solo encontraron diferencias en los resultados con valores de TC menores a 10°C, resultado confirmado por Sarmiento y Bowen (2002), en los andes venezolanos quienes encontraron que solo con valores de

TC por debajo de 4,1°C de la tuberización es inhibida, aunque el valor de G3 calculado para esta variedad no parece razonable. Sin embargo hay que tener en cuenta que TC, no corresponde a una temperatura máxima crítica superior, sino que corresponde al mínimo valor de la temperatura máxima, por debajo del cual la tuberización es inhibida en algún grado. El valor de TC de 25°C es un valor de referencia respecto del cual el crecimiento de los tubérculos se ve desfavorecido por el aumento en la respiración de la planta.

Teniendo en cuenta la representatividad en la producción nacional y que los coeficientes calculados en trabajos anteriores permiten realizar simulaciones razonables se tomaron los coeficientes que definen las variedades Diacol Capiro (R-12) y Parda Pastusa para las simulaciones. En este trabajo aprovechando la disponibilidad de información respecto a la variedad Capiro, se realizó nuevamente la validación del modelo en condiciones de Tibaitatá en Mosquera, usando los datos de campo medidos en investigaciones desarrolladas por Terán *et al.*, (2006).

3.5 Generación de Climáticos diarios para las simulaciones con DSSAT

De acuerdo con diferentes análisis, los datos diarios de temperatura máxima y mínima de la Sabana de Bogotá siguen una distribución normal respecto de los valores promedios (Cortez *et al.*, 2005; Storchet *et al.*, 1999). Incluso, analizando mes a mes los datos de temperatura mantienen hasta ciertos intervalos de confianza estadística, una distribución normal respecto de los promedios mensuales (Figuras 3-22 y 3-23).

Este comportamiento se utilizó para la generación de los datos diarios necesarios para las simulaciones de rendimiento bajo escenarios de cambio climático. A manera de prueba se generaron datos diarios de temperatura máxima y mínima utilizando una función de hoja de cálculo para generar datos aleatorios que tengan una distribución normal, respecto de una media y una desviación calculada con las series de datos climáticos y utilizando el software Marksim, usando como datos de entrada los promedios mensuales y las desviaciones para el año 1993.

Figura 3-23: Histograma de los datos diarios de temperatura máxima registrados en la estación Tibaitatá, durante el año 1992.

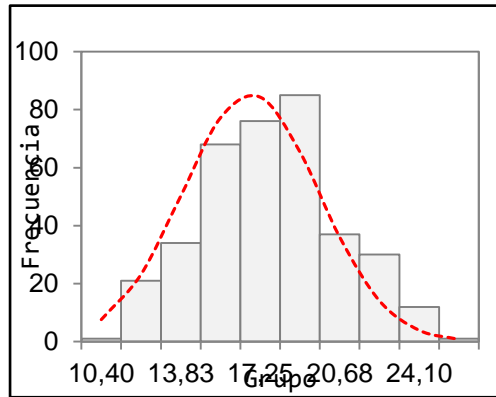
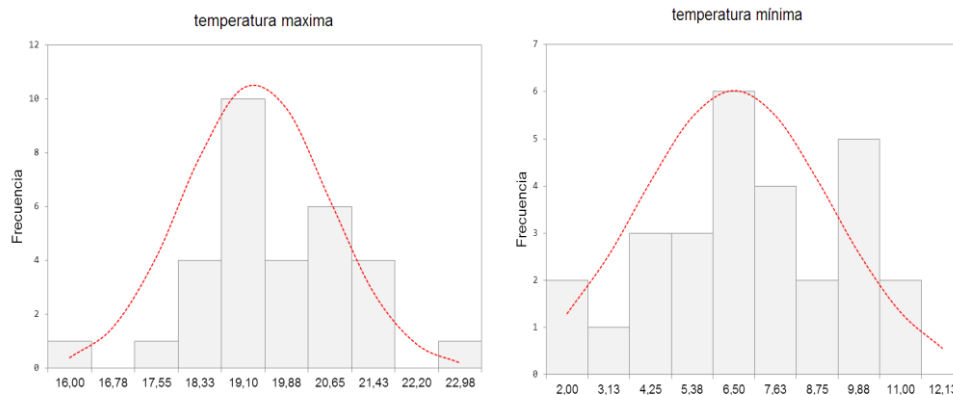


Figura 3-24: Histogramas de los datos diarios de temperatura máxima y mínima para los meses de noviembre y febrero del año 1992 respectivamente en la estación Tibaitatá



Los datos diarios generados usando el software Marksim tienden a sobreestimar los valores de temperatura máxima y mínima, además de sobre estimar su dispersión y valores promedio para cada mes(Figuras 3-23 y 3-24). Por esta razón no fueron utilizados estos datos para las simulaciones.

Figura 3-25: Datos de temperatura máxima generados a partir de distribución normal, datos reales y datos generados mediante Marksim para el año 1993

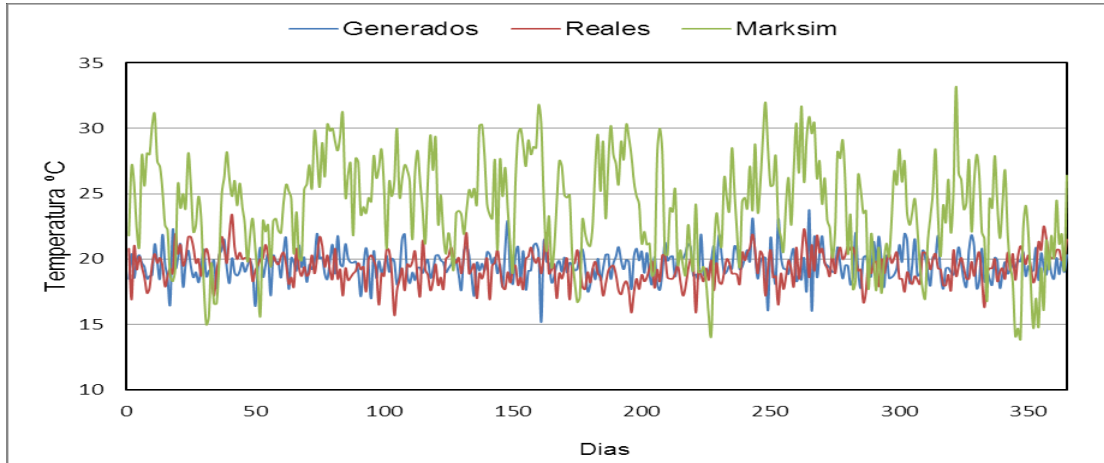
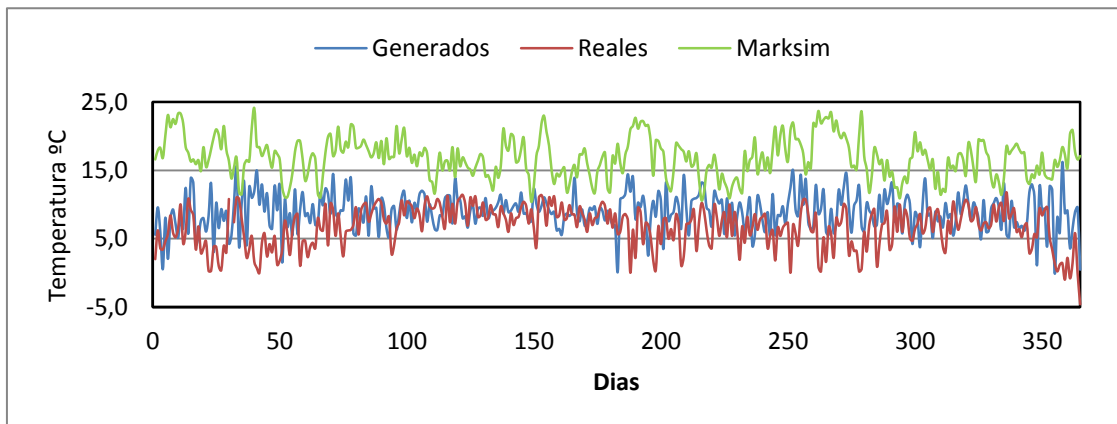
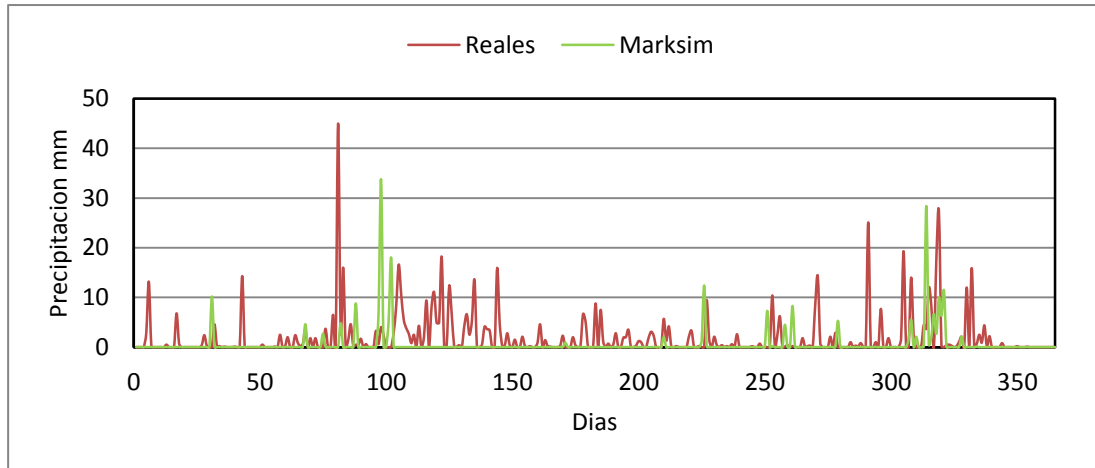


Figura 3-26: Datos de temperatura mínima generados a partir de distribución normal, datos reales y datos generados por Marksim para el año 1993.



Aun cuando los datos generados a partir de la distribución normal no se ajustan perfectamente a los datos diarios, si mantienen los mismos promedios mensuales y la misma desviación estándar, de tal forma que se obtienen mínimas diferencias al realizar las simulaciones con estos datos, en relación con los datos registrados en las estaciones climáticas para el año 1993.

Figura 3-27: Datos de precipitación generados por Marksim y datos reales para el año 1993.



A pesar de que los datos mensuales de precipitación del año 1993 usados para la generación con Marksim sumaban un acumulado de 708 mm, este software sobre estima el número de días sin lluvia y sub estima el volumen anual de precipitación, generando series de datos diarios con acumulados anuales apenas entre 200 y 400 mm. Marksim distribuye de manera adecuada las mayores y más frecuentes precipitaciones durante las temporadas de lluvia, así como la frecuencia e intensidad de precipitaciones fuertes. Sin embargo las diferencias con los datos reales son notables, por lo que estos datos no fueron utilizados para las simulaciones.

3.6 Validación de DSSAT bajo las condiciones de la Sabana de Bogotá.

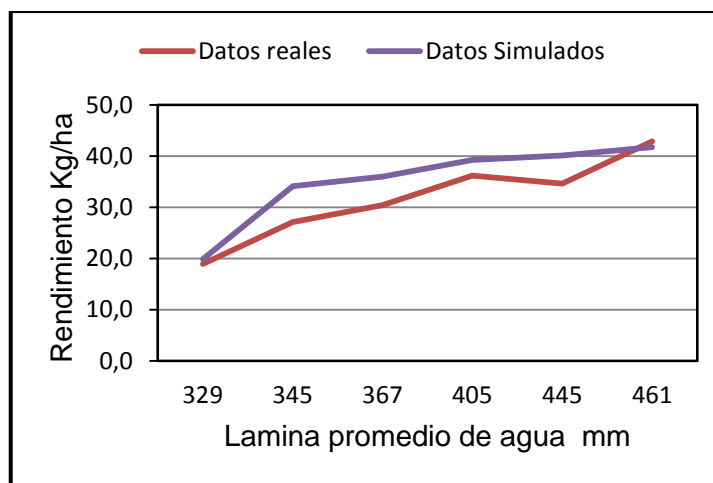
Investigadores de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA determinaron los requerimientos hídricos para la producción de dos variedades de papa industrial bajo condiciones del occidente de la Sabana de Bogotá (Terán *et al.*, 2006), utilizando diferentes niveles de irrigación mediante un sistema de riego por aspersión que permitía un nivel de agotamiento hasta un nivel determinado y registraron las respuestas del rendimiento del cultivo a las diferentes láminas de agua aplicada.

Las condiciones del suelo, fertilización, riego, condiciones climáticas y opciones de manejo fueron utilizadas para simular este experimento y comparar los datos medidos por

Terán *et al.*, (2006) con los datos generados por DSSAT y tener de esta forma una medida de la precisión de la respuesta del modelo.

Hay que aclarar que los rendimientos simulados por DSSAT son potenciales, en el sentido que dependen de factores climáticos, la aptitud del suelo, la disponibilidad hídrica y del nitrógeno, sin que la disponibilidad o abundancia de otros elementos como fósforo, potasio, o de los elementos menores, pueda ser limitante para el desarrollo del cultivo.

Figura 3-28: Rendimientos de papa Diacol Capiro reales y simulados para diferentes láminas de agua aplicada.



Es de esperarse que los rendimientos reales estén por debajo de los simulados, siendo estos últimos límites teóricos máximos que se presentarían cuando los recursos climáticos, edáficos, biológicos y fisiológicos etc., puedan ser completamente aprovechados. La calidad de la semilla utilizada y la aparición de plagas o enfermedades en el cultivo son factores que eventualmente podrían reducir los rendimientos reales y no pueden integrarse en las simulaciones con DSSAT. En los experimentos de campo (Terán *et al.*, 2006), solamente se tomaron los datos de suelo hasta una profundidad de 30 cm y los datos para profundidades mayores necesarios para las simulaciones fueron tomados de los estudios generales de suelos del IGAC (2000), que eventualmente podrían no coincidir con las características propias de los suelos en los que se desarrollaron los cultivos experimentales. Estas hipotéticas diferencias podrían restar precisión al modelo.

En la figura 3-26, puede verse el comportamiento de los rendimientos reales (Terán *et al.*, 2006) y los simulados por DSSAT para diferentes niveles de irrigación. En general puede afirmarse que el modelo simuló muy bien los resultados del experimento, con buenas coincidencias, principalmente para los niveles bajos de irrigación. Incluso, para una lámina de agua aproximada de 329 mm proveniente solamente de la precipitación, en condiciones de secano, las diferencias entre datos reales y simulados son menores al 5%. En estas condiciones, se puede concluir también que los recursos biofísicos fueron muy bien aprovechados, ya que los rendimientos reales fueron muy próximos a los potenciales.

A medida que aumenta la aplicación de riego, los rendimientos reales y simulados tienden a separarse un poco. Esto podría explicarse ya sea por la precisión del modelo para simular los procesos fisiológicos con una mayor cantidad de agua, donde la información de las capas a una profundidad mayor de 30 cm toma una mayor importancia o por limitaciones en el desarrollo del cultivo que disminuyen los rendimientos reales respecto de los potenciales. Para mayores cantidades de agua, el modelo tiende a estabilizar el rendimiento, indicando que después de cierta cantidad de aplicación de riego, el rendimiento ya no puede aumentar más, incluso para láminas totales de agua aproximadas a 480 mm, los rendimientos simulados tienden a ser ligeramente menores que los rendimientos calculados para 461 mm de lámina total de agua. Aunque para láminas aproximadas a los 460 mm el modelo vuelve a predecir los datos reales con gran precisión, este comportamiento no coincide con lo observado en los experimentos, que sugeriría aumentos de rendimientos al aumentar los niveles de irrigación.

3.7 Rendimiento del cultivo de papa simulado en la Sabana de Bogotá bajo escenarios de variabilidad y cambio climático

Los rendimientos simulados del cultivo de papa en las tres zonas de trabajo para cada escenario de variabilidad y cambio climático pueden observarse en las Tablas 3-19, 3-20 y 3-21, así como el promedio de rendimiento para el periodo 2005-2010 simulado en condiciones de Tibaitatá. Tablas con los valores promedio de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para dos fases dentro del periodo del cultivo, desde

la emergencia hasta el inicio de tuberización y desde el inicio de tuberización hasta la madurez fisiológica en cada año simulado puede encontrarse en el Anexo A.

Bajo todos los escenarios climáticos y para los diferentes tipos de suelo, los rendimientos de la variedad Diacol Capiro son mayores a los rendimientos de la variedad Pastusa, sin importar que el periodo del cultivo sea aproximadamente 25 días más cortó para la primera variedad. De la misma forma, los más altos rendimientos para ambas variedades se presentaron bajo las condiciones del municipio de Tenjo, siendo las características físicas y químicas de los suelos más que las condiciones climáticas el factor determinante en la obtención de altos rendimientos. Estas buenas condiciones de los suelos, principalmente relacionadas con su capacidad de almacenamiento de agua hacen que las disminuciones de rendimiento relacionadas con reducciones en la precipitación sean muchos menores en los suelos *Andisoles* característicos de este municipio. Es de destacar, que los niveles de radiación más bajos se presentan justamente en la estación G. Providencia y son aproximadamente un 30% más bajos respecto a las otras dos estaciones.

De acuerdo con lo reportado por Bonilla (2009), Terán *et al.*, (2006), Aldabe y Dogliotti (2006), AGROCADENAS(2005), Sepúlveda *et al.* (1999), Jara (1999), Kalazich (1993), Beniot y Grant (1985), y otros, el rendimiento del cultivo de papa es muy sensible a las deficiencias hídricas, principalmente cuando estas ocurren entre la emergencia y la tuberización. Este comportamiento coincide claramente con los resultados de las simulaciones, que mostraban bajo iguales condiciones de suelos, genotipos, actividades de manejo, radiación y temperaturas aumentos de hasta el 500% en los rendimientos para diferentes cantidades de lluvia o irrigación, aclarando que en las simulaciones estos rendimientos no son limitados por plagas o enfermedades frecuentes en condiciones de alta humedad.

Se presentaron mayores variaciones en los rendimientos relacionadas con alteraciones en las condiciones climáticas bajo los escenarios de variabilidad climática que bajo los escenarios de cambio climático. Particularmente las simulaciones de rendimiento para el evento el Niño del año 1992 mostraron reducciones por encima del 70% de los valores promedio bajo las condiciones de Tibaitatá y posiblemente mayores bajo las condiciones

de El Dorado. Según Carvajal *et al.* (1999), en este año fueron reportadas las mayores disminuciones en la producción de papa que alcanzaron hasta un 20% a nivel nacional. Hay que aclarar que para todas las simulaciones se usó la misma fecha de siembra, sin tener en cuenta bajo condiciones El Niño, normalmente se retrasa la primera temporada de lluvias, por lo que los productores tratan de postergar las siembras hasta contar con niveles de humedad en los suelos más adecuados, práctica que eventualmente reduce las drásticas reducciones de rendimiento.

Contrario a las otras dos estaciones, bajo las condiciones de G. Providencia, durante 1992 las simulaciones mostraron ligeros incrementos en los rendimientos, incluso por encima de los valores simulados para el evento neutro de 1993. Este incremento en los rendimientos para ambas variedades puede explicarse primero por las características favorables de los suelos, sumado a que la reducción de precipitación fue menos drástica para esta zona de la Sabana durante el periodo del cultivo y a que se presentó un ligero aumento de las temperaturas mínimas. En general las simulaciones muestran que leves aumentos de temperatura máxima o mínima no perjudican el cultivo de papa mientras se cuente con agua suficiente para su desarrollo. Por el contrario y de acuerdo con Contreras (2009), promedios de temperatura mínima bajos para esta zona por debajo de los 7°C entre la emergencia y la tuberización tienden a disminuir los rendimientos.

Los mejores rendimientos para ambas variedades se presentaron bajo la influencia de los eventos La Niña, evidenciando nuevamente que abundantes precipitaciones aumentan la productividad, suponiendo que no haya pérdidas asociadas con plagas o enfermedades propias de ambientes húmedos. En este aspecto, Terán *et al.*, (2006), reportaron aumentos en la producción de hasta el 125% en la variedad Capiro y 130% en la variedad Pastusa Unica aumentando solamente la cantidad de agua con que cuentan los cultivos. En Perú, Jeréz y Simpfendöfer (2000) informaron aumentos en los rendimientos de entre un 53,8% a un 84,4%, dependiendo de la variedad en estudio y la época del año para diferentes niveles de irrigación.

Muchas referencias apuntan a aumentos de rendimientos cuando aumentan los niveles de irrigación (Bonilla 2009; Terán *et al.*, 2006; Aldabe y Dogliotti, 2006; Román y Hurtado 2002; Sepúlveda *et al.*, 1999; Jara, 1999; Kalazich, 1993), sin embargo se debe considerar también que excesos de agua en el suelo pueden provocar un desarrollo pobre de las

raíces y la pudrición de tubérculos, ya que en un suelo saturado el agua ocupa todos los espacios porosos, generando problemas de aireación en el sistema radicular (Books 1998), sin tener en cuenta además que la alta humedad ambiental favorece el desarrollo de enfermedades. Este aspecto resulto simulado por el modelo satisfactoriamente.

Tabla 3-19: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de Tibaitatá, Mosquera

| Tibaitatá | | | |
|------------------------|---------------|----------------------|--------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Rendimiento (ton/ha) | Diferencia % |
| Promedio | 2005-2010 | 36,68 | |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 10,35 | -71,8 |
| | Neutro 1993 | 38,66 | 5,4 |
| | La Niña 2008 | 39,26 | 7,0 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 39,72 | 8,3 |
| | A2 2041-2070 | 41,99 | 14,5 |
| | A1B 2011-2040 | 32,54 | -11,3 |
| | A1B 2041-2070 | 33,37 | -9,0 |
| Variedad Pastusa | | Rendimiento (ton/ha) | Diferencia % |
| Promedio | 2005-2010 | 31,14 | |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 8,11 | -74,0 |
| | Neutro 1993 | 33,31 | 7,0 |
| | La Niña 2008 | 35,26 | 13,2 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 34,66 | 11,3 |
| | A2 2041-2070 | 36,17 | 16,2 |
| | A1B 2011-2040 | 25,49 | -18,1 |
| | A1B 2041-2070 | 25,38 | -18,5 |

En las condiciones de Tibaitatá, las simulaciones indican que el rendimiento de la variedad pastusa fue más susceptible a las deficiencias de precipitación asociadas al evento El Niño de 1992. De la misma forma, los rendimientos aumentan un poco más para esta variedad cuando hay excesos de precipitación, como en el evento La Niña del 2008. Respecto a los escenarios de cambio climático, los aumentos de precipitación y ligeros aumentos de temperatura mínima estimados bajo el escenario A2 podrían incrementar el rendimiento de ambas variedades alrededor de un 15% (Tabla 3-19), con mayores beneficios para la variedad pastusa. Bajo el escenario A1B los rendimientos

tenderían a disminuir casi un 20%, siendo en este caso la disminución en la cantidad de precipitación durante el periodo siguiente al inicio de la tuberización durante la STL responsable de estas disminuciones, más severas para la variedad pastusa.

Por otra parte, las buenas condiciones de almacenamiento y retención de humedad, así como de fertilidad de los suelos de Tenjo hacen que el cultivo sea menos vulnerable a las variaciones climáticas. Incluso, si se cuenta con una aceptable cantidad de agua, los aumentos de temperatura máxima y mínima favorecen el rendimiento del cultivo. Es por esto que los mayores aumentos de temperatura estimados por los modelos a largo plazo (2055), bajo el escenario A1B favorecen incrementos en el rendimiento (Tabla 3-20).

Tabla 3-20: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de G. Providencia en Tenjo.

| G. Providencia | | |
|------------------------|---------------|----------------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 39,64 |
| | Neutro 1993 | 37,72 |
| | La Niña 2008 | 40,07 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 38,69 |
| | A2 2041-2070 | 41,35 |
| | A1B 2011-2040 | 38,65 |
| | A1B 2041-2070 | 40,14 |
| Variedad Pastusa | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 35,28 |
| | Neutro 1993 | 33,52 |
| | La Niña 2008 | 35,98 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 34,93 |
| | A2 2041-2070 | 37,58 |
| | A1B 2011-2040 | 34,75 |
| | A1B 2041-2070 | 36,31 |

Bajo ambos escenarios, los modelos predicen menores reducciones en las precipitaciones para esta zona de la Sabana, de tal forma que el cultivo de papa allí es menos vulnerable y podría eventualmente obtener beneficios con el cambio climático así como potencialmente puede obtenerlos bajo ciertos escenarios de variabilidad climática.

Las simulaciones bajo las condiciones climáticas en los suelos *Inceptisoles* característicos de la zona de El Dorado mostraron las mayores disminuciones de rendimiento de las tres estaciones, tanto bajo escenarios de variabilidad como de cambio climático. La variedad Capiro en este caso resulto ser la más afectada por las disminuciones de precipitación, que fueron menos drásticas en esta estación que en Tibaitatá. Bajo el escenario A2 aunque no se reducen los volúmenes de precipitación de forma importante, durante el periodo de cultivo son estimados aumentos de temperatura mínima que no afectan el rendimiento de la variedad Capiro, pero si el de Pastusa. Bajo el escenario A1B, a largo plazo los aumentos de temperatura máxima y mínima, acompañados de disminuciones en la precipitación afectaran notablemente el rendimiento de la variedad Capiro, más que a la Pastusa.

Tabla 3-21: Rendimiento simulado del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad y cambio climático en condiciones de El Dorado en Bogotá

| .El Dorado | | |
|------------------------|---------------|----------------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 7,23 |
| | Neutro 1993 | 37,00 |
| | La Niña 2008 | 37,62 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 36,30 |
| | A2 2041-2070 | 37,38 |
| | A1B 2011-2040 | 17,04 |
| | A1B 2041-2070 | 26,53 |
| Variedad Pastusa | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 10,80 |
| | Neutro 1993 | 28,45 |
| | La Niña 2008 | 35,00 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 32,84 |
| | A2 2041-2070 | 29,87 |
| | A1B 2011-2040 | 16,85 |
| | A1B 2041-2070 | 22,39 |

4. Conclusiones y recomendaciones

El análisis de las condiciones climáticas de la zona de estudio por temporadas agroclimáticas permitió estudiar de manera adecuada el comportamiento de las variables climáticas a escalas intra e interanual, e identificar la asociación entre la oscilación ENOS y el comportamiento de las variables climáticas en las tres zonas de estudio.

Se encontró una asociación directa y clara entre la temperatura máxima y la temperatura media de la zona de estudio con la oscilación ENOS, una asociación inversa importante con la precipitación, mientras que la temperatura mínima y el brillo solar mostraron no estar significativamente asociados con el comportamiento del Índice Oceánico ONI.

Se pudo determinar que la mayor asociación entre el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio y la oscilación ENOS ocurre principalmente durante la primera temporada seca PTS, en menor medida durante segunda temporada lluviosa STL, mientras que durante la primera temporada de lluvia PTL la asociación desaparece.

Se observaron cambios más importantes en las condiciones climáticas de la zona de estudio asociados con la variabilidad climática que los posibles cambios estimados por los modelos de cambio climático bajo los diferentes escenarios, de tal forma que las principales amenazas sobre el cultivo de papa pueden estar asociadas a este tipo de variabilidad climática por encima de las posibles amenazas asociadas con los cambios a largo plazo proyectados mediante los modelos de cambio climático.

Aunque para la zona los modelos de cambio climático a largo plazo coinciden en disminuciones en los volúmenes de precipitación, los análisis de tendencias muestran incrementos importantes en las precipitaciones durante los últimos años que podrían mantenerse durante la próxima década. Las tendencias, en las series históricas coinciden con los escenarios de cambio climático en los aumentos de la temperatura máxima, media y mínima. Los modelos de cambio climático analizados en este trabajo coinciden en que las reducciones de precipitación serán más intensas hacia la segunda

temporada de lluvia de cada año, de tal forma que a largo plazo las siembras de segundo semestre podrían verse altamente afectadas.

Pese a sus altas exigencias de información, El modelo DSSAT puede ser usado satisfactoriamente para simular el rendimiento del cultivo de papa en condiciones de la Sabana de Bogotá.

Las condiciones climáticas de la Sabana de Bogotá son relativamente homogéneas y aun cuando las tres estaciones climáticas utilizadas en el trabajo se encuentran bastante cerca entre sí, ciertos cambios en la composición de los suelos y en el comportamiento de las variables climáticas generan diferencias importantes en la aptitud de cada zona para el desarrollo del cultivo de papa y en la vulnerabilidad del cultivo frente a amenazas de tipo climático, de tal forma que la configuración de suelos y condiciones climáticas de la zona de la estación G. Providencia, mostraron ser las más aptas y menos vulnerables para el desarrollo del cultivo de papa frente a amenazas asociadas tanto con el cambio climático como con variabilidad climática.

Las más importantes reducciones en los rendimientos simulados se observaron bajo condiciones de reducción precipitación y aumento de temperaturas máximas ocurridas bajo los eventos El Niño, teniendo en cuenta que estas reducciones fueron moduladas por las características de los suelos. Por ejemplo, con las condiciones de G. Providencia, bajo la influencia del El Niño, los rendimientos no se vieron afectados, y de hecho bajo los escenarios de cambio climático analizados en este trabajo, con buenas condiciones de suelos y prácticas de manejo adecuadas, los rendimientos podrían verse incluso beneficiados con los cambios en temperatura y precipitación.

Los mejores rendimientos fueron obtenidos en las simulaciones bajo escenarios La Niña, donde los requerimientos hídricos del cultivo fueron satisfechos totalmente, incluso con excesos en la cantidad de agua recibida por los cultivos. Hay que señalar que bajo estas condiciones de alta humedad atmosférica y de suelos, el cultivo es altamente vulnerable al ataque de enfermedades, cuyo desarrollo y daño sobre el cultivo no son incluidas por las simulaciones, por lo que estos rendimientos finales podrían verse reducidos de acuerdo con el nivel de daño de estas enfermedades sobre el cultivo.

La capacidad de almacenamiento y retención de humedad de los suelos mostró ser determinante en la respuesta de los cultivos frente a exigencias de tipo climático, ya que

el estrés hídrico por disminuciones en la precipitación, incrementa de modo sensible el riesgo de pérdida de la cosecha y la disminución de los rendimientos. En este orden de ideas los suelos *Andisoles*, de componente taxonómico *Pachic Melanudands* frecuentes en las unidades cartográficas del municipio de Tenjo, resultaron presentar las mejores condiciones para el desarrollo del cultivo de papa, tanto en condiciones actuales o pasadas de variabilidad climática como bajo escenarios de cambio climático.

En Condiciones de Tibaitatá, La variedad Pastusa mostro ser más vulnerable frente a disminuciones de precipitación que la variedad Diacol Capiro, de tal forma que esta última podría ser una alternativa más favorable frente a escenarios de estrés hídrico y altas temperaturas muy frecuentes bajo los eventos El Niño.

Según los ejercicios de modelación, los factores más determinantes en la obtención de buenos rendimientos fueron la oferta de precipitación, la aptitud de los suelos, en especial sus características físicas relacionadas con la capacidad de almacenamiento de agua, la variedad utilizada y el comportamiento de las temperaturas máxima y mínima, en especial la temperatura mínima, que pueden alterar el periodo del cultivo y de esta forma reducir los rendimientos. La fecha de siembra resulto ser muy determinante en los rendimientos, en especial cuando se presentan años con muy bajas precipitaciones, ya que las condiciones de humedad inicial del suelo y las escasas precipitaciones después de esta fecha no permiten satisfacer los requerimiento hídricos para un buen desarrollo del cultivo.

Principalmente, bajo los efectos del fenómeno El Niño que tiende a retrasar el inicio de la primer temporada de lluvia sobre la Sabana Bogotá, los rendimientos se vieron altamente afectados cuando se utilizó como fecha de siembra el 15 de marzo, mientras que retrasando algunas semanas las siembras para poder contar con las precipitaciones de abril y mayo, las reducciones en los rendimientos fueron menos graves.

Las recomendaciones generales para los productores en función de los resultados y conclusiones de las simulaciones realizadas en este trabajo son las siguientes:

- En cultivos de secano que representan el mayor porcentaje de los cultivadores de la zona, se recomienda tener en cuenta el comportamiento de las lluvias y las predicciones climáticas realizadas por instituciones como el IDEAM a mediano y largo plazo, para planificar el inicio de las siembras y seleccionar las variedades a sembrar. Si las predicciones indican por ejemplo que un fenómeno El Niño se está desarrollando en el Pacífico, la variedad Diacol Capiro puede ser una mejor opción que la variedad Pastusa. Bajo estas condiciones y en ausencia de sistemas de riego se recomienda retrasar las fechas de siembra hasta poder contar con las condiciones de humedad adecuadas. En condiciones de La Niña o Neutras, las fechas de siembra pueden ser elegidas de tal forma que la temporada de cosecha coincida con temporadas de disminución de la oferta comercial de papa ya que la producción no se verá limitada por escasez de agua y la probabilidad de ocurrencia de heladas es mucho menor y pueden obtenerse beneficios en cuanto a mejores condiciones para la comercialización.
- El suelo, considerado uno de los factores determinantes en la obtención de buenos rendimientos debe ser preservado y manejado de tal forma que sus condiciones de almacenamiento y disponibilidad de humedad para las plantas se mantenga o incluso mejore con el tiempo. En este sentido, actividades relacionadas con mantener y mejorar la estructura física, evitando la compactación y pérdida de porosidad serán indispensables para obtener buenos rendimientos y desarrollar producción de papa de una forma sostenible en el tiempo. Así mismo, actividades relacionadas con mantener la biodiversidad del suelo y evitar las pérdidas de humedad serán de gran provecho, principalmente para épocas de mayor estrés climático.
- De acuerdo con las posibilidades de los productores, cuando sean pronosticadas condiciones El Niño, realizar una selección de los lotes y zonas para producción de acuerdo con características climáticas, las posibilidades de riego o con las características hidrofísicas de los suelos podrá resultar de gran beneficio, al reducir la vulnerabilidad del cultivo frente al estrés asociado con disminución en la oferta hídrica.

- A mediano y largo plazo y de acuerdo con los resultados de las investigaciones, identificar las zonas donde las amenazas de eventos extremos como sequías y heladas sea menor, así como aquellas zonas donde las tendencias de cambio en las condiciones climáticas indiquen condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo permitirá enfocar la producción hacia estas zonas para poder conseguir mejores rendimientos y sistemas de producción sostenibles menos vulnerables.

- Aunque los modelos de cambio climático coinciden a largo plazo en disminuciones en los volúmenes de precipitación para la Sabana de Bogotá, los análisis de tendencias muestran incrementos importantes en las precipitaciones durante los últimos años que ya están afectado el desarrollo de muchos cultivos, entre ellos la papa, pues los excesos de precipitación, los encharcamientos, inundaciones, las tormentas y disminuciones en la cantidad de radiación entre otros fenómenos asociados con el exceso de lluvias pueden inferir sustancialmente en la sostenibilidad de los productores, por ello la transferencia de tecnologías y conocimientos para el manejo de estas amenazas se hace indispensable, de tal forma que enfocarse solamente en el manejo de la escasez del agua, sin pensar en sistemas de drenaje, protección de suelos por erosión hídrica y lavado de suelos, manejo de hongos, plagas y enfermedades asociadas con excesos de humedad que afectan el cultivo puede resultar peligroso o contraproducente para la sostenibilidad del sector productor de papa.

Los diferentes estudios señalan como factor determinante en la productividad la disponibilidad de agua para el cultivo y por ello, una estrategia que tienda a incrementar la disponibilidad y efectividad de sistemas de riego es determinante en la competitividad del sector. Teniendo en cuenta, que los sistemas de riego por aspersión no son los más recomendados para el cultivo de papa, pues aumentarían la vulnerabilidad del cultivo frente al ataque de enfermedades.

Sin restar importancia a la necesidad de investigación para producir variedades de alta productividad, más tolerantes a las principales plagas y enfermedades y al estrés climático y eficientes en la utilización de los nutrientes disponibles cuyo resultado es costoso y de mediano a largo plazo, es indispensable una adecuada labor de transferencia de tecnología que permita a una importante cantidad de productores

acceder a los resultados de la investigación y adoptar prácticas agronómicas que mejoren la productividad, enriqueciendo sus conocimientos acerca de su cultivos, sus suelos, el clima de su región y la potencialidad sus sistemas de producción.

A. Anexo: Rendimientos y valores medios climáticos

Tabla 4-1: Valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2), y rendimiento simulado de la variedad Diacol Capiro durante el periodo 2005 - 2010 en condiciones de Tibaitatá.

| TIBAITATA | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) |
|------------------------|----------|-----------|--------|-----------|--------|--------------------|--------|----------------------|
| Variedad Diacol Capiro | | fase 1 | fase 2 | fase 1 | fase 2 | fase 1 | fase 2 | |
| ACTUALES | 2005 | 20,6 | 20,0 | 9,1 | 7,6 | 47 | 191 | 34,37 |
| | 2006 | 19,6 | 19,7 | 9,0 | 8,6 | 62 | 239 | 39,39 |
| | 2007 | 20,3 | 19,4 | 8,3 | 7,7 | 115 | 202 | 39,53 |
| | 2008 | 19,4 | 19,0 | 8,1 | 7,9 | 100 | 305 | 39,26 |
| | 2009 | 20,0 | 19,9 | 8,7 | 7,3 | 92 | 113 | 26,70 |
| | 2010 | 20,8 | 19,6 | 8,2 | 8,5 | 113 | 438 | 40,80 |
| | PROMEDIO | 20,1 | 19,6 | 8,6 | 7,9 | | | 36,68 |

Tabla 4-3: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones de Tibaitatá.

| Tibaitatá | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-----------|------|-----------|-----|--------------------|-----|----------------------|--------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) | Diferencia % |
| Promedio | 2005-2010 | | | | | | | 36,68 | |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,3 | 19,3 | 7,8 | 6,5 | 25 | 35 | 10,35 | -71,8 |
| | Neutro 1993 | 18,8 | 18,9 | 9,3 | 9,7 | 100 | 206 | 38,66 | 5,4 |
| | La Niña 2008 | 19,4 | 19,0 | 8,1 | 7,9 | 100 | 305 | 39,26 | 7,0 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 18,9 | 19,1 | 9,2 | 8,1 | 117 | 177 | 39,72 | 8,3 |
| | A2 2041-2070 | 19,2 | 19,2 | 9,2 | 9,5 | 100 | 206 | 41,99 | 14,5 |
| | A1B 2011-2040 | 19,4 | 19,3 | 7,8 | 7,3 | 44 | 142 | 32,54 | -11,3 |
| | A1B 2041-2070 | 19,4 | 19,7 | 8,4 | 8,0 | 31 | 150 | 33,37 | -9,0 |
| Tibaitatá | | | | | | | | | |
| Variedad Pastusa | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) | Diferencia % |
| Promedio | 2005-2010 | | | | | | | 31,14 | |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,3 | 19,2 | 8,1 | 6,5 | 24 | 41 | 8,11 | -74,0 |
| | Neutro 1993 | 18,8 | 19,0 | 9,3 | 7,4 | 84 | 240 | 33,31 | 7,0 |
| | La Niña 2008 | 19,3 | 19,0 | 8,2 | 7,8 | 100 | 348 | 35,26 | 13,2 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 19,0 | 19,1 | 9,1 | 8,1 | 106 | 215 | 34,66 | 11,3 |
| | A2 2041-2070 | 19,1 | 19,2 | 9,2 | 9,6 | 84 | 240 | 36,17 | 16,2 |
| | A1B 2011-2040 | 19,4 | 19,4 | 7,8 | 7,2 | 34 | 190 | 25,49 | -18,1 |
| | A1B 2041-2070 | 19,4 | 19,7 | 8,3 | 8,2 | 31 | 161 | 25,38 | -18,5 |

Tabla 4-4: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones de G. Providencia.

| G. Providencia | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-----------|------|-----------|-----|--------------------|------|----------------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,6 | 18,9 | 9,0 | 8,4 | 26 | 157 | 39,64 |
| | Neutro 1993 | 18,8 | 18,8 | 9,2 | 7,3 | 102 | 192 | 37,72 |
| | La Niña 2008 | 19,6 | 19,1 | 8,2 | 8,0 | 114 | 336 | 40,07 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 19,1 | 19,3 | 8,6 | 7,1 | 102 | 192 | 38,69 |
| | A2 2041-2070 | 19,5 | 19,4 | 9,5 | 8,7 | 44 | 317 | 41,35 |
| | A1B 2011-2040 | 19,1 | 19,4 | 8,1 | 7,1 | 36 | 166 | 38,65 |
| | A1B 2041-2070 | 19,8 | 19,3 | 8,7 | 8,0 | 70 | 175 | 40,14 |
| Variedad Pastusa | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,6 | 19,0 | 9,3 | 8,0 | 19 | 190 | 35,28 |
| | Neutro 1993 | 18,7 | 18,9 | 9,2 | 7,0 | 96 | 224 | 33,52 |
| | La Niña 2008 | 19,5 | 19,1 | 8,1 | 8,2 | 114 | 4233 | 35,98 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 19,1 | 19,4 | 8,5 | 7,3 | 96 | 225 | 34,93 |
| | A2 2041-2070 | 19,6 | 19,4 | 9,5 | 8,9 | 41 | 340 | 37,58 |
| | A1B 2011-2040 | 19,2 | 19,5 | 7,9 | 7,1 | 35 | 204 | 34,75 |
| | A1B 2041-2070 | 19,7 | 19,4 | 8,9 | 9,1 | 69 | 203 | 36,31 |

Tabla 4-5: Rendimientos simulados de las variedades Diacol Capiro y Pastusa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, y valores medios de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación para dos periodos dentro del ciclo del cultivo, desde la emergencia al inicio de tuberización (fase 1) y desde el inicio de la tuberización hasta la madurez fisiológica (fase 2) en condiciones El Dorado.

| El Dorado | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-----------|------|-----------|-----|--------------------|-----|----------------------|
| Variedad Diacol Capiro | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,7 | 19,3 | 9,2 | 8,0 | 17 | 88 | 7,23 |
| | Neutro 1993 | 19,2 | 19,2 | 10,1 | 8,6 | 105 | 205 | 37,00 |
| | La Niña 2008 | 18,4 | 17,9 | 8,8 | 8,9 | 106 | 444 | 37,62 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 19,3 | 19,4 | 10,7 | 9,9 | 81 | 231 | 36,30 |
| | A2 2041-2070 | 19,0 | 19,4 | 10,1 | 9,9 | 67 | 254 | 37,38 |
| | A1B 2011-2040 | 19,1 | 19,3 | 8,6 | 8,0 | 19 | 149 | 17,04 |
| | A1B 2041-2070 | 19,5 | 19,7 | 9,3 | 9,3 | 34 | 152 | 26,53 |
| El Dorado | | | | | | | | |
| Variedad Pastusa | | Tmax (°C) | | Tmin (°C) | | Precipitación (mm) | | Rendimiento (ton/ha) |
| Variabilidad Climática | El Niño 1992 | 20,8 | 19,4 | 9,1 | 7,9 | 15 | 112 | 10,80 |
| | Neutro 1993 | 19,2 | 19,2 | 10,2 | 8,4 | 84 | 254 | 28,45 |
| | La Niña 2008 | 18,2 | 17,9 | 8,8 | 8,8 | 105 | 515 | 35,00 |
| Cambio Climático | A2 2011-2040 | 19,3 | 19,4 | 10,9 | 9,8 | 79 | 234 | 32,84 |
| | A2 2041-2070 | 18,9 | 19,5 | 10,3 | 9,7 | 68 | 274 | 29,87 |
| | A1B 2011-2040 | 19,1 | 19,4 | 8,6 | 7,9 | 19 | 219 | 16,85 |
| | A1B 2041-2070 | 19,6 | 19,7 | 9,3 | 9,2 | 33 | 190 | 22,39 |

Bibliografía

Abdrabbo, M., et al. 2010. Sensitivity of Potato Yield to Climate Change. *Journal of Applied Sciences Research*, 6(6): 751-755.

AGROCADENAS. 2005. Observatorio Agrocadenas Colombia. Cadena de la papa en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. [Online] Enero 2010 http://www.agrocadenas.gov.co/papa/documentos/caracterizacion_papa.pdf.

AGROCADENAS. 2004. Observatorio Agrocadenas Colombia. Documento de trabajo no. 40. Costos de producción de papa en Colombia. [Online] Julio 2010 <http://www.agrocadenas.gov.co>.

Aldabe, L. y Dogliotti, S. 2006. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa. *Revista Latinoamericana de la Papa*. (1995). 7/8:86-93.

Allison, L. 1965. Organic carbon. *Methods of soil analysis. Series Agronomy Part 2*. A.S.A. Madison, Wisconsin. 1965. p. 1367-1378.

Alpi, A. y Tognoni, F. 1991. *Cultivo en invernadero*. 3ra edición Bologna Italia. Edizioni Agricole 353 p. .

Arse, F. 1996. *Cultivo de la patata*. Madrid, España. Ediciones Mundiprensa. 272 p.

Banco de la Republica. 2006. El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia. *Reportes del Emisor, Investigación e Información Económica*. Bogotá, D. C., enero de 2007 - Núm. 92.

Bates, C., et al. 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Genova, pp210.

Beniot, G. y Grant, W. 1985. Excess and deficient water stress effect on 30 years of aroostook country potatoes yields. *American Potato Journal*. 62(2): 49 – 55.

Blake, G. 1965. Bulk density. Methods of Soil Analysis. Series Agronomy, Part 1. A.S.A. Madison, Wisconsin. p. 374-390.

Bonilla, N. 2009. Evaluación y selección agronómica de cuarenta genotipos de papa *Solanum Tuberosum L.* para tolerancia a estrés hídrico en tres localidades de la provincia de Chimborazo. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de recursos naturales, Riobamba Ecuador 2009.

Books, J. 1998. Biblioteca de la Agricultura, segunda Edición. Barcelona España, pp 50-51.

Boshell, F. 2009. Condiciones climáticas generales de las zonas productoras de flores en Colombia. Serie: Manejo del riesgo climático en la floricultura colombiana. CENIFLORES, Bogotá. 97 p.

Bowen, W., y Jaramillo R. 1997. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. VII Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador 1977. [Online]: [http: Enero de 2010. http://www.tradeoffs.montana.edu/pdf/e-Bowen-Jaramillo.pdf](http://www.tradeoffs.montana.edu/pdf/e-Bowen-Jaramillo.pdf).

Bowen, W., et al. 2001. La simulación del crecimiento de papa en los andes. Artículo presentado en el IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en los Andes: La Estrategia Andina para el Siglo XXI, 26-30 Noviembre 2001, Mérida, Venezuela.

Cabildo Tenerife. 2009. Polilla Guatemalteca de la Papa, Identificación y Control. [Online] http://www.agrocabildo.com/publica/Publicaciones/papa_215_D_Polilla2009.pdf Febrero 2009

CAF.2006. Corporación Andina de Fomento. Memorias del Fenómeno El Niño 1997-1998. Retos y Propuestas para la Región Andina. [Online] Noviembre 2010 <http://www.caf.com/view/index.asp?ms=17&pageMs=40414>.

Carrizosa, J. 2007. La Sabana de Bogotá y los ecosistemas relacionados en el 2007. [Online] Junio 2010. <http://www.fescol.org.co/DocPdf/EV.FNASabanaBogotaEcosistemasRelacionados.pdf>.

Carter, T., et al. 1996. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. *Agr Food Sci Finland* 5:329-350.

Carvajal, Y., et al. 1999. Efectos ecológicos del fenómeno ENOS en Colombia. *Revista Peruana de Biología*. Volumen extraordinario: 152-159(1999).

CCI. 2010. Corporación Colombia Internacional. El Fenómeno Cálido del Pacífico. [Online] Junio de 2011. http://www.cci.org.co/publicaciones/1_Oct-16-09%20Fenomeno%20del%20ni%F1o.pdf.

CENTA. 2002. Centro Nacional de tecnología Agropecuaria y Forestal .Guía técnica cultivo de la papa. [Online] Diciembre de 2009. <http://www.centa.gob.sv/documentos/guias/papa.pdf>.

CEVIPAPA. 2004. Centro virtual de investigación de la cadena agroalimentaria de la papa. [Online] Marzo de 2008. <http://www.cevipapa.org.co>.

Chaparro, A. 2008. Seminario: Avances y estrategias para el desarrollo de variedades transgénicas de papa (*Solanum tuberosum* sb. *Andígena*) y papa criolla (*Solanum phureja*) en Colombia. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.

CIP. 2010. Centro Internacional de la Papa. Manejo Integrado del tizón tardío; hoja divulgativa N° 1. [Online] Febrero de 2010 <http://www.cipotato.org/publications/pdf/003857.pdf>.

CIP. 2001. Centro Internacional de la Papa. Reporte anual 2001. [Online]Febrero de 2010 http://www.cipotato.org/publications/annual_reports/2001/08.asp.

Claudio, O., et al. 1992. A method for estimating and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crop:part 1- modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural systems.*, pp: 225-238.

CONFECAMPO. 2008. Confederación Empresarial del Campo de Colombia. Análisis del mercado de la papa en Colombia 2008. [Online] Mayo de 2010.<http://www.confecampo.com/estadísticas/papa.ppt>.

Comunidad Andina. 2009. El Niño y La Niña por encima de la tierra. [Online] febrero de 2010. http://www.comunidadandina.org/public/Atlas_13_El_Nino_y_La_Nina.pdf.

Contreras, M. 2009. Ecofisiología del rendimiento de la planta de papa. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile. [Online] Diciembre de 2010. <http://www.argenpapa.com.ar/default.asp?id=679>.

Conde, C.2009. El Niño, La Niña y La Oscilación del Sur. Universidad Nacional Autónoma de México. Boletín ENSO 2009. [Online] Enero de 2009 http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/boletin/Boletin_ENSO09.pdf.

Cortés, A. et al. 2005. Análisis geoestadístico de la variabilidad temporal, a una escala anual y mensual, de parámetros climáticos en un campo experimental, estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Tropical* 55(3): 327-342.

Cortés, J., et al. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) Microplus* en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). *CORPOICA, Ciencia y tecnología Agropecuaria* 11(1), 73-84.

CORPOICA. 2010. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Preguntas frecuentes sobre el cultivo de la papa. [Online]http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/libreria/verlibro.asp?id_libro=9

CORPOICA. 2008. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Estudio técnico para la propuesta de declaratoria como área protegida del predio Tibaitatá. Mosquera, Colombia.

Cottingham, I. y Waltman, W. 2004. Demonstration of the National Agricultural Decision Support System. *Computer Science and Engineering*. University of Nebraska–Lincoln Lincoln, NE 66588-0115. [Online] Diciembre de 2008. <http://www.icotting@cse.unl.edu>.

CPC. 2011. Climate Prediction Center NOAA. ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions. [Online] Junio 2010. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.

Cuesta, P. 2005. Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones caribe y valles interandinos. Mosquera, Cundinamarca Colombia. Ed: CORPOICA. pags. 97.

DANE. 2002. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Primer Censo Nacional del cultivo de la papa. [Online] Diciembre de 2009. http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/ena/papa_censo_cundinamarca.pdf.

Decker, W. 1994. Developments in agricultural meteorology as a guide to its potential for the twenty-first century. *Agricultural and Forest Meteorology* 69: 9-25.

De La Casa, A.; Ovando, G y Rodríguez, A 2003. Estimación de la radiación solar Global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. Universidad Nacional de Córdoba.

Domínguez, A. 1989. Tubérculos y raíces: Tratado de fertilización. Segunda edición. Ediciones Mundiprensa Madrid, España.. 601 p.

Duchaufour, P. 1984. Edafología 1. Edafogénesis y clasificación. Barcelona, Masson. 1984. p 27-65.

Duffie, J. y Beckman, W. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley and Sons, New York. pp. 1-109.

EPA. 2010. Environmental Protection Agency. Climate change indicators in the United States. [Online] Enero 2011. http://www.epa.gov/climatechange/indicators/pdfs/ClimateIndicators_full.pdf.

Enfield, D. et al. 2006. How are large western hemisphere warm pools formed?. *Progress in Oceanography* 70 (2006) 346-365.

Environmental Ingenieros consultores. 1999. Plan de ordenamiento territorial Municipio de Tenjo. [Online] Diciembre 2009. <http://www.car.gov.co>.

Easterling D., et al. 2000. Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 81(3), 417-425.

Evans, D. 1978. *Boophilus Microplus* Ecological Studies and a Tick Fauna Synopsis Related to the Developing Cattle Industry in the Latin American and

Caribbean Region. Ph.D Thesis. Cnaa/nE London Polytechnic (now Life Science Department, University of East London), United Kingdom, 283 p.

FAO. 2008. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Año Internacional de la Papa. [Online] Julio de 2010. <http://www.potato2008.org>.

FAO. 2006. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56. Evapotranspiración del Cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma 2006.

Fairlie, T. y Ortega, A. 1995. Efecto de la presencia de heladas simuladas en diferentes estados fenológicos y su impacto en el rendimiento de la papa cv *Compis*: Estudio preliminar. Revista Latinoamericana de la Papa. 1995. 7/8(1):86-93.

Faiguenbaum, H. 1987. Producción de cultivos en Chile, Papa. Publicitaria Torre Lodones. Santiago, Chile 332 p.

FEDEPAPA. 2004. Federación Nacional de Cultivadores de Papa. Guía Ambiental del Cultivo de papa. [Online]. Diciembre de 2009. http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Guías%20.pdf.

Fernández M. 2009. Efecto del fenómeno El Niño en el agrosistema de papa y sus impactos socioeconómicos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para el periodo de 1976-2006. Tesis de Grado. Facultad de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

FINAGRO. 2007. Fondo de Financiamiento del Sector Agropecuario. [Online] Marzo de 2010. <http://www.finagro.com.co/html/cache/gallery/GC-8/G-11/papa.pdf>.

FONADE., Et al. 2002. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo. Manual agronómico, fitosanitario y ambiental del cultivo de la papa. Manual de capacitación. Bogotá, D.C.

Forero, D. y Garzón, E. 2000. Validación del modelo de simulación de crecimiento Substor-potato v. 35" para cuatro variedades mejoradas de papa (*Solanum tuberosum* ssp. *Andígena*) bajo condiciones de cultivo comercial. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Fundación Biodiversidad. 2009. Generación de escenarios locales de cambio climático en parques nacionales para evaluación de impactos. [Online] Septiembre de 2010. <http://www.fundacion-biodiversidad.es/cambio-climatico/proyectos-cambio/> buscador - cambio/103375.

Gawander, J. 2007. Las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de caña de azúcar en Fiji. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial OMM 56(1):34-39.

Gobernación de Antioquia. 2009. Enfermedades del cultivo de la papa. [Online]Febrero de 2009. <http://www.gobant.gov.co/organismos/agricultura/papa>.

Grimm, A. y Ambrizzi, T., 2002. Climate variability in interdecadal, interannual and intraseasonal time scales: impacts and mechanisms. Program for the study of regional climate variability, their prediction and impacts, in the Mercosur area.[Online] Mayo de 2010http://prosur.fcen.uba.ar/documentos/_2002ClimateVariabilityGroup.pdf.

Guardrian, J. 1977. Crop Micrometeorology: A Simulation Study. Wageningen, Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

Harpal S. y Graeme J. 2004. Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture, The Haworth Press, Binghamton, NY ISBN 1-56022-972-1 p. 364.

Hijmans, R. 2003. The Effect of climate change on global potato production.American Journal of Potato Research.[Online] Febrero 2011 http://findarticles.com/p/articles/mi_qa4069/is_200307/ai_n9246054.

Hoogenboom, G.2003.Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0.Volume 1: Overview. International Consortium for Agricultural Systems Applications University of Hawaii.

ICASA.2010. ConsorcioInternacional para Aplicaciones en Sistemas de Agricultura. [Online] Diciembre de 2008. <http://www.icasa.net/dssat/>

IDEAM. 2010a. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota técnica del IDEAM mayo de 2010. Bogotá, Colombia.

IDEAM. 2010b. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Nota técnica del IDEAM, diciembre de 2010. Bogotá, Colombia.

IDEAM. 2010c. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. Nota técnica del IDEAM diciembre de 2010.

IDEAM. 2009. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia Evidencias de cambio climático para Boyacá y Cundinamarca mediante el análisis de tendencias de la precipitación y la temperatura usando el Rclimdex. Nota técnica del IDEAM diciembre de 2009. Bogotá, Colombia.

IDEAM 2008. Instituto de Estudios Ambientales, Hidrología y Meteorología Las Heladas en Colombia. Nota técnica del IDEAM2008. Bogotá, Colombia.

IDEAM 2005. Instituto de Estudios Ambientales, Hidrología y Meteorología. Atlas de Radiación solar en Colombia. Bogotá, Colombia 2005.

IDEAM 2001. Instituto de Estudios Ambientales, Hidrología y Meteorología. Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá, Colombia 2001

Iglesias, E. 2006. Use of DSSAT models for climate change impact assessment: Calibration and validation of CERES-Wheat and CERES Maize in Spain. Universidad Politécnica de Madrid.

IGAC. 2000. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudio general de Zonificación y clasificación de tierras. Bogotá, Colombia.

IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC.2001. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2001. Contribución del Grupo de trabajo II al tercer Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, United Kingdom, 2001.

Jara, J. 1999. Relaciones agua, planta, producción. En: XI^{as} Jornadas de Extensión Agrícola. (21 – 22 de octubre, 1999, Temuco, Chile). Avances en Tecnología de Riego y Mecanización. (Temuco, Chile). Universidad Católica de Temuco. pp 30 – 34.

Jarrold, R., et al. 2010. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. Proceedings of the National Academy of Sciences. University of California

Jeréz, J, y Simpfendöfer, C. (2000). Efecto del riego en el cultivo de papa. Especial riego y drenaje. INIA (34). 36-39p.

Jones, P., et al.2001. The Evolution of climate over the last millennium. Science, 292, 662-667.

Jones, P. 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. Global Environmental Change 13:51-59.

Jones, P.,et al. 2002. MarkSim. Centro Internacional de Agricultura TropicalCIAT.Cali, Colombia.

Jones, P. y Jones, A. 2002.MarkSim: A computer tool that generates simulated weather data for crop modeling and risk assessment version 1. Publicado por El Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia.

Kalazich, J. 1993. Nuevas variedades de papa, objetivos, aptitudes y usos. En: 5º Jornada de extensión Agrícola. “Manejo Agronómico del Cultivo de Papa y las perspectivas de mercado”. Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.

Kiladis, G. y Díaz, H. 1989. Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. J. Climate 2: 1.069-1.090.

Kooman, P., *et al.*, 1996. . Effect of climate on different potato genotypes: 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy* 5, 193-205

Kühne, M. 2007. The Andean potato *weevil* *Premnotrypes suturicallus*: Ecology and interactions with the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. Göttingen, Faculty of Agricultural Sciences, Department of Agroentomology, University of Göttingen, 177 p.

Magaña, V., 2003. Impact of El Niño on precipitación in Mexico”, *Geofísica Internacional*, 42: 313-330

McElwain, L. y Sweeney, J. 2003. Climate change in Ireland. Recent trends in temperature and precipitation. Department of Geography, National University of Ireland. [Online] Abril de 2010. <http://www.ucd.ie/gsi/pdf/36-2/climate.pdf>.

Maderey, L. 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Serie de textos Universitarios Núm. 1.

Manrique, A., *et al.* 1990. Genetics variables for potato. *American Potato Journal*. 67: 669-681.

Medany, M. 2006. Assessment of the impact of climate change on adaptation on potato production. Agricultural Research Center. Final Report 2006. [Online] Enero 2011. http://www.iberolab.org/opencms/export/sites/Aggridema/Documentos/Egypt_Medany.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2005. La cadena de la papa en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Documento de trabajo N° 100. Bogotá, Colombia 2006.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 1991. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. [Online] Diciembre de 2010 www.infoagro.go.cr/Progrnacionales/RaicesyTuber/colocasia.pdf.

Miranda, G. 1997. La influencia del fenómeno El Niño y del índice de oscilación del sur en las precipitaciones de Cochabamba, Bolivia. Centro de Análisis Espacial-Instituto de Ecología, La Paz-Bolivia.

Montaldo, A. 1984. Cultivo y mejoramiento de la papa. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. San José de Costa Rica 1984.

Morales, M. 1994. El mercadeo de la papa en la plaza mayorista de Corabastos, Bogotá. Revista de la Papa No.11. p. 29 -30.

NASA. 2011. National Aeronautics and Space Administration. Earth Observatory. [Online] enero de 2011. <http://earthobservatory.nasa.gov/>.

Naumann G, et al. 2007. Análisis de la Variabilidad intraestacional de la temperatura en Sudamérica y su relación con la oscilación de Madden-Julian. [Online] Enero de 2010. <http://www.ommac.org/memoria2007/document/extendido/ext07063.pdf>.

Nicholls, N. 1996. Observed climate variability and change. Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Cambridge University Press, 135–192.

NOAA. 2003. National Oceanic and Atmospheric Administration. Monthly atmospheric and SST indices. [Online] Noviembre de 2010 <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>

Ochoa, C. 1999. Las papas de Sudamérica: Perú. Centro Internacional de la papa CIP. Lima 1999.

Olarte. S., et al. 2000. Validación del modelo de simulación Substor del programa DSSAT 3.5 en dos variedades nativas de papa *Solanum tuberosum* ssp. *Andígena* variedad Tuquerreña y *Solanum phureja* variedad yema de huevo. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Facultad de Agronomía

Pabón, J. y Montealegre, E. 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo “El Niño”-“La Niña”-Oscilación del Sur. s.l. : Revista Meteorología Colombiana, 2000. Vol. 2, pags. 7-21.

Pabon, D. y Torres, G. 2007. Impacto socioeconómico de los fenómenos El Niño y La Niña en la Sabana de Bogotá durante el siglo XX. Cuadernos de geografía 16, 2007. issn: 0121-215x. Bogotá, Colombia. pp. 81-94.

Pabón, D. 2005. Elaboración de escenarios de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones del territorio colombiano y de un informe de evaluación del cambio climático en Colombia que incluya entre otros las tendencias

actuales y futuras y los posibles impactos del cambio climático en los sectores socioeconómicos y regiones del país. Proyecto INAP. Bogotá, Colombia.

Peña, A., et al. 2010. Análisis de tendencias para determinar amenazas relacionadas con el cambio del clima en zonas agrícolas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá. In press.

Pérez, R., et al. 2009. Método de cría en laboratorio del gusano blanco de la papa *Premnotrypes vorax* (Coleoptera: Curculionidae). Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria (2009) 10(1), 16-23.

Porras, P. 2010. Comunicación Personal, mensaje de correo electrónico al autor. 30 de agosto de 2010.

Porras, P. 2005. Problemática general del sistema productivo de papa con énfasis en fisiología y manejo de suelos. En: Memorias. I Taller Nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. Bogotá, Colombia.

Pusey, P. 1997. Crabapple blossoms as model for research on biological control of fire blight. *Phytopathology* 87: 1096-1102.

Quispe C., et al. 2009. Índice basado en presiones atmosféricas para la detección de efectos de El Niño y la Oscilación del Sur frente a la costa peruana. *Revista Peru Biología*. 15(2): 137- 140 (Febrero 2010).

Quereda, S. 2005. Curso de Climatología General. Publicaciones de la Universidad Jaume. Castellón de la Plana, España.

Reddy, K. y Hodges, H. 2007. Climate Change and global crop productivity: an Overview. Department of Plants and Soil Sciences, Mississippi State University. Cabi Publishing, Mississippi State USA.

Retana J., 2000. Posibles efectos de la fase cálida de El Niño Oscilación del sur en la agricultura de Costa Rica. [Online] Enero de 2010. <http://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc12652/doc12652-contenido.pdf>.

Rietveld, M. 1977. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology* 19:243 525.

Rojas, E., et al. 2011. Análisis cuantitativo y espacialización de tendencias de temperatura y precipitación en el Altiplano Cundiboyacense, Colombia. En impresión.

Román-Paoli E., et al. 2000. Comparing genetic coefficients estimation methods using the CERES-Maize model. *Agric. Sys.* 65:29-47.

Ritche, J., et al. 1986. CERES, Maize: A Simulation Model for Maize Growth and Development. Temple, TX: Texas A&M University Press.

Ritchie, J. 1998. Soil water balance and plant water stress. In *Understanding options of agricultural production*, eds. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers and International Consortium for Agricultural Systems Applications. 41-53.

Ritchie, J., et al. 1995. SUBSTOR: Functional model of potato growth, development, and yield. In *Modelling and Parameterization of the Soil-Plant-Atmosphere System: A Comparison of Potato Growth Models*, 401-434. P.

Rodríguez, N., et al 2010. Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. 80 p.

Román, M. y Hurtado, G. 2002. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. Cultivo de la papa. [Online] Noviembre de 2009 <http://redepapa.org/roman.pdf>

Rosenzweig, C., et al. 1996. Potential impacts of climate change on citrus and potato production in the US. *AgrSyst* 52(4): 455-479.

Rutllant, 2004. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997- 1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. Universidad de Chile. 2004

Salazar, C. y Betancourt, C. 2009. Evaluación de extractos de plantas para el manejo de polilla guatemalteca (*Tecia solanivora*) en cultivos de papa en Nariño. *Agronomía Colombiana* 27(2), 219-226, 2009.

Salmi, T., et al. 2002. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. Finnish Meteorological Institute. Publications on Air Quality No. 31. Helsinki.

Sánchez, J. 1997. El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el velo de polvo volcánico (VPV) [1500-2050]: análisis (1500-1994) y pronóstico (1994-2050). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [Online] Diciembre de 2009. <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/enso/sanchez.html>.

Sarmiento, L. y Bowen, W. 2002. Desarrollo de una variedad de papa andígena en los andes venezolanos y su simulación por el modelo SUBSTOR. Sociedad Venezolana de Ecología. *Ecotropicos* 15(1):111-122 2002.

Sepúlveda, P., et al. 1999. Efecto de diferentes niveles de humedad en el suelo sobre el desarrollo del carbón de la papa (*Angiosorusolani*) en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum*) bajo condiciones de invernadero. *Agricultura Técnica*. 60(4):313 – 319.

Sierra, C. 1993. Fertilización del cultivo de la papa. Manejo Agronómico del Cultivo de la Papa y las Perspectivas de Mercado. Universidad Católica de Temuco. pp. 21 24.

Simbaqueva 2003. Estimación de la radiación solar para Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Stepanek, P. 2007. AnClim - Software for time series analysis (for Windows). Dept. of Geography, Fac. of Natural Sciences, Masaryk University, Brno. 1.47 MB.

Storch, H. y Zwiers, F. 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge. 484pp.

Terán, A., et al. 2006. Determinación de los requerimientos hídricos para la producción de dos variedades de papa industrial en la Sabana de occidente de Bogotá. Corporación Colombiana De Investigación Agropecuaria CORPOICA. Informe final de Proyecto Centro de investigación Tibaitatá, Mosquera Colombia

Travasso, M., et al. 1996. Yield prediction using the SUBSTOR-potato model under Argentinian conditions. *Potato research* (39) 305-312.

UNFCCC. 2003. United Nations Framework Convention on Climate Change. Carpeta de información sobre cambio climático. [Online] Diciembre 2010. http://unfccc.int/files/Essential_background/application/pdf/infokit_es.pdf.

Yunling, H. y Zhang, Z. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China Yiping Mountain Research and Development Vol 25 No 4 Nov 2005: 341–348.

Wang, W., et al. 1990. Urban Heat Islands in China. Geophysical Research letters, vol 17, Numero 12, pag 2377-2380.

Wilks, D. 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Academic Press. United States of America.

Zapata, C. 2004. Química de los procesos pedogeneticos. Universidad nacional de Colombia. Sede Medellín. Medellín, Colombia.

