

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CRECIMIENTO Y
PRODUCTIVIDAD DE *Pinus radiata* EN CHILE. ANÁLISIS UTILIZANDO
MODELOS 3-PG Y PRECIS**

CARLA RIVEROS PÉREZ

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CRECIMIENTO Y
PRODUCTIVIDAD DE *Pinus radiata* EN CHILE. ANÁLISIS UTILIZANDO
MODELOS 3-PG Y PRECIS**

**EFFECT OF CLIMATE CHANGE IN THE PRODUCTIVITY AND GROWTH OF
Pinus radiata IN CHILE. ANALISYS USING MODELS 3-PG AND PRECIS.**

CARLA RIVEROS PÉREZ

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CRECIMIENTO Y
PRODUCTIVIDAD DE *Pinus radiata* EN CHILE. ANÁLISIS UTILIZANDO
MODELOS 3-PG Y PRECIS**

Memoria para optar al título profesional de
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

Carla Riveros Pérez

Profesor Guía	Calificaciones
Maisa Rojas C. Físico, PhD	7.0
Profesores Evaluadores	
Fernando Santibáñez Q. Ingeniero Agrónomo, PhD	6.5
Alejandro León S. Ingeniero Agrónomo, PhD	6.5
Colaboradores	
Pablo Marquet I. Biólogo, PhD	
Gonzalo Carrasco R. Ingeniero Forestal	

Santiago, Chile

2010

AGRADECIMIENTOS

Antes de agradecer a la gente que se vinculó de alguna u otra forma con esta memoria debiera contextualizar su génesis. Al egresar de la carrera me ví expuesta a una decisión personal, al qué hacer con mi futuro y al hecho de acabar un proceso de cinco años que venía recorriendo. Sería mentira el decir que la respuesta fue clara e inmediata, sino que fue un trabajo de pequeños pasos el ir buscando áreas de interés y lugares donde desarrollarlos. Debo acotar que la situación de inercia puede volverse muy cómoda y por ende, el trabajo de orientarse se hace mucho más difícil y requiere mayor voluntad. Finalmente, me presentaron un tema que me satisfacía, que cumplía ciertos requisitos que busqué, pero esto no hizo más fácil su realización.

Creo que el mayor obstáculo que me encontré en el camino fuí yo misma, mi falta de motivación personal al caer en la inercia y mi necesidad de ver resultados a la brevedad. Pero es en este punto donde parten mis agradecimientos, porque a la gente que quiero agradecer no participó directamente en la memoria, pero si me motivó, presionó y hasta exigió para que yo terminara lo que empecé. En primer lugar a mi familia que me entregó todas las herramientas durante mi vida para aprender y alcanzar las metas puestas. A mi mamá, Erika, en particular le agradezco todas las conversaciones sobre la vida, sobre las personas, sus enseñanzas infinitas de cómo desenvolverme con los demás. A mi padre, Leonel, le agradezco el sentido de honestidad y de rectitud que me inculcó además de la necesidad de pensar y razonar las cosas, con simples juegos de destreza mental. A mi hermana, Bárbara, le agradezco la paciencia, el siempre darme su tiempo si necesitaba conversar, el compartir su experiencia y asesoría en ciertas etapas de mi vida.

Como punto aparte debo agradecer a Jorge; tú estabas en una situación similar a la mía, pero en otro grado; pero fuiste en cierta forma un ejemplo, tu responsabilidad y curiosidad ante lo que la vida te presenta me instó a imitarte. Gracias por siempre escucharme, sabes que debo pensar en voz alta e intercambiar ideas y estuviste ahí cuando lo necesite. Sé que eres una persona grande y que te esperan grandes cosas, solo espero seguir este camino a tu lado y de tu mano.

Como punto final debo agradecer a mis amigas, empezamos ésta etapa juntas y creo que pasamos por las mismas fases juntas, unas terminaron antes y otras terminarían después. Pero les agradezco el compartir las sensaciones, las penas, frustraciones y alegrías que conlleva la memoria, porque al fin y al cabo vivimos lo mismo y lo entendemos completamente. Agradezco también su compañía, su ayuda, sus conversaciones y salidas, que nos sirvieron para unirnos más. Con este tiempo alejada de la rutina de clases sé con convicción que las tendré siempre a mi lado y de igual forma espero estar yo al suyo. Gracias Lorena, Javiera, Jocelyn, Cecilia.

INDICE

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	11
II. OBJETIVOS.....	14
II.1. Objetivo General.....	14
II.2. Objetivos Específicos.....	14
III. MARCO TEÓRICO.....	15
III.1. Cambio climático y Calentamiento global.....	15
III.1.a. Modelos del cambio climático.....	19
III.1.b. Impactos a corto y largo plazo.....	20
III.1.c. Impactos en Chile.....	22
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
IV.1. Zona de Estudio.....	27
IV.2 Materiales.....	28
IV.2.a Modelo PRECIS.....	28
IV.2.b Modelo 3-PG.....	30
IV.2.c Información climática.....	32
IV.3. Metodología.....	35
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
V.1 El Bosque y el sector forestal.....	40
V.2. Requerimientos ambientales de <i>Pinus radiata</i>.....	50
V.3. Evaluación del modelo PRECIS.....	53
V.3.a. Climatologías, percentiles e histogramas.....	53
V.3.b. Análisis de correlaciones.....	60
V.3.c Validación de PRECIS y observaciones en 3-PG.....	61
V.4.d Análisis de sensibilidad.....	64
V.4. Evaluación de productividades.....	67
VI. CONCLUSIONES.....	76
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	79
VIII. APENDICES.....	85
VIII.1. Climatologías.....	85
VIII.2. Percentiles.....	89
VIII.3. Histogramas.....	94
VIII.4. Climatologías de todas las estaciones según variable.....	100
VIII.5. Radiación anual por estación.....	101
VIII.6. Evaluaciones en 3-PG de datos reales y de PRECIS.....	103
VIII.7. Mapas de volumen y biomasa a los 20 años en cada escenario...	108

VIII.8. Distancias a la costa.....	109
VIII.9. Programas realizados en Matlab.....	110
VIII.9.a. Arreglo datos observaciones.....	110
VIII.9.b. Arreglo datos PRECIS, climatologías y percentiles.....	111
VIII.9.c. Histogramas.....	114
VIII.9.d. Mapa Biomasa y volumen.....	117
VIII.9.e. Mapa diferencias porcentuales.....	119
IX. ANEXOS.....	122
IX.1. Parámetros modelo 3-PG.....	122
IX.2. Factores, significados y obligatoriedad del modelo 3-PG.....	125
IX.3. Interfase modelo 3-PG.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01:	Esquema efecto invernadero en condiciones naturales.....	16
Figura 02:	Esquema efecto invernadero con factor humano.....	16
Figura 03:	Componentes del sistema climático global.....	17
Figura 04:	Emisiones mundiales de GEI antropogénicos.....	18
Figura 05:	Emisiones mundiales de GEI en ausencia de políticas climáticas adicionales.....	21
Figura 06:	Variación del área encerrada en la isoterma 0°C para el clima actual y para el escenario A2.....	24
Figura 07:	Temperatura media diaria en el clima actual y diferencias futuro- presente por estación del año.....	25
Figura 08:	Precipitación estacional en el clima actual y diferencias futuro- presente por estación del año.....	26
Figura 09:	Relaciones entre modelos globales y regionales.....	29
Figura 10:	Diagrama de flujo del modelo 3-PG.....	32
Figura 11:	Zona de estudio y estaciones climáticas.....	33
Figura 12:	Ubicación e identificación de estaciones.....	34
Figura 13:	Superficie plantada por región y por género.....	43
Figura 14:	Superficie plantada por región y por especie.....	44
Figura 15:	Balance exportaciones/importaciones desde 1990.....	45
Figura 16:	Principales mercados de productos forestales.....	47
Figura 17:	Principales empresas exportadoras.....	48
Figura 18:	Etapas del ciclo forestal.....	49
Figura 19:	Climatología de similares magnitudes en cada variable.....	53
Figura 20:	Climatología de distintas magnitudes en dos variables.....	53
Figura 21:	Percentil estación 8.....	54
Figura 22:	Percentil estación 11.....	54
Figura 23:	Histogramas estación 8.....	56
Figura 24:	Histogramas estación 11.....	56
Figura 25:	Ubicación de estaciones para precipitación.....	58
Figura 26:	Ubicación de estaciones para temperaturas máximas.....	58
Figura 27:	Ubicación de estaciones para temperaturas mínimas.....	59
Figura 28:	Sensibilidad de 3-PG a las variables climáticas.....	65
Figura 29:	Mapa de productividades a una edad de rodal de 25 años.....	68
Figura 30:	Mapa de diferencias porcentuales entre la productividad futura y actual a una edad de rodal de 25 y 20 años.....	71
Figura 31:	Variación latitudinal de la biomasa en la longitud -71,50.....	72
Figura 32:	Alturas de cada punto de las figuras 31 y 33 y representación en líneas de las longitudes usadas en dichas figuras.....	73
Figura 33:	Variación latitudinal de la biomasa en la longitud -72,75.....	74

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 01: Promedio mundial del calentamiento en superficie y del nivel del mar.....	22
Cuadro 02: Ciertas variables disponibles en PRECIS.....	30
Cuadro 03: Factores iniciales y de sitio del modelo 3-PG.....	37
Cuadro 04: Descripción de los periodos del sector forestal.....	41
Cuadro 05: Superficie (ha) nacional plantada según especie forestal.....	43
Cuadro 06: Superficie en hectáreas de pino radiata según propietario y edad.....	44
Cuadro 07: Requerimientos ecológicos de pino radiata.....	50
Cuadro 08: Comparación estaciones según variables.....	57
Cuadro 09: Coeficientes de correlación por estación y variable.....	60
Cuadro 10: Valor de biomasa y volumen a los 20 años para cada estación.....	61
Cuadro 11: Variación porcentual entre variables modificadas ($\pm 10\%$ y $\pm 30\%$) y la variable control.....	66

RESUMEN

El Cambio Climático en Chile advierte un futuro calentamiento del país y una disminución de las precipitaciones en la zona centro-sur (~35°-40°S). Dadas estas proyecciones, esta tesis tiene por objetivo evaluar estos efectos sobre el crecimiento y productividad de *Pinus radiata*, que es un sector productivo importante en la zona afectada, utilizando simulaciones de clima futuro de PRECIS en el modelo 3-PG. PRECIS es un modelo climático regional para el cual existen tres simulaciones: clima actual (periodo 1961-1990), y dos proyecciones del clima futuro para el periodo 2071-2100: uno moderado de emisiones B2 y severo de emisiones A2. El modelo 3-PG simula el crecimiento de los árboles como función de procesos fisiológicos, condiciones meteorológicas y de sitio en un período determinado. La zona de estudio abarca la región administrativa del Maule hasta la de Los Ríos (34.5°S-41°S). El modelo PRECIS fue primero evaluado contra estaciones de observación en el área de estudio, para verificar si el modelo es capaz de reproducir la variabilidad temporal y espacial observada de este clima (precipitación y temperatura). En general PRECIS simula correctamente el ciclo anual de estas variables, siendo el mayor sesgo una sobre-estimación de la precipitación a grandes altitudes y sobre la cordillera de Los Andes. Las variables de PRECIS fueron entonces usadas para correr 3-PG para las condiciones climáticas presentes como las dos proyecciones futuras. Se realizaron mapas para volumen y biomasa para un rodal de 25 y 20 años y se calculó la diferencia porcentual entre la productividad futura y actual. La evaluación de estos mapas reveló que la productividad disminuye en relación al clima actual. Existe un impacto mayor de A2, comparado con B2, con una zona de baja productividad entre los 35°S-37°S, donde se presentaría una baja entre 20% y 40%, comparado con el presente y una zona de mayor productividad en el sector precordillerano sur con diferencias de 10% a 80%. En B2 no se distingue un área de menor productividad y las áreas de mayor productividad tienen diferencias de 10% y 60%, comparado con el presente. En conclusión, estos resultados sugieren que la parte norte del área de estudio (zonas cercanas al centro del país), experimentarían una disminución de su potencial forestal, mientras que las zonas más al sur y hacia el este (montañas) presentarían un aumento. Existiría un deterioro del potencial en las regiones V (32°S), VI (34°S) y VII (35°S), y una expansión de la zona de mayor potencial productivo desde la VIII (37°S) región al sur, donde los análisis de este estudio sugieren que la productividad de *Pino radiata* mejora significativamente a partir de la región de Los Ríos hasta Chiloé (~40°-44°S).

Palabras claves: *Pinus radiata*, productividad, calentamiento global, PRECIS, 3-PG.

ABSTRACT

Climate change in Chile sees a future warming of the country and a decrease in rainfall in the central-south region (~35°-40°S). Given these projections, this thesis aims to evaluate the effects of these changes on the growth and productivity of *Pinus radiata*, that is an important productive sector in the affected region, by using simulations of future climate of PRECIS in the 3-PG model. PRECIS is a regional climate model, for which three simulations exist: current climate (period 1961-1990), and two future projections for the period 2071-2100: a moderate emissions future climate B2 and severe emissions future climate A2. The 3-PG model simulates the growth of trees as a function of physiological processes, weather and site conditions in a given period. The study area comprises the administrative regions Maule until Los Rios region (34.5°S- 41°S). The PRECIS model was first evaluated against station observations in the study area, to verify whether the model is capable of reproducing the observed spatial and temporal variability of its climate (precipitation and temperatures). In general PRECIS simulates correctly the annual cycle of those variables, being the biggest bias, an overestimation of precipitation at higher altitude and over the Andes cordillera. PRECIS variables were then used to run 3-PG, for present climate conditions as well as the two future projections. Maps were made for volume and biomass at 25 and 20 years and the percentage difference between the current and future productivity were calculated. The evaluation of these maps revealed that the productivity declines in relation to the current climate. There is a greater impact in A2 compared to B2, with a zone of low productivity between 35°S-37°S, which exhibit a decrease between 20% and 40%, compared to present, and a zone of higher productivity in the southern mountain with differences of 10 % to 80%. In B2 there is no distinguished area of low productivity and the areas of higher productivity have differences of 10% and 60% compared to present. In conclusion, these results suggest that the northern part of our study area (zones nearest to the center of the country), would experience a decrease in its forestry potential, while the zones more to the south and towards the west (mountains) would present an increase. A deterioration of the potential would exist in the regions V (32°S), VI (34°S) and VII (35°S), and an expansion of the zone of major productive potential from the VIII (37°S) region to the south, where the analysis of this study suggest that the productivity of *Pino radiata* improves significantly from the region of Los Ríos to Chiloé (~40°-44°S).

Key words: *Pinus radiata*, productivity, global warming, PRECIS, 3-PG.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar los efectos del cambio climático, anticipados para Chile, sobre el crecimiento y productividad de *Pinus radiata*. Para esto primero se comentará sobre el cambio climático en general, es decir, sus causas e impactos y sobre los modelos utilizados para simular el clima futuro. Posterior a esto se hará referencia al crecimiento de los árboles con énfasis en la relación suelo agua planta y atmósfera (SAPA) y en los modelos para estimar productividad.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) define este fenómeno como un “cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, persistente durante un tiempo prolongado y que se puede deber a la actividad humana como a la variabilidad natural”. Sin embargo, el planeta ha aumentado su temperatura en razón similar al desarrollo de la economía mundial, lo que se presenta como una correlación entre la variación de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) y la temperatura terrestre. El último informe atribuye a la actividad humana un papel relevante en los cambios climáticos observados. En términos generales, la temperatura de la Tierra está determinada por el equilibrio entre la radiación solar incidente y la energía emitida por la superficie terrestre y por el efecto invernadero de los gases presente en la atmósfera; los gases invernadero atrapan el calor en las capas cercanas a la superficie de la atmósfera (tropósfera) produciéndose un ambiente cálido y habitable. Sin la presencia de GEI la radiación incidente se iguala con la radiación reflejada por la superficie lo que generaría una temperatura ambiente de unos -18°C . En condiciones naturales de concentración de GEI en la atmósfera, la radiación terrestre es absorbida y re-emitida en todas direcciones lo que produce una temperatura propicia para la vida. Debido a la actividad humana las concentraciones de GEI han aumentado significativamente en los últimos 150 años, por lo tanto se absorbe y re-emite más radiación provocando un aumento en la temperatura (Bureau of Meterology, 2009).

Los GEI generados por actividades humanas son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2) y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo). El CO_2 es emitido por el proceso de quema de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo; el metano por actividades relacionadas a la agricultura y ganadería, la distribución de gas natural y los vertederos (“landfills”). El óxido nitroso es emitido en el uso de fertilizantes y en la quema de combustibles fósiles y los halocarbonos se asocian a agentes refrigerantes y procesos industriales (IPCC, 2007)₁.

En relación a los impactos del cambio climático en Chile CONAMA (2006) advierte un futuro calentamiento en todo el país, así como una disminución de las precipitaciones en la zona centro-sur, esto en base a las proyecciones climáticas realizadas para el siglo XXI. La temperatura tendría una variación de 2 a 4°C respecto al clima actual para el escenario de emisiones A2, con una marcada diferencia en las zonas andinas y con una disminución

norte-sur de las temperaturas. Las precipitaciones disminuyen mientras que en el sector Argentino se advierte un aumento de éstas. En el sector centro-sur de Chile se produciría una disminución del orden del 40%. Debido al aumento de temperaturas la isoterma 0°C sufre un alza de altura, por lo tanto se disminuye el área de acumulación nival, alterando el ciclo hidrológico de las cuencas.

Los modelos se utilizan para interpretar y estudiar fenómenos naturales, en el caso del cambio climático los modelos climáticos simulan los procesos atmosféricos y oceánicos en base a ecuaciones matemáticas de dichos procesos físicos. Para estudiar el impacto del cambio en Chile se utilizó el modelo regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), en el marco del Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el sXXI (CONAMA, 2006). El modelo HadCM3 (Hadley Center Climate Model, versión 3) fue utilizado como condición de borde para forzar al modelo PRECIS. El modelo PRECIS presenta una grilla de 25 km, con meses de 30 días, sin años bisiestos y tres simulaciones realizadas: clima actual (1961-1990), clima futuro con escenario moderado de emisiones B2 (2071-2100) y para el mismo período el clima futuro con escenario severo de emisiones A2. Entre las variables disponibles se pueden encontrar las temperaturas extremas, la tasa de precipitación, la humedad específica, entre otras.

Tal como señala la Estrategia Nacional para el Cambio Climático (CONAMA, 2006)¹ los efectos del cambio climático se dejarán sentir con especial intensidad en las actividades agrícolas, forestales y ganaderas, y en especial aquellas más dependientes de los recursos hídricos. En el caso de la industria forestal, es necesario tener en consideración que el crecimiento de las plantas en general y de los árboles en particular, depende de diversos factores, como el tipo de suelo, clima, disponibilidad de agua, nutrientes, radiación, entre otros, es decir, de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera. Entre los factores ambientales destacan los factores meteorológicos, principalmente la temperatura y las precipitaciones, en su relación con el crecimiento del fuste; las precipitaciones enfocadas a la disponibilidad de agua en el suelo y la temperatura como gatillante del crecimiento en distintas estaciones (Donoso, 1982). Dependiendo de la escala de análisis y de la latitud, la temperatura y la disponibilidad de agua, determinan el crecimiento vegetal más que cualquier otro factor, ya que afecta en todos los procesos de la planta (Lambers *et al*, 1998, Santana, 1998), y junto con la radiación determinan en gran medida las tasas fotosintéticas de una planta y por ende, la productividad de la misma.

En el ámbito forestal, el interés principal es maximizar la productividad, (i.e. tener mayor volumen de madera por árbol plantado). Para estimar la productividad de las distintas especies forestales se han utilizado modelos empíricos, denominados Modelos de Crecimiento y Rendimiento, que son representaciones estadísticas de crecimiento del árbol a través del tiempo, mientras que una nueva generación de modelos modelan el crecimiento en base a procesos fisiológicos, por lo tanto, el crecimiento se evalúa como función de la interacción de los diversos procesos fisiológicos, las condiciones meteorológicas y del sitio de plantación en un período determinado (Flores, 2004). De este tipo es el modelo 3-PG; (Physiological Principles in Predicting Growth), y está basado en una serie de principios bien establecidos y constantes confirmadas y ajustadas a la especie (en este caso *Pinus*

radiata), que permiten una simplificación de los cálculos; requiere de poco ajuste para obtener estimaciones reales de crecimiento forestal y puede ser parametrizado para tipos particulares de bosques (Landsberg & Waring, 1997). Este modelo utiliza como variables la radiación [Mj/m²/día], precipitación [mm/mes], temperaturas extremas [°C], días de frío en el mes y estimaciones de la textura y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Coops & Waring, 2001). El modelo funciona bajo la lógica de que las precipitaciones determinan el agua disponible en el suelo y también, junto con la temperatura y el déficit de presión de vapor, condicionan la conductancia estomática, encargada del intercambio gaseoso de la planta y de la fotosíntesis; además trabaja con la radiación solar y la eficiencia del dosel en la Producción Primaria Bruta de la cual una parte se destina a los procesos internos de la planta como la respiración y la otra parte corresponde a la Producción Primaria Neta. Esta biomasa se destina a la generación y crecimiento de las estructuras bajo el suelo, es decir, las raíces las cuales influyen en la nutrición al ser las encargadas de la absorción de nutrientes y minerales desde el suelo; y al crecimiento de las estructuras sobre el suelo, como el fuste y las hojas.

En base a lo anterior en el presente trabajo se realizará una estimación del crecimiento de *Pinus radiata* utilizando el modelo 3-PG junto con las proyecciones climáticas simuladas por el modelo PRECIS para finales del siglo XXI.

II. OBJETIVOS

II.1. Objetivo General

Evaluar las variaciones en el crecimiento y productividad de *Pinus radiata* en relación a los cambios climáticos proyectados y su posible impacto en el sector forestal nacional.

II.2. Objetivos Específicos

- (1) Describir la situación forestal nacional, en cuanto a la superficie plantada, las especies dominantes y las empresas y procesos realizados.
- (2) Determinar los requerimientos ambientales para el crecimiento de la especie con especial interés en los factores climáticos.
- (3) Validar la consistencia entre la climatología del modelo PRECIS y datos climáticos actuales y posteriormente comparar la estimación de productividad obtenida por 3-PG para el clima presente.
- (4) Evaluar las productividades entregadas por el modelo 3-PG usando las proyecciones del modelo PRECIS para el periodo 2071-2100 y comparar con la situación actual.

III. MARCO TEÓRICO

III.1. Cambio climático y Calentamiento global

El cambio climático se definió según el Informe Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) como un cambio identificable del estado del clima a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, siendo esto persistente en un período prolongado. Entre las causas identificables del cambio climático el IPCC no indica la actividad humana como la única causa, sino que también menciona que el cambio puede deberse a la variabilidad natural. Mas esta última no está indicada como una de las causas principales debido a la correlación existente entre el aumento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y al aumento de la temperatura, fenómeno documentado en varios estudios, además del hecho que ningún modelo climático mundial acoplado basado únicamente en forzamientos naturales ha conseguido reproducir las tendencias del calentamiento medio de los distintos continentes (excepto la Antártida).

La temperatura de la Tierra esta determinada por la radiación solar incidente y por el proceso natural de la atmósfera, denominado también efecto invernadero. Los gases invernadero atrapan el calor en las capas superficiales de la atmósfera y producen que la Tierra esté considerablemente más cálida que sin este efecto, por lo tanto, es este proceso el que permite el desarrollo de la vida al producir un ambiente habitable y cálido cerca de la superficie terrestre. Este efecto natural ha aumentado desde la mitad del siglo XIX debido al aumento sostenido de GEI en la atmósfera, como producto del acelerado uso de combustibles fósiles, deforestación y cambio de uso de suelo, todas actividades humanas. Este aumento se produce debido a un aumento en las concentraciones de los gases invernadero en la atmósfera, como lo es el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano entre otros.

La atmósfera es una capa de gases que envuelve la Tierra compuesta principalmente de nitrógeno (78%) y oxígeno (21%), gracias a esta capa, la radiación emitida por el sol (1360 Wm^{-2} aproximadamente) genera una temperatura de 15°C en ausencia de otras influencias (IPCC, 2007)₁, además la atmósfera junto con los océanos transportan calor desde el ecuador (zona que recibe mayor radiación solar por unidad de área debido a la forma de la Tierra) hacia los polos, lo que permite mantener una temperatura uniforme en el globo.

La constitución de la atmósfera la hace esencialmente transparente a la radiación solar incidente (onda corta) y a la radiación infrarroja (onda larga) emitida por la superficie terrestre. Ciertos gases invernadero como el vapor de agua y el dióxido de carbono son transparentes a la radiación solar, pero absorben fuertemente la radiación infrarroja emitida por la superficie. La radiación que absorben estos gases es re-emitida en todas direcciones, cierta parte vuelve a la superficie generando calor. El mecanismo de efecto invernadero (Bureau of Meterology, 2009) se esquematiza en la Figura 01, donde se muestra en el panel

izquierdo la situación hipotética de la ausencia de gases invernadero en la atmósfera, por lo tanto el calor de la superficie aumenta hasta alcanzar la temperatura a la cual la radiación solar reflejada iguala la radiación solar incidente lo que produce una temperatura de -18°C (255K). En el panel central de la Figura 01 los gases invernadero absorben parte de la radiación terrestre reflejada e irradian energía infrarroja en todas direcciones. Esto produce que el calor aumente unos grados hasta que la emisión infrarroja hacia arriba se equilibre con la emisión infrarroja hacia la superficie y la radiación solar. La diferencia entre la temperatura con efecto invernadero (T_S) y la temperatura en ausencia de este (T_O) es una medida del efecto sobre la superficie terrestre. Con una distribución normal de gases invernadero la temperatura forma un perfil de una curva sólida que se muestra en el panel derecho de la Figura 01.

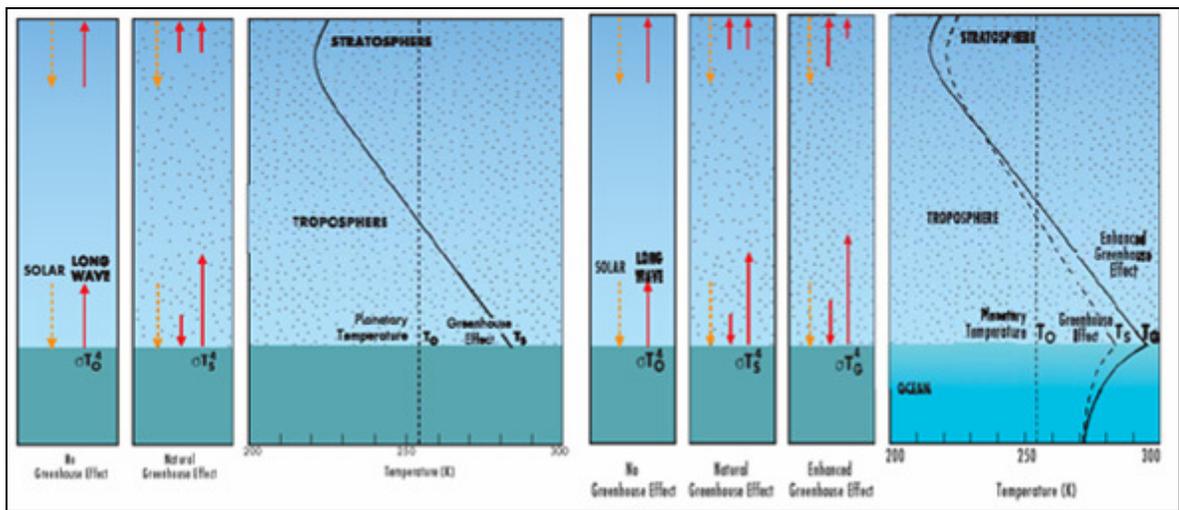


Figura 01: Esquema efecto invernadero en condiciones naturales.

Fuente: (Bureau of Meterology, 2009).

Figura 02: Esquema efecto invernadero con factor humano.

Fuente: (Bureau of Meterology, 2009).

Cualquier cambio en la concentración y mezcla de gases invernadero en la atmósfera producirá cambio en el balance radiativo de la atmósfera y por ende el nivel de calentamiento, en la Figura 02 se muestra esquemáticamente esta situación. El aumento en las concentraciones de gases invernadero aumenta la opacidad de la baja atmósfera a la radiación desde la superficie, entonces la baja atmósfera absorbe y re-emite más radiación. Con el aumento de la radiación hacia la superficie, ésta se calienta desde la temperatura (T_S) hasta una nueva temperatura (T_G), el aumento continúa hasta que un nuevo equilibrio en el perfil de temperatura es establecido.

Todo lo anterior, se puede resumir en que el sistema energético del planeta se mantiene mediante un mecanismo de balance de la radiación incidente del sol, en el cual los gases naturales de efecto invernadero absorben una parte de la emisión infrarroja emitida por la superficie y re-emitiendo la misma hacia la superficie y al espacio; lo cual mantiene la temperatura del planeta. Por lo tanto, el aumento en la concentración de estos gases en la atmósfera produce un desbalance en el sistema y conlleva a alteraciones del mismo. Los

cambios positivos o negativos de balance de energía por efecto de la concentración de GEI, aerosoles y otros factores incidentes en el proceso, se expresan en términos de forzamiento radiativo que permite determinar la influencia de un factor sobre el balance de energía del sistema (IPCC, 2007).

Se debe tener en cuenta que el calentamiento global no está solamente definido por el balance radiativo de la atmósfera sino que es mucho más complejo e involucra otros sistemas y procesos físicos, químicos y biológicos. La compleja interacción entre los componentes del sistema climático (Figura 03) implica que cualquier cambio en un componente afecte a otro componente de cierta forma. Por ejemplo, el vapor de agua es el gas invernadero más importante en cuanto a la influencia en el clima y es además aquel que no está bien mezclado en la atmósfera y puede variar localmente; el dióxido de carbono por otra parte es aquel que tiene un largo período de vida en la atmósfera y está bien mezclado alrededor del globo (IPCC, 2007)₁.

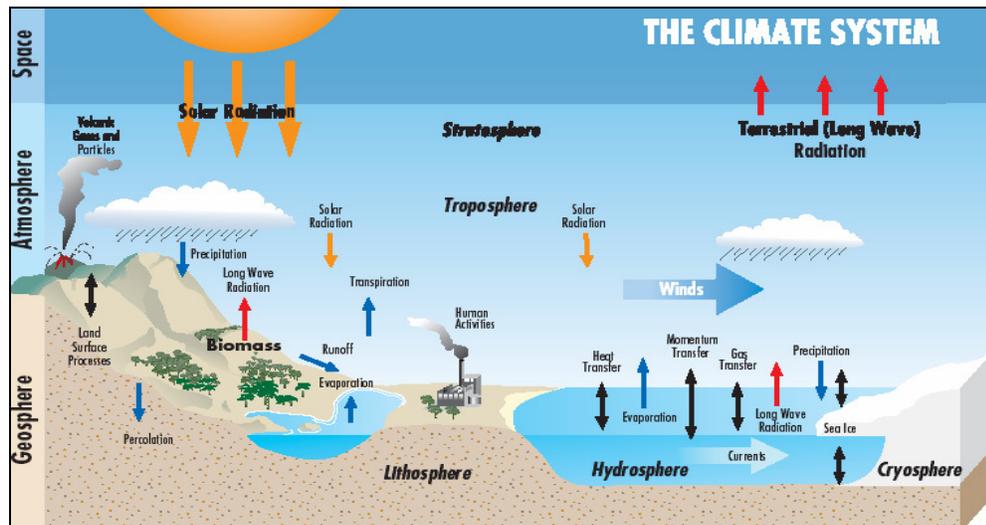


Figura 03: Componentes del sistema climático global. La atmósfera incluye la tropósfera y la estratósfera, la geósfera (litósfera), la hidrósfera, la criósfera (nieve, hielo y permafrost) y la biosfera.

Fuente: (Bureau of Meteorology, 2009).

Los gases efecto invernadero generados por actividades humanas son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nítrico (NO_2) y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo). El dióxido de carbono es emitido con el uso de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo. El metano se libera con actividades relacionadas a la agricultura, la distribución de gas natural y los vertederos (“landfills”), pero las concentraciones de este gas no están aumentando porque el ritmo de crecimiento ha decrecido en las últimas décadas. El óxido nítrico es emitido en el uso de fertilizantes y en la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2007)₁. Los halocarbonos han aumentado principalmente por las actividades humanas, que han sido usados como agentes refrigerantes y en otros procesos industriales. La abundancia de estos gases ha decrecido

debido a la regulación internacional para la protección de la capa de ozono. Caso especial es el vapor de agua, que es el más abundante e importante de los gases invernadero, en el que las actividades humanas tienen una pequeña influencia directa en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Se debe mencionar además que una atmósfera más caliente contiene mayor vapor de agua (Bureau of Meteorology, 2009).

Las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) por actividad humana han aumentado en un 70% entre 1970 y 2004, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el más importante con un 77% de las emisiones totales de GEI antropogénicos (Figura 04), así también se puede mencionar que el CO_2 y CH_4 han excedido considerablemente los valores naturales de hace 650.000 años. Entre 1995-2004 la tasa de crecimiento de CO_2 -eq fue de 0,92 GtCO_2 -eq anuales mientras que en el período de 1970-1994 fue de 0,43 GtCO_2 -eq (IPCC, 2007).

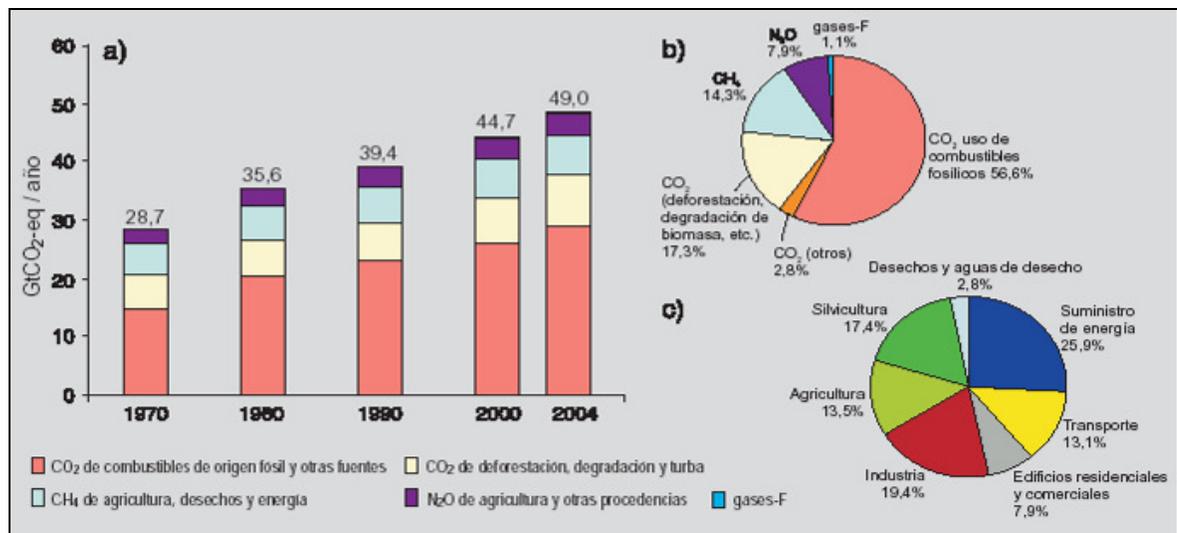


Figura 04: Emisiones mundiales de GEI antropogénicos. a) Emisiones mundiales anuales de GEI antropogénicos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional de GEI para el año 2004 en términos de CO_2 -eq. c) Parte proporcional de GEI antropogénicos en 2004, en CO_2 -eq (En silvicultura se incluye la deforestación).

Fuente: (IPCC, 2007).

En cuanto a las concentraciones de los gases efecto invernadero el IPCC (2007) y (2007)₁ mencionan que el CO_2 aumentó desde la era preindustrial de aproximadamente 280 ppm a 379 ppm en 2005; la concentración de CH_4 aumentó en aproximadamente de 715 ppmm a unos 1774 ppmm en 2005. El NO_2 pasó de 270 ppmm a 319 ppmm aproximadamente en 2005 y finalmente los halocarbonos han aumentado respecto a valores casi nulos en la era preindustrial.

La influencia de un factor sobre el cambio climático es evaluada en términos de forzamiento radiativo, que corresponde a la medida de como el balance de energía es influenciado cuando un factor que afecta al clima es alterado (IPCC, 2007)₁. El aporte más significativo al forzamiento radiativo positivo (calentamiento) es el del CO_2 ($+1.5 \text{ Wm}^{-2}$)

seguido por el CH₄ (+0.5 Wm⁻²) (DGF, 2009) y en conjunto el forzamiento de los GEI exceptuando los halocarburos es de +2.3 Wm⁻² aumentando en una tasa sin precedentes desde hace mas de 10.0000 años. Sin embargo, como existe el forzamiento positivo, los aerosoles producen conjuntamente un forzamiento radiativo negativo de -0.5 Wm⁻², por lo cual el IPCC (2007) estima que los cambios de la irradiancia solar han provocado un pequeño forzamiento radiativo del orden de +0.2 Wm⁻². El grado de respuesta del sistema climático ante el forzamiento radiativo sostenido corresponde a la sensibilidad climática. Según datos del IPCC (2007) la sensibilidad climática se encontraría probablemente entre 2 y 4.5 °C, siendo óptima la aproximación a 3°C.

III.1.a. Modelos del cambio climático

La creación de modelos para interpretar y estudiar fenómenos naturales se realiza en todos los campos de las ciencias y en el estudio del cambio climático se utiliza la modelación del sistema climático para análisis científicos y la generación de políticas públicas que permitan hacer frente a la preocupación de que las emisiones antropogénicas alteren la atmósfera y el clima mundial y esto repercuta en las economías nacionales y los ecosistemas naturales. Los modelos climáticos van desde los simples, balances de energía unidimensional, que puede usarse para probar hipótesis simples hasta modelos complejos de tres dimensiones numéricas que incorporan un amplio rango de procesos del sistema atmósfera-geósfera-biosfera (Bureau of Meterology, 2009).

Entre los modelos usados se pueden clasificar en modelos complejos, que se denomina principalmente a los Modelos Climáticos Generales Atmósfera-Océano (MCGAO) y Modelos Climáticos Simples (MCS). Los modelos simples son ampliamente usados para explorar todos los escenarios posibles de emisión de gases de efecto invernadero y los posibles efectos; además implican procesos y dinámicas físicas simplificadas y una resolución grosera (Bureau of Meterology, 2009). El IPCC (1997) menciona que los Modelos Simples, producen resultados integrados zonal o mundialmente, sólo para temperatura y cambios de temperatura, la salida es únicamente de la señal de cambio, por lo cual no pueden simular cambios de la variabilidad climática, se debe especificar la sensibilidad climática y otras propiedades usando modelos complejos u observaciones, son modelos rápidos para simular varios escenarios y ejecutar corridas con una amplia gama de parámetros, de fácil análisis ya que contienen pocos procesos y su interpretación puede dar luces sobre el comportamiento de modelos de mayor complejidad, son ideales para estudiar los escenarios de emisiones y las consecuencias a una escala mundial.

Por otra parte, los Modelos Complejos simulan la variación geográfica de la temperatura y otras variables climáticas (lluvia, evaporación, humedad, nubosidad, vientos) proporcionando cambios a escala continental de al menos una de las variables, requieren la utilización de un intervalo de tiempo corto ya que muchos procesos se simulan directamente, la sensibilidad climática se calcula por combinación de leyes físicas, son caros computacionalmente lo que limita los casos que se podrían estudiar, en ocasiones son

difíciles de comprender y necesitan entradas de datos de alta resolución muchas veces inexistentes. El comportamiento del modelo es resultante de la interacción de procesos tal como en la realidad, pueden no ser fiables en el momento en que se producirá el cambio y en la naturaleza del mismo (IPCC, 1997).

Los modelos de circulación general son modelos complejos que simulan el comportamiento real de la atmósfera y/o océano incorporando ecuaciones matemáticas de los procesos físicos del sistema climático (Figura 03). Las ecuaciones están relacionadas a la conservación de la masa, momentum y energía en la atmósfera y océanos (Bureau of Meterology, 2009). Los MCGAO resuelven ecuaciones atmosféricas y oceánicas mediante rejillas volumétricas o cajas con valores promedio de determinadas propiedades, el tamaño de cada caja corresponde a la resolución espacial del modelo y consisten en un acoplado de un MCGA con un MCGO. Estos modelos dividen la atmósfera y el océano en una rejilla horizontal de 2-4° de latitud por 2-4° de longitud de resolución para modelos recientes y de 10 a 20 capas en la vertical. Simulan procesos que caracterizan la atmósfera y los océanos; son usados ampliamente en modalidad autónoma; calculan la transferencia de radiación en la atmósfera, la nieve y el hielo marino, los flujos de superficie, el transporte de calor y agua por la atmósfera y el océano y la captación de calor por los océanos (IPCC, 1997).

III.1.b. Impactos a corto y largo plazo

Para evaluar y pronosticar los impactos del cambio climático en los sistemas naturales y antropogénicos se proyectaron diversos escenarios de emisiones, los cuales fueron desarrollados en base a las políticas actuales de mitigación y las prácticas de desarrollo sostenible. Estos escenarios se agrupan en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran las vías de desarrollo alternativas incorporando factores demográficos, económicos y tecnológicos, además de las emisiones GEI. Los distintos escenarios son descritos por parte del IPCC (2007) de la siguiente forma: *“La línea A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos en base a alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1F1), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento”*.

A continuación se presenta una figura que grafica los distintos escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 en ausencia de políticas climáticas adicionales (Figura 05) y un cuadro sobre el promedio mundial proyectado del calentamiento en superficie y aumento de

nivel de mar para finales del siglo XXI (Cuadro 01). Ambos elementos fueron extraídos del Informe de Cambio Climático elaborado por el IPCC (2007). En la figura se muestra una proyección de aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre un 25% a 90% (9,7 y 36,7 GtCO₂-eq) y según esos escenarios se mantiene el dominio de los combustibles fósiles hasta pasado el 2030, por lo cual las emisiones de CO₂ aumentarían entre un 40% y 110% entre el 2000 y 2030. Mientras en el Cuadro 01 se indican proyecciones del promedio mundial de aumento del nivel del mar, en estas proyecciones los intervalos son más reducidos que en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (TIE), no alejándose más de un 10% del promedio de los valores del TIE, debido a un mayor conocimiento de las incertidumbres de las contribuciones proyectadas (contribución del aumento del flujo de hielo en Groenlandia y en la Antártida).

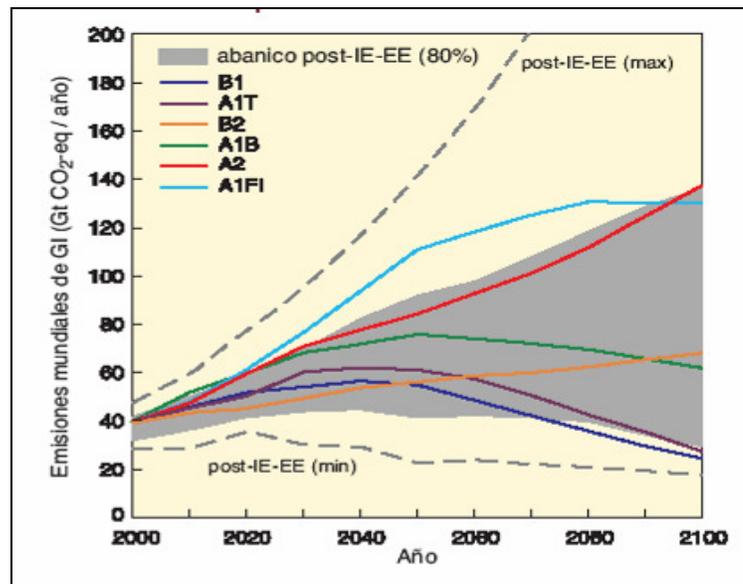


Figura 05: Emisiones mundiales de GEI en ausencia de políticas climáticas adicionales. Las emisiones abarcan los gases CO₂, CH₄, NO₂ y gases -F.
Fuente: (IPCC, 2007).

Entre los impactos pronosticados según el IPCC (2007) para el siglo XXI se pueden nombrar un calentamiento máximo sobre tierra firme así como en la gran mayoría de las latitudes septentrionales altas, y mínimo sobre el Océano Austral. Además se produciría una retracción de los hielos marinos del ártico como del antártico para todos los escenarios; un aumento en la frecuencia de los valores extremos de las olas de calor y de las precipitaciones intensas y un aumento de la precipitación en latitudes altas, disminuyendo en la mayoría de las regiones subtropicales (en un rango de 20% aprox. para el escenario A1B). También los cambios en la precipitación y en la temperatura provocan cambios en la escorrentía y finalmente en la disponibilidad de agua; la escorrentía disminuiría entre un 10% y un 30% en las regiones secas de latitudes medias y trópicos secos. En cuanto a los cambios posteriores al siglo XXI, se pronostica que aún cuando el forzamiento radiativo se estabilice en los niveles de B1 o A1B se esperaría un aumento de 0,5°C en el promedio

mundial de la temperatura de aquí al 2200; junto con esto, debido a la dilatación térmica el aumento en el nivel del mar sería del orden de 0,3 a 0,8 m al 2300 (respecto de 1980-1999); y las emisiones de CO² seguirían contribuyendo al calentamiento y al nivel del mar durante más de un milenio. También se debe tener en cuenta que el calentamiento global reduce la incorporación de CO² atmosférico, por lo que aumenta la concentración de emisiones antropogénicas en la atmósfera y por ende, una intensificación del cambio climático para un escenario de emisiones dados.

Cuadro 01: Promedio mundial del calentamiento en superficie y del nivel del mar

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999) ^{a,d}		Aumento de nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo según los modelos excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones del año 2000 constantes	0,6	0,3 – 0,9	No disponible
Escenario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Escenario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Escenario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Escenario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Escenario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Escenario A1F1	4,0	2,4 - 6,4	0,26 – 0,59

Notas: a) Emisiones evaluadas mediante jerarquía de modelos que abarca un modelo climático simple, varios modelos terrestres de complejidad intermedia y un gran número de modelos de circulación general atmósfera-oceano (MCGAO). c) La concentración de CO₂-eq correspondiente al forzamiento radiativo para los escenarios B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1F1 y es de aproximadamente 600, 700, 800, 850, 1.250y 1.550 ppm, respectivamente. d) Los cambios de temperatura están expresados como valores diferenciales respecto del período 1980-1999. Para expresar el cambio respecto del período 1850-1899, añádanse 0.5°C.

Fuente: (IPCC, 2007).

III.1.c. Impactos en Chile

Como cambios para fines del siglo XXI en específico para Chile, dominan el calentamiento en todo el país, siendo mayor para el escenario A2; el cambio de temperatura media en este escenario varía entre 2° y 4°C sobre Chile continental, siendo más marcado en las regiones andinas; en las precipitaciones se espera una disminución de las mismas en latitudes medias; la isoterma 0°C sufre un alza de altura y por ende, existe una reducción del área andina de almacenamiento de nieve; en el litoral existiría un alza entre 28 y 16 cm para A2 y entre 24 y 14 cm para el escenario B2 (CONAMA, 2006).

El estudio de Variabilidad Climática para Chile (CONAMA, 2006) presenta figuras que muestran las variaciones estacionales tanto de temperatura como precipitación. En relación a la temperatura (Figura 07), se observan cambios positivos, es decir, un calentamiento en todas las regiones. Para el escenario A2, el cambio es mayor, y tiene una variación de entre 2° y 4°C respecto al clima actual, además se observa una marcada diferencia en las zonas andinas y con una disminución norte-sur. En cuanto a la correspondencia de PRECIS Clima Actual con observaciones para el área entre 32 y 35°S la coincidencia es muy buena en terreno bajo, pero sobre los andes PRECIS subestima la temperatura media anual como consecuencia de la diferencia en altitud entre el modelo y la realidad, pero generalmente los ciclos anuales son bien simulados. También se puede mencionar que para el escenario A2 durante el verano el sector cordillerano proyecta un aumento de 4-5°C, mientras que para las demás estaciones este aumento solo se concentra en las regiones del norte. El sector centro-sur proyecta un aumento entre 3 a 4°C. En el caso del escenario B2 solo en verano la zona cordillerana de mayor altura, es decir, el límite entre Argentina y Chile, presentaría un aumento de 3-4°C, mientras que el resto del país y del continente fluctuarían entre los 2-3°C. Para los meses de invierno y primavera la zona al norte de Santiago y la cordillera variaría entre 2-4°C y la zona al sur de la capital entre 1-2°C. Se destaca en el escenario A2 que el océano Pacífico y Atlántico en invierno y primavera aumentarían de 1 a 2°C, mientras que en verano y otoño el Atlántico aumentaría entre 2 a 3°C y existiría un área de igual variación en el Pacífico frente a Puerto Montt.

En las precipitaciones (Figura 08) se observa una disminución en la ladera occidental de la Cordillera de los Andes (Chile) en latitudes medias; el escenario A2 es más marcado, y en la zona centro-sur se reducen a la mitad o al cuarto del valor anual, mientras que en la ladera oriental (Argentina) la precipitación futura se llega a duplicar respecto del valor actual. Respecto a las zonas de interés para el presente estudio se pronostica para Chile central una disminución de las precipitaciones para A2, manteniéndose en B2. La pérdida es del orden de 40% en tierras bajas aumentando hacia el verano y reduciéndose durante el otoño y el invierno en B2. Para la región sur durante el verano las pérdidas son de 40% reduciéndose en primavera a un 25%. Se observa que para los dos escenarios representados y para todas las estaciones del año las regiones del norte grande presentan una variación inferior al 10%. Además que para el escenario A2 la zona más vulnerable en cuanto a disminución de la precipitación en otoño, invierno y primavera es la zona central y en verano esta área se encuentra en la zona sur con valores con 50 a 30% menos del actual. Se debe mencionar además que sólo en las zonas extremas se presenta un aumento de las precipitaciones para Chile: en el altiplano con valores de 30 a 100% más de precipitación y en la zona más austral (Punta Arenas) con valores de 10 a 20%.

Otro fenómeno que se evidencia por el calentamiento global y que se proyecta en el estudio realizado por CONAMA (2006) es la reducción del área andina donde se almacena nieve, esto se debe a un alza en la altura de la isoterma 0°C. Esto provocaría un aumento de las crecidas invernales de ríos con cabecera andina y una disminución de la reserva nival de agua. En la Figura 06 se muestra el área encerrada por la isoterma cero para los Andes entre las latitudes 30 y 40°S para el periodo base (azul) y bajo el escenario A2 (rojo). Se observa la reducción de área para todas las estaciones, siendo la pérdida más significativa en los

cuatro primeros meses del año.

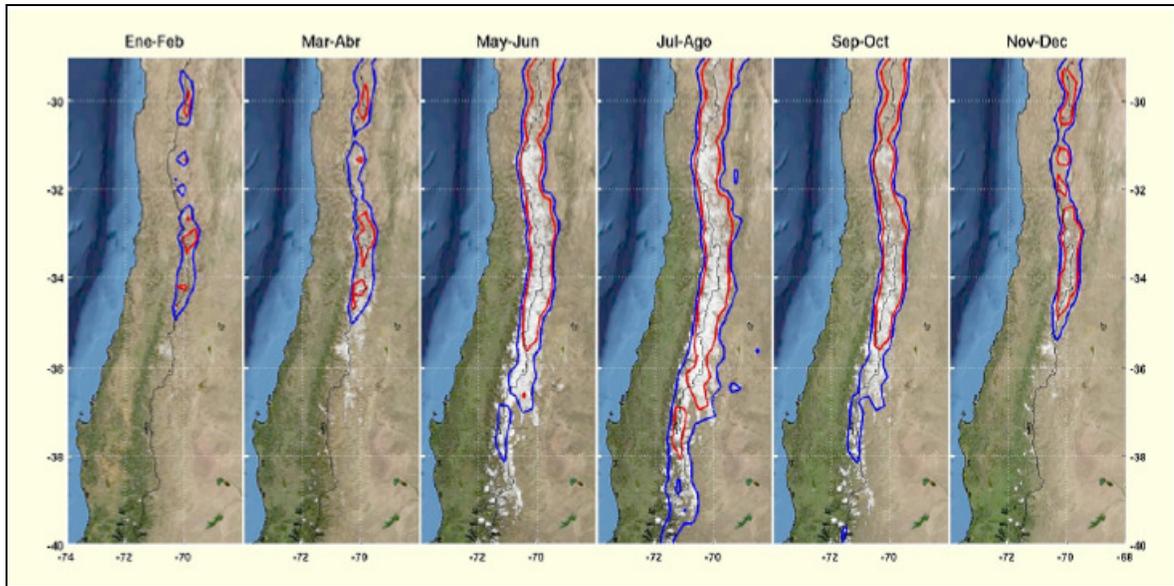


Figura 06: Variación del área encerrada en la isoterma 0°C para el clima actual (línea azul) y para el escenario A2 (línea roja). Imagen de fondo producto del satélite MODIS, que muestra los cambios aproximados de la cobertura vegetal y nival
Fuente: (CONAMA, 2006).

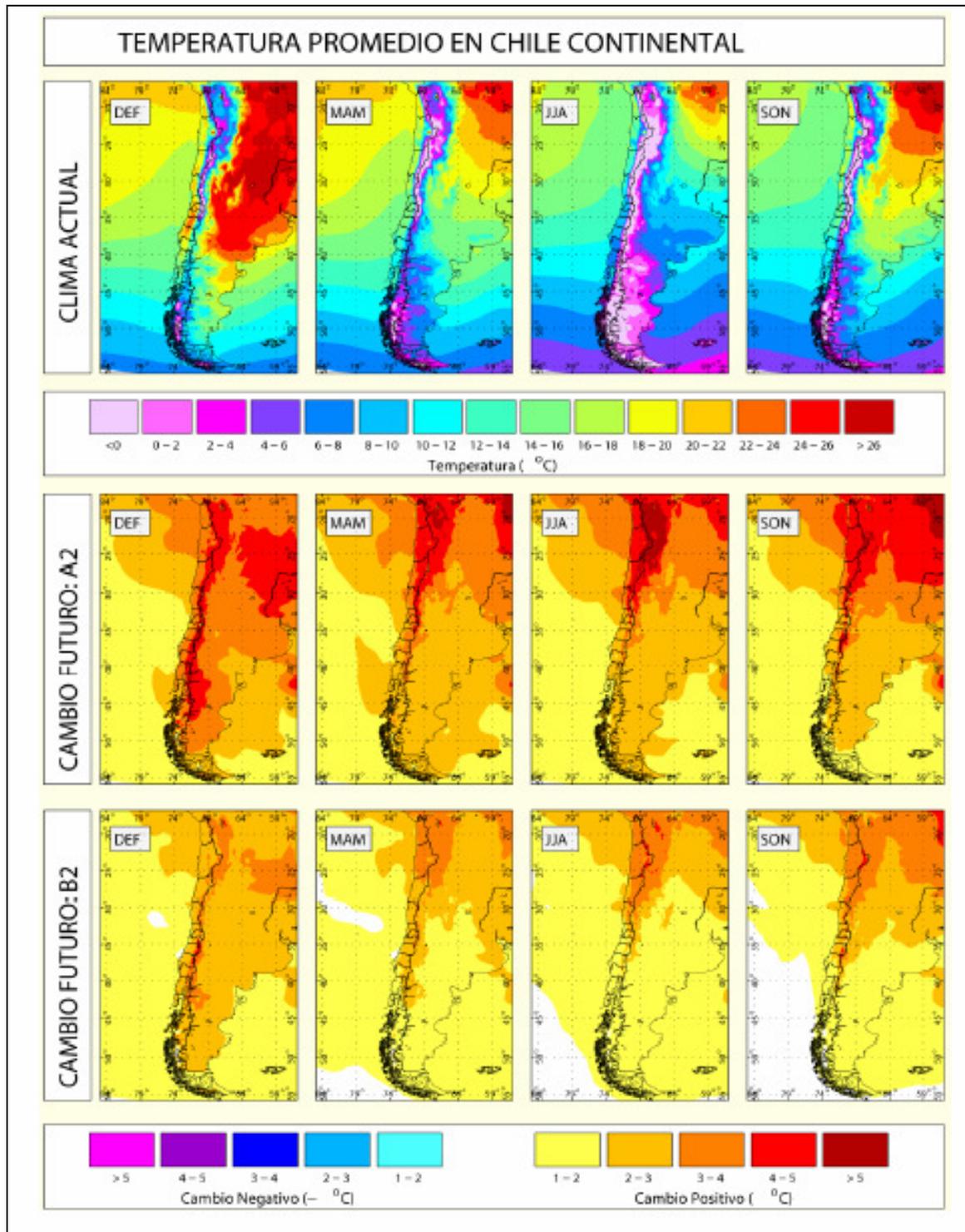


Figura 07: Temperatura media diaria en el clima actual (fila superior) y diferencias futuro-presente (filas inferiores) por estación del año.
 Nota: Cambios menores a 1°C no se colorean.
 Fuente: (CONAMA, 2006).

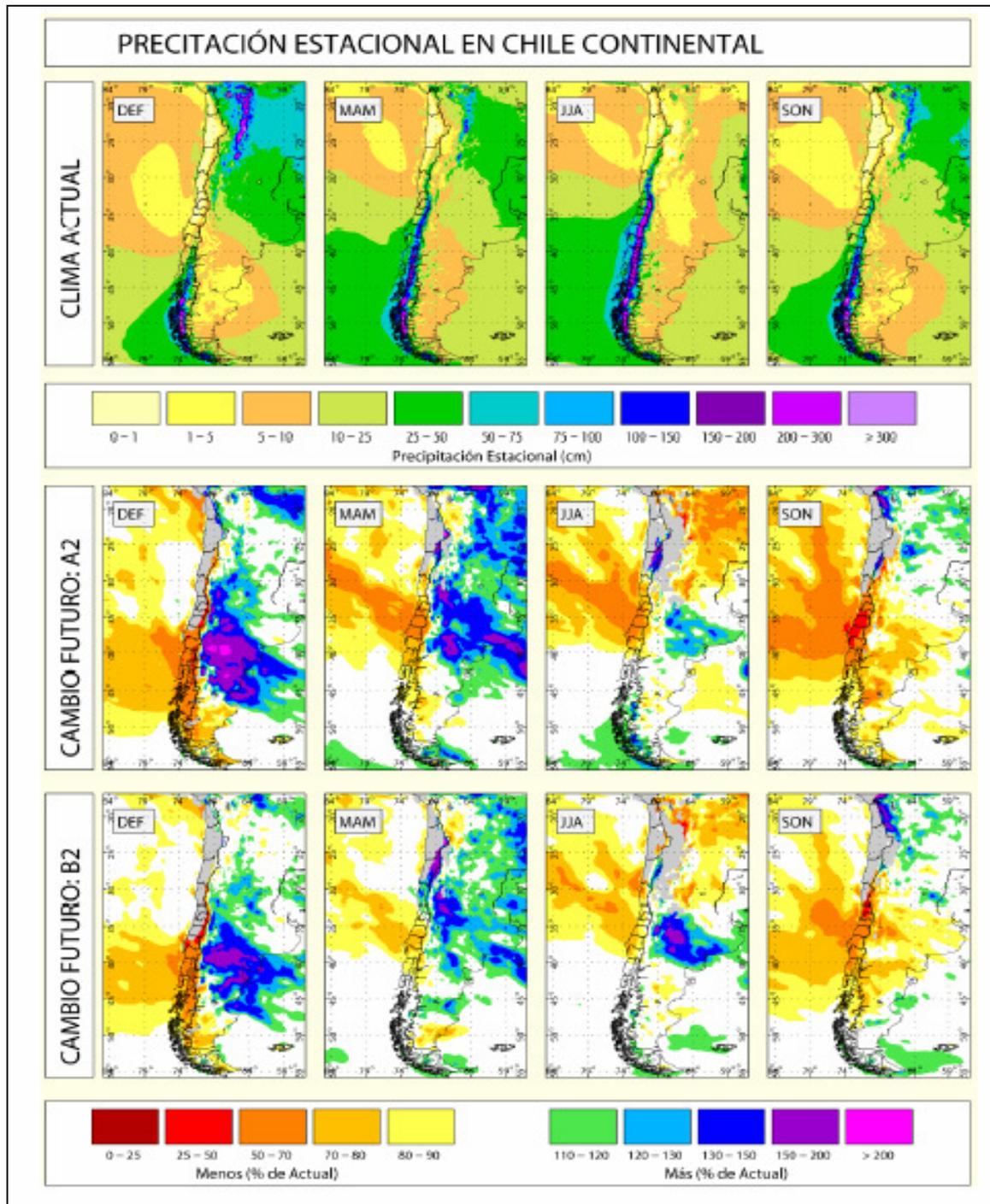


Figura 08: Precipitación estacional en el clima actual (fila superior) y diferencias futuro-presente (filas inferiores) por estación del año.

Nota: Expresado a razón (%) entre el valor promedio clima futuro y el valor al clima actual $[P_f/P_a] \times 100$, las zonas con menor precipitación tiene un porcentaje menor a 100% y las con mayor sobre 100%. Los lugares con cambio inferior a 10% no están coloreados.

Fuente: (CONAMA, 2006).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Zona de Estudio

El estudio abarca desde la región del Maule hasta la región de Los Ríos, esta zona se caracteriza por tener un clima templado con transición a templado lluvioso a medida que se avanza hacia el sur. En esta zona se evidencia un aumento considerable de la precipitación anual respecto a las regiones al norte de la región del Maule, con una distribución más uniforme de la precipitación en los meses del año. Al existir mayor disponibilidad de agua, la vegetación es más diversa y aparecen los bosques húmedos y de carácter frío (Salazar, 2003). En cuanto al clima de las regiones que abarca la zona de estudio, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2009) las clasifica como:

- La región del Maule con un clima templado cálido con una estación seca de 4 a 5 meses, pudiendo encontrarse diferencias apreciables en los montos anuales de precipitación y en la duración de la estación seca debido a las diferencias de relieve y de latitud.
- La región del Bío-Bío marca la transición entre clima templado a climas más lluviosos, predominando las características climáticas mediterráneas templadas y distinguiéndose tres sub-climas de acuerdo a la influencia oceánica y la duración de la estación seca.
- La región de la Araucanía presenta características climáticas de un clima templado lluvioso con influencia mediterránea entre los 38°S y los 42°S con un régimen pluviométrico de hasta 2.000 mm de promedios anuales con valores máximos en invierno y moderada amplitud térmica en las zonas ubicadas hacia la costa. Otra característica climática de esta zona es un clima templado cálido con estación seca corta (de alrededor de 4 meses), alcanzando promedios anuales superiores a los 2.000 mm.
- La región de Los Ríos se clasifica con un clima lluvioso, ya que no se encuentra ningún mes seco (totales mensuales <40mm), la precipitación anual se encuentra con valores superiores a 1.300 mm pudiendo sobrepasar los 2.200 mm en ciertos sectores (Panguipulli, Corral), las temperaturas disminuyen con la latitud, manteniéndose sobre los 10°C en promedio.

En relación a la geomorfología de esta zona, podemos distinguir la cordillera de la Costa, depresión intermedia y la cordillera de Los Andes. La cordillera de la costa hasta el límite norte de la VIII esta compuesta por arenisca y pizarras, su relieve es confuso e irregular ya que es cortada por valles de ríos que desembocan al mar; en la VIII región y hacia el sur se presenta constituida principalmente de rocas metamórficas, presenta una altura que supera ocasionalmente los 1.000 m. La depresión intermedia presenta materiales de origen fluvio-volcánico, fluvio-glacial y fluviales, siendo una llanura aluvial de ancho variable (45 a 100 km), finalmente la cordillera de Los Andes disminuye su altura gradualmente a medida que avanza al sur, presenta gran distribución de volcanes acompañadas de campos de lava y cenizas (González, 2003).

En la zona de estudio se encuentran cuatro formaciones vegetacionales de la clasificación de Gajardo (1995), de norte a sur corresponden a: región el matorral y bosque esclerófilo, región del bosque caducifolio, región del bosque laurifolio y región del bosque andino-patagónico.

- La región del matorral y bosque esclerófilo corresponde a la zona central del país, predominan arbustos y árboles de hojas esclerófilas (duras), así como arbustos bajos xerófitos (zonas áridas), suculentas (i.e. cactáceas), arbustos y árboles espinosos, presenta una gran diversidad vegetal y gran concentración humana, siendo, por lo mismo la zona más intervenida.
- El bosque caducifolio posee la mayor diversidad de especies arbóreas y arbustivas, se caracteriza por la presencia de las especies del género *Nothofagus* (hojas caducas de tamaño mediano y más blandas), las cuales se encuentran con problemas de conservación debido a la extracción en primer lugar, para campos de trigo en el sXVIII y en el presente por la presión de las plantaciones de pino.
- El bosque laurifolio (siempre verde) se extiende entre la IX y X región en el extremo suroeste, se distingue por la presencia de grandes árboles de hoja perenne, su fisonomía es densa de estratificación compleja (similar a una selva), su área geográfica es reducida y fragmentada.
- El bosque andino-patagónico se localiza en la zona cordillerana, tiene una presencia dominante de lenga (*Nothofagus pumilio*) y una subregión con dominancia de la Araucaria (*Araucaria araucana*), la precipitación es por lo general recibida en la forma de nieve.

IV.2 Materiales

Entre los materiales que se requirieron para esta investigación está el modelo 3-PG, desarrollado en formato Excel que estima el crecimiento mensual de la especie en base a datos climáticos y constantes específicas de la especie. El modelo 3-PG así como los datos climáticos reales fueron proporcionados por Bioforest S.A. Además de este modelo se empleó el modelo PRECIS, modelo que simula las condiciones climáticas futuras del país en relación a escenarios de emisiones de gases efecto invernadero. El análisis y manipulación de los datos se realizará en el software MatLab. A continuación se detallan los modelos a utilizar y posteriormente se detalla la información climática necesaria para este trabajo.

IV.2.a Modelo PRECIS

Para el presente estudio se utilizaron los resultados del modelo climático regional PRECIS, simulaciones corridas por la Universidad de Chile para CONAMA (2006) en el marco del Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. Las condiciones de borde para PRECIS fueron dadas por el modelo HadCM3 (Hadley Center Climate Model, versión

3) que corresponde a un MCGAO y el HadAM3P su componente atmosférica. El modelo HadCM3 en la componente atmosférica cuenta con 19 niveles en la vertical y una resolución de 417 x 278 km aproximadamente en el ecuador y de 295 x 278 km a 45 grados de latitud. Las salidas de este modelo se utilizaron para forzar un modelo atmosférico en superficie con una mayor resolución que corresponde al modelo HadAM3P. Finalmente, las salidas de éste modelo se usaron para forzar las simulaciones regionales con el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), desarrollado por el Hadley Center. PRECIS es un modelo de área limitada (regional), que permite obtener información con mayor detalle al poseer una mejor resolución (50, 25 km o menor). La validación de las salidas del modelo se realizó comparando la climatología actual del HadCM3 con Reanálisis NCEP/NCAR que son “*el resultado de un proyecto para producir estados de la atmósfera basados en datos históricos del período 1948 hasta el presente, utilizando un sistema de asimilación de datos de observaciones meteorológicas y oceánicas de diversas fuentes*” (CONAMA, 2006). Este proceso se esquematiza en la Figura 09.

PRECIS posee un espaciamiento horizontal de 25 km y abarca completamente Chile continental en el sentido este-oeste. Se realizaron tres simulaciones de períodos de 30 años cada uno: clima actual, comprende los años 1961-1990 y se considera la línea base para la modelación de los otros escenarios. El clima futuro con un escenario moderado de emisiones que contempla el período entre 2071-2100 y corresponde al escenario B2 descrito por el IPCC (2007); por último, el clima futuro con escenario severo de emisiones que abarca también el período entre 2010-2100, pero corresponde al escenario A2 del IPCC.

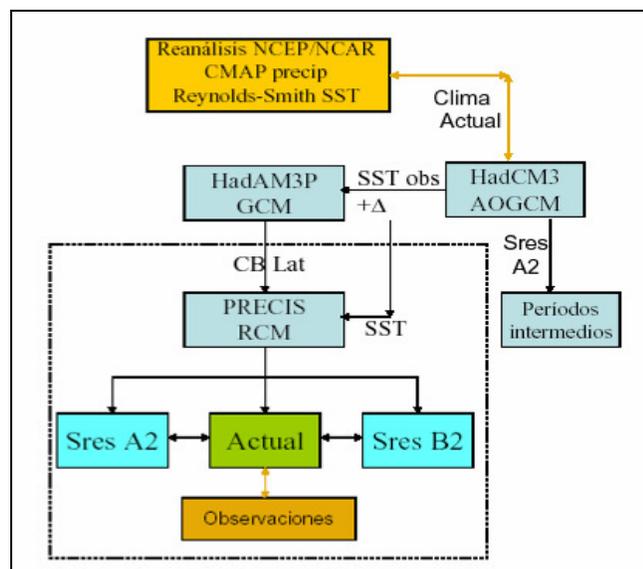


Figura 09: Relaciones entre modelos globales y regionales (celeste), validación con observaciones (amarillo) y comparaciones entre salidas de PRECIS (azul y verde).

Fuente: (CONAMA, 2006).

Los resultados del modelo PRECIS se encuentra en formato netcdf y algunas de las variables que modela se presentan a continuación en el Cuadro 02.

Cuadro 02: Ciertas variables disponibles en PRECIS.

Variables	Tipo	Unidades
Temperatura media del aire a 2 metros	2D	°K
Temperatura máxima del aire a 2 metros	2D	°K
Temperatura mínima del aire a 2 metros	2D	°K
Tasa de Precipitación	2D	mm/s
Humedad Específica	2D	kgr/Kgr
Presión Superficial	2D	Pa
Viento Zonal a 10m	2D	m/s
Viento Meridional a 10m	2D	m/s
Temperatura media del aire	3D	°K
Humedad Específica	3D	kgr/Kgr
Altura Geopotencial	3D	Gpm

Fuente: (CONAMA, 2006).

IV.2.b Modelo 3-PG

Para la modelación del crecimiento forestal se utilizó el modelo 3-PG, acrónimo que deriva de Physiological Principles in Predicting Growth, y que utiliza el enfoque de modelar el crecimiento forestal en base a los procesos fisiológicos. El modelo esta basado en un número de principios bien establecidos y constantes que permiten simplificar ciertas ecuaciones. Este modelo elaborado por Landsberg y Waring esta desarrollado para reducir la diferencia ente los modelos convencionales que utilizan mediciones de campo para modelar el crecimiento, y los modelos basados en el balance de carbono. Requiere un pequeño ajuste para obtener estimaciones reales de crecimiento forestal y puede fácilmente ser parametrizado para tipos particulares de bosques (Landsberg & Waring, 1997).

En comparación con otros modelos similares como ProMod (Battaglia & Sands, 1997) y CABALA (Battaglia *et al.*, 2004), 3-PG no es un modelo técnicamente superior, pero es un modelo simple y disponible gratuitamente, además de ser genérico posee un set de parámetros específicos por especie (los cuales pueden encontrarse en la sección Anexos) y ha sido usado en un amplio rango de ambientes y de especies. El modelo requiere datos de sitio y de clima fácilmente disponibles como valores de entrada. La interfaz utilizada por el modelo esta basada en un libro de Microsoft Excel y se denomina 3PGPJS la cual suministra todos los datos de entrada que requiere 3-PG y adiciona una hoja de cálculo que contiene los códigos de 3PGPJS y 3-PG que están escritos en Visual Basic (Sands, 2004).

Como anteriormente se mencionó el modelo usa una secuencia de tiempo mensual y requiere como datos de entrada los valores de la radiación total de onda corta incidente, la precipitación mensual total, el número de días frío por mes y el déficit de presión de vapor

promedio mensual, de los cuales algunos pueden ser omitibles. Los valores iniciales del follaje, la masa de raíces y del tallo también se requieren (Landsberg & Waring, 1997) y pueden obtenerse de valores de bibliografía. En la sección Anexos se presenta además la lista de factores que utiliza el modelo 3-PG junto con su significado y el carácter de obligatoriedad del mismo.

Landsberg y Waring (1997) señala que el modelo (Figura 10) calcula la producción primaria bruta desde la radiación utilizable fotosintéticamente activa absorbida y del coeficiente de eficiencia del dosel. La radiación mencionada se obtiene reduciendo el valor de la radiación fotosintéticamente activa mediante valores determinados por factores modificadores-adimensionales que varían entre 0 y 1. Los modificadores reflejan las limitantes impuestas en la utilización de la radiación por las hojas debido al cierre estomático, causado a su vez por los altos déficit de presión de vapor; la sequía del suelo definida por la razón entre la cantidad de agua en la zona de las raíces y la cantidad máxima posible de agua; o los efectos de las temperaturas bajo cero. La razón entre producción primaria bruta y neta es un valor relativamente constante para árboles. Para calcular la cantidad de carbono localizado bajo suelo se utilizan relaciones simples entre el crecimiento y movimiento de las raíces y los efectos de las condiciones de crecimiento en ellas, mientras que para determinar la asignación del carbono en follaje y fuste se utilizan ecuaciones basadas en coeficientes alométricos ampliamente disponibles para muchas especies.

El modelo 3-PG calcula la producción de biomasa basado en el concepto de que las hojas hacen crecer a los árboles y que la eficiencia con que la radiación se convierte en biomasa depende de las condiciones ambientales (S_1). Estos modificadores según Flores (2004) reflejan las limitaciones del follaje a la utilización de la radiación, dichas limitantes corresponden al cierre de los estomas debido a la falta de agua en el suelo o al alto déficit de presión de vapor por la temperatura y heladas. El modelo utiliza la ley de Beer para determinar la cantidad de radiación solar interceptada por el dosel donde es relevante el índice de área foliar o IAF, este índice representa la relación del área proyectada por las hojas respecto al área del suelo, por lo cual a mayor área foliar, mayor absorción de radiación y por tanto, mayor producción de biomasa (Flores, 2004). Posteriormente este valor es multiplicado por la eficiencia en el uso de la luz ajustada por los modificadores ambientales para obtener la producción primaria bruta (S_2) y se multiplica por un factor que descuenta la respiración del árbol para así calcular la productividad primaria neta.

$$\alpha_C = f_T f_H f_F \min\{f_{DPV}, f_{AS}\} \alpha_{Cx} \quad (S_1)$$

Donde:

- α_C : Eficiencia en el uso de la luz (gMj^{-2})
- α_{Cx} : Eficiencia máxima en el uso de la luz (gMj^{-2})
- f_T : Modificador de Temperatura
- f_H : Modificador de Heladas
- f_F : Modificador de Fertilidad
- f_{DPV} : Modificador de Déficit de presión de vapor
- f_{AS} : Modificador de agua del suelo

$$P_b = \alpha_c (1 - e^{-kL}) Q_0 \quad (S_2)$$

Donde:

- P_b : Producción bruta ($\text{ton ha}^{-1} \text{a}^{-1}$)
 α_c : Eficiencia en el uso de la luz (gMj^{-2})
 k : Coeficiente de extinción de la luz
 L : Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
 Q_0 : Radiación solar fotosintéticamente activa ($\text{MJm}^{-2} \text{día}^{-1}$)

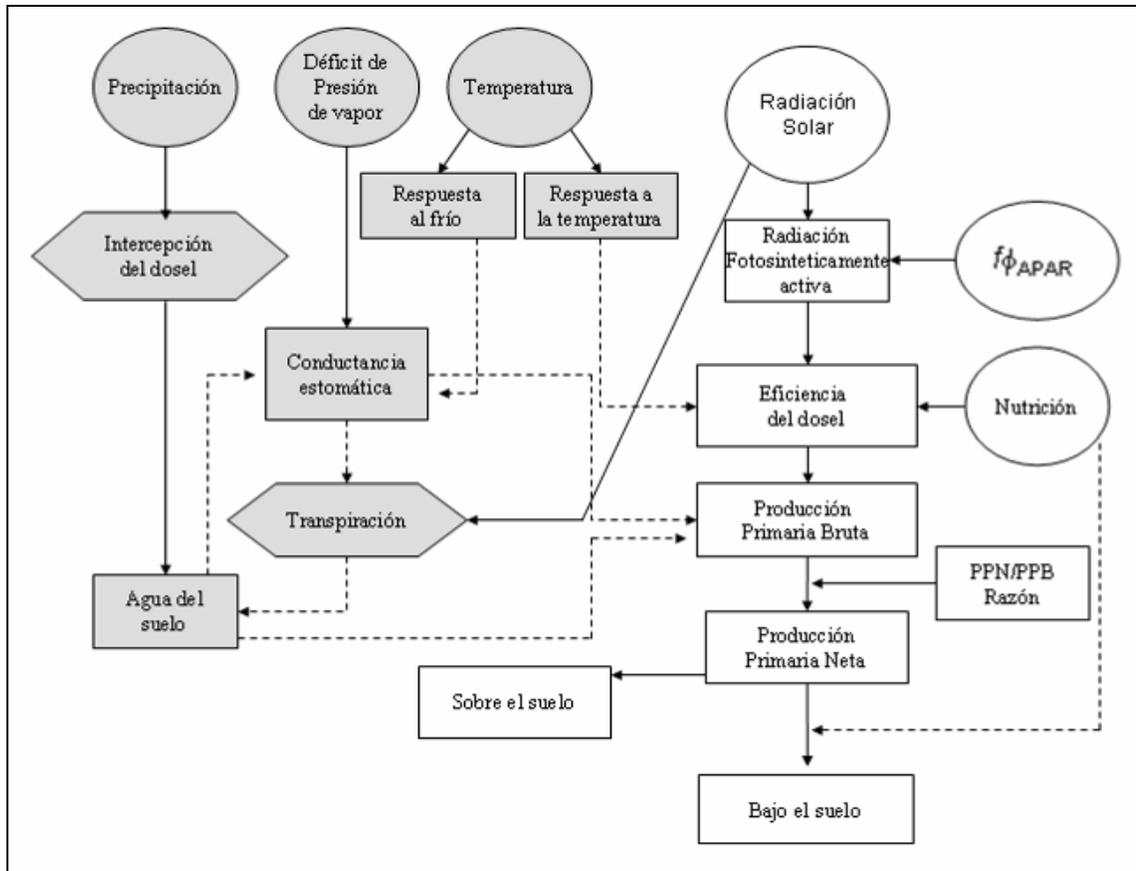


Figura10: Diagrama de flujo del modelo 3-PG.

Fuente: (Rodríguez *et al*, 2003).

IV.2.c Información climática

La información que se requirió para realizar este estudio corresponde a:

- Información climática observada: registros climáticos proporcionados por la empresa Bioforest S.A. para 38 estaciones ubicadas en la zona de estudio y que corresponde a precipitación mensual, temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual, con sus respectivas coordenadas geográficas y altura de la

estación de registro. Cada registro abarca el período entre noviembre de 1981 y diciembre de 2002.

- Radiación solar: información sobre la radiación solar mensual de las 38 estaciones de la zona de estudio. La información fue recopilada desde el Atlas Agroclimático de Chile (Santibañez, 1993) y del Mapa Agroclimático de Chile del INIA (1989).
- Información climática modelada: datos climáticos simulados por el modelo PRECIS, que corresponden a la precipitación mensual, temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual, radiación para cada escenario proporcionado por PRECIS, es decir, para la línea base (entre los años 1960 a 1990), el clima futuro (2071-2100) para un escenario severo de emisiones A2 y un escenario moderado de emisiones B2. Las series climáticas se presentan en meses de 30 días y sin la existencia de años bisiestos.

Las 38 estaciones corresponden a diferentes áreas en que se pueden desarrollar plantaciones forestales de *Pinus radiata* y se encuentran razonablemente distribuidas en la región de estudio, de manera de representar la variabilidad climática y topográfica existente. A continuación se presenta un mapa de la zona de estudio (Figura 11), además de un mapa con la ubicación exacta de las 38 estaciones, lo que permitirá comprender los resultados obtenidos que se expresan por número de la estación (Figura 12).

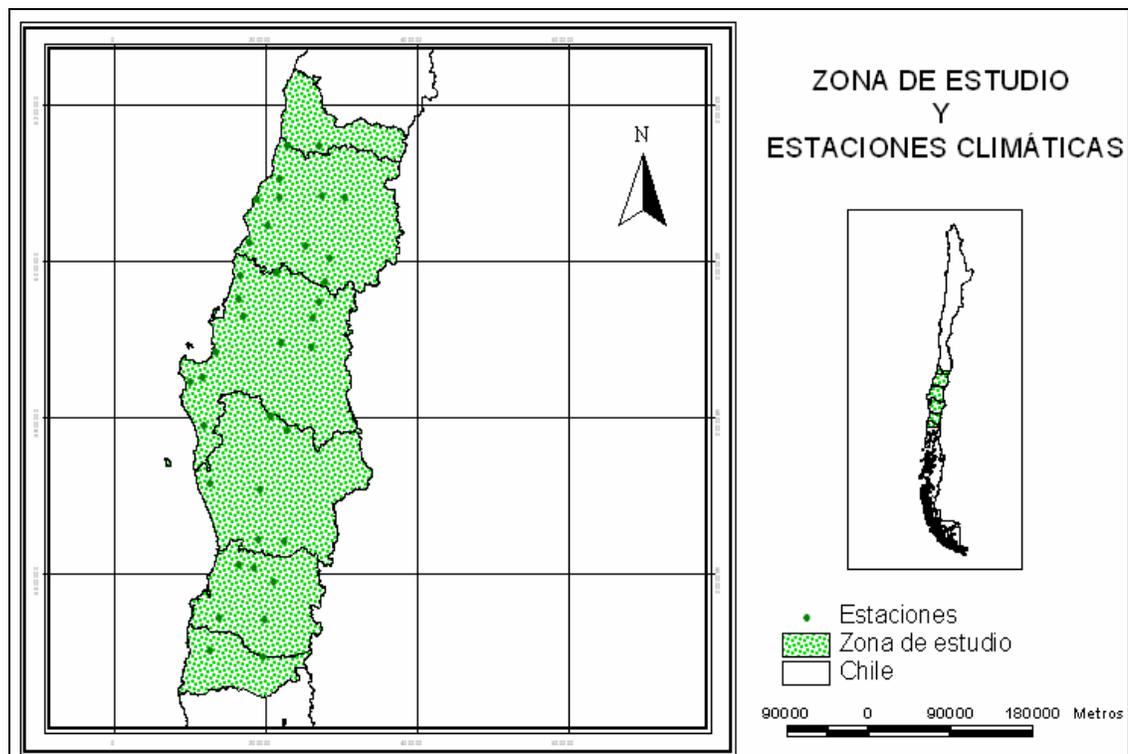


Figura 11: Zona de estudio y estaciones climáticas.

Fuente: Elaboración propia.

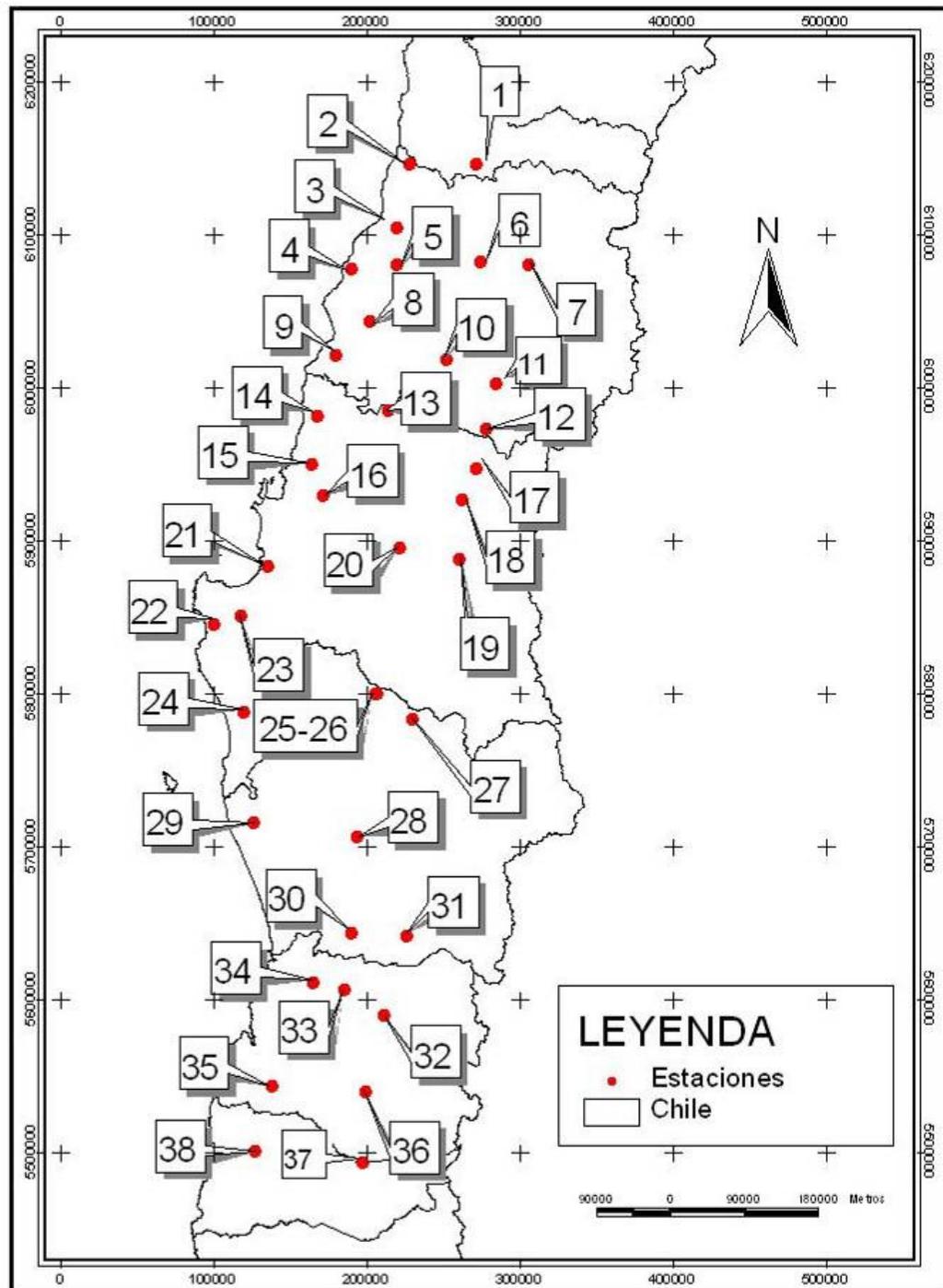


Figura 12: Ubicación e identificación de estaciones.
Fuente: Elaboración propia.

IV.3. Metodología

Los dos primeros objetivos planteados contemplaron una búsqueda bibliográfica de información relevante sobre la industria forestal y de la especie de interés. Esta búsqueda se realizó entre las principales instituciones forestales como el Instituto Forestal, la Comisión Nacional de la Madera y algunas de las bibliotecas universitarias (Universidad de Chile, Universidad Católica, Universidad Austral). También se realizó una visita a los terrenos de Bioforest S.A. en Concepción donde el Señor Gonzalo Carrasco explico el funcionamiento del modelo 3-PG. Respecto a la industria forestal, se incluyó la información sobre superficie plantada, procesos realizados, historia del sector, mercados, etc. Por otro lado, en cuanto a los requerimientos ambientales se buscó información principalmente sobre los rangos de tolerancia a variables climáticas y de suelo que influyen en el crecimiento de la especie.

Para validar el uso del modelo PRECIS para generar las variables de entrada al modelo 3-PG, primero se debió evaluar la simulación del clima actual de PRECIS, esto con el propósito de conocer si el modelo simula correctamente el comportamiento de las variables climáticas, así como la variabilidad espacial de las mismas. En base a lo anterior, se utilizó la información climática de las 38 estaciones proporcionadas por Bioforest S.A. para comparar con las proyecciones de PRECIS. Este procedimiento se realizó en una primera etapa interpolando los datos del modelo a las coordenadas de las estaciones, debido a que el modelo presenta una grilla de 25km² las estaciones pueden encontrarse dentro de la misma grilla y por ende, tener asociados los mismos datos climáticos. La interpolación utilizada corresponde a una interpolación lineal y esta representada en MatLab por la función “*interp2*”.

Debido a la topografía del modelo, suavizada a 25km, PRECIS no contempla formaciones geográficas de menor escala (por ejemplo: cerros en valles intermedios) las que pueden producir variaciones en la temperatura. Para solucionar este hecho se procedió a corregir la temperatura de cada estación en base al hecho que se puede aproximar la variación en altura de la temperatura a la siguiente relación: la temperatura disminuye 6°C por cada kilómetro de incremento en altura (Lapse rate), por lo tanto las temperaturas máximas y mínimas interpoladas se corrigen bajo la razón [6°C/km]. Esto se calculó mediante la diferencia entre la altura del modelo y la altura real de la estación multiplicada por la razón mencionada, es decir, al ser el delta entre alturas positivo la temperatura aumenta a la razón indicada y por el contrario, al ser negativo disminuye. Además de esto se realizó una corrección en cuanto a unidad ya que el modelo PRECIS y 3-PG trabajan con unidades de temperatura y precipitación diferentes. La unidades de trabajo de cada modelo son: temperatura, Kelvin para PRECIS y Celsius para 3-PG; precipitación, milímetros por segundo (mm/seg) y milímetros al mes (mm/mes) respectivamente.

Posteriormente, con los datos de las estaciones de PRECIS corregidos se calcularon las climatologías, percentiles e histogramas de datos observados y simulados para cada estación. Las climatologías permiten observar el comportamiento del clima de un año

promedio, y por lo mismo al compararlas permitió determinar si el modelo PRECIS simula correctamente el comportamiento climático de una determinada variable. Por otra parte, los percentiles representan los valores de la variable que son inferiores a un porcentaje determinado; los histogramas representan la frecuencia de los valores de una serie de datos en barras verticales y ambos permiten estudiar la variabilidad interanual de las estaciones. En este caso particular las climatologías permitieron comparar el comportamiento anual del clima, en cambio los histogramas y percentiles comparan la distribución de los datos mensuales, en cuanto a su magnitud y frecuencia.

Las climatologías se realizaron calculando el promedio mensual de la variable climática, en los datos PRECIS se dispuso de un período de 30 años de datos y para los datos reales de 21 años. En relación a los percentiles e histogramas se necesitó la información mensual para un período de igual longitud entre la información de PRECIS y la información observada, es decir, 21 años. Los histogramas de temperatura se representaron separando primavera/verano de otoño/invierno para observar la variación interanual de la variable, mientras que el histograma de precipitación se realizó en base al total anual de precipitaciones caídas por estación, esto debido a que es más comparable la cantidad de precipitación anual que cae en una zona que la cantidad mensual. Las funciones utilizadas en estos procedimientos fueron “*plot*”, “*prctile*” y “*histc*” para climatología, percentil e histograma respectivamente. Se debe mencionar que los programas utilizados para obtener estos datos se encuentran en la sección Apéndice 9.

En los pasos anteriores se evaluó la simulación del clima actual en contraste con los datos climáticos observados, pero estos métodos permiten un análisis basado en la observación visual de gráficos, por lo cual, para fortalecer el análisis de consistencia se realizó la correlación cruzada entre los datos PRECIS y las estaciones. La correlación cruzada mide la fortaleza de la relación entre variables dependientes del tiempo en determinados desplazamientos de tiempo (Castaño, 2008), es decir, entrega una comparación estadística entre dos secuencias como función del tiempo (Hinton, s. a.). Por lo mismo, su resultado corresponde a un vector de largo dos veces el largo de los vectores a analizar (2M), y representa la correlación entre las variables a distintos tiempos o lags. Existe además la opción de expresar la correlación cruzada como coeficiente haciendo la correlación a tiempo cero, es decir, con $\text{lag}=0$ lo que corresponde a calcular el coeficiente de correlación de Pearson (Hinton, s. a.). En base a esto, la correlación se calculó para cada variable para un período delimitado de tiempo, en donde tanto PRECIS como las estaciones tuvieran datos. Este periodo corresponde a los meses entre noviembre de 1981 y noviembre de 1990, contabilizando 109 valores. Posterior al cálculo de la correlación se realizó una prueba de significancia del coeficiente empleando la T de Student.

Para concluir la validación de PRECIS, se utilizaron los datos simulados y observados como datos de entrada en el modelo 3-PG para las 38 estaciones. Los datos de radiación fueron obtenidos de la información bibliográfica mencionada anteriormente ubicando la estación en los mapas respectivos y asumiendo la clasificación de cada una de las fuentes se consideró la radiación promedio mensual. La radiación se consideró constante para todos los años de evaluación de 3-PG debido a que esta no presenta notorias variaciones en el

tiempo.

El modelo 3-PG se corrió para un período de 20 años, por ser ésta la edad mínima de rotación en Chile para la especie estudiada y debido a que se tenían los datos observados para este período de tiempo. Los datos iniciales de sitio y de las condiciones de la planta fueron facilitados por Bioforest S.A. Los valores de estos factores se presentan a continuación, al igual que una breve explicación de los mismos, además de esto en Anexos se incluye una imagen de la interfase de trabajo del programa. Se especifica que la latitud es el único factor modificable de los datos de inicio, debido a que esto depende de la estación en que se evaluará 3-PG.

Cuadro 03: Factores iniciales y de sitio del modelo 3-PG.

FACTOR	VALOR	COMENTARIO/FUENTE
Year planted	Año	<ul style="list-style-type: none"> Este valor representa el año desde que se empezara a estimar la producción, variará dependiendo del escenario a evaluar [1] [3].
Month planted	June	<ul style="list-style-type: none"> Mes en que se realiza la plantación de la especie [3]
Initial year	0	<ul style="list-style-type: none"> Debido a que se parte como una plantación recién establecida [2].
Initial month	June	<ul style="list-style-type: none"> Mes desde el cual se iniciara las estimaciones de 3-PG.
End age	20-25	<ul style="list-style-type: none"> Edad final, corresponde a la edad en que se hará la rotación de árboles [3]. La corta final se realiza entre los 20 y 30 años. Se extraen los fustes hasta un diámetro de 7 a 10cm [4]. Al evaluar las productividades entre PRECIS y los datos observados se utilizó 20 años, debido a ser la extensión de los datos observados.
Initial WF (peso follaje)	0.02291	<ul style="list-style-type: none"> Valor en $t\ ha^{-1}$, corresponden al valor promedio de una planta de pino radiata a la edad de ser plantada, es decir, el peso seco que tiene una planta al salir del vivero [2].
Initial WR (peso raíz)	0.01146	
Initial WS (peso fuste)	0.01146	
Initial stocking	1111	<ul style="list-style-type: none"> Cantidad de árboles por hectárea. La densidad inicial de plantación varía entre 1.000 y 1.600 árboles/ha., siendo lo más usado 1.250 a 1.300 árboles. Esta densidad luego disminuye debido al raleo realizado para favorecer el crecimiento [4].

(continúa)

Cuadro 03: (continuación) Factores iniciales y de sitio del modelo 3-PG.

FACTOR	VALOR	COMENTARIO/FUENTE
Initial ASW (agua disponible en el suelo)	300	• Valor en mm, al ser el mismo para todas las estaciones permite aislar el factor del suelo y ver la variación solamente por el clima [2].
Latitude	Variable	• Este valor es el único variable de los factores de inicio del programa, y depende de la estación a evaluar.
Fertility rating	1	• Fertilidad del suelo; este factor adquiere valores entre 0 y 1, siendo 0 cuando más influye y 1 cuando menos influye en las ecuaciones [1] [2].
Soil clas ¹ s	CL	• Clase de suelo Clay Loam [1], que significa franco arcilloso y representa un buen factor referencial para toda la zona de evaluación de 3-PG.
Maximum ASW	300	• Cantidad máxima y mínima de agua disponible en el suelo [1].
Minimum ASW	0	• La ASW es importante ya que las precipitaciones se concentran en invierno cuando la evapotranspiración es baja. Por lo tanto, mientras más agua almacene el suelo en invierno, más tarde se produce el estrés hídrico que influye en el cierre de los estomas y reduce la eficiencia fotosintética [5].

Fuente: [1] (Landsberg, 1997); [2] (Gonzalo Carrasco, 2009 mediante comunicación personal); [3] (archivo 3-PG Help incluido en el modelo 3-PG), [4] (Gestión Forestal, 2009), [5] (Flores, 2004).

Las estimaciones obtenidas para cada estación se compararon entre el clima actual observado y modelado mediante la utilización de gráficos, en los cuales se contrastaron los resultados para la biomasa del fuste (en 3-PG denominada StemDM en $t_{DM}ha^{-1}$) que corresponde a la materia seca del fuste, es decir, la madera; y el volumen del rodal a la edad de rotación (en 3-PG Stand Volume en m^3ha^{-1}). Lo que se observó es si las curvas presentaron similitud en cuanto a su forma y valores, principalmente en el valor final, que indica la cantidad de materia disponible en el momento de la tala. De ser similares los resultados entre ambos tipos de datos, es posible afirmar que los datos modelados por PRECIS simulan adecuadamente el clima actual y permiten, por lo mismo, obtener valores similares de productividad para *Pinus radiata* en el modelo 3-PG.

Se mencionó anteriormente que en el crecimiento de los árboles influyen diversos factores climáticos, por lo mismo se realizó un análisis de sensibilidad con el modelo 3-PG, con el objetivo de identificar las variables climáticas determinantes para el modelo. Para lo cual se seleccionaron al azar ocho estaciones de las 38 evaluadas, las cuales se re-evaluaron en 3-PG con la diferencia de que una de las variables climáticas se aumento y disminuyó en un

cierto porcentaje manteniendo fijos los demás. Los porcentajes de aumento corresponden a un 10% y a un 30%, siendo los mismos para la disminución. Por lo tanto, toda la serie climática mensual se aumentó o disminuyó en los respectivos porcentajes. Esto permitió identificar las variables climáticas que limitan o potencian el crecimiento del pino en el programa 3-PG.

Finalmente, sabiendo como simula PRECIS el clima, se procedió a correr en 3-PG los datos de toda la zona de estudio para los dos escenarios futuros proyectados por el modelo climático PRECIS. Para esto se extrajeron de PRECIS los datos referidos a la zona de estudio, donde los límites norte-sur de la zona de estudio se definieron en base a las coordenadas de las estaciones, mientras que en el sentido este-oeste se abarcó todo el ancho del país. A los datos extraídos se les realizó la corrección de unidades, incluyendo la radiación de $[W/m^2]$ en PRECIS a $[Mj/m^2/día]$ para 3-PG. Luego de estos procedimientos, se obtuvo una grilla de la zona de estudio con los datos PRECIS para el clima actual, el clima futuro A2 y B2 con los datos en las unidades respectivas para el modelo 3-PG. Posteriormente los datos climáticos de cada cuadro de la grilla se evaluaron en el modelo 3-PG, rescatando del programa la biomasa del fuste y el volumen del rodal según la edad del rodal. Los resultados obtenidos se usaron para confeccionar mapas de biomasa y volumen de la zona de estudio para cada escenario climático de PRECIS. Los mapas fueron realizados a la edad de 25 y 20 años, lo que permitió conocer la situación a la edad donde ocurre la tala de los árboles. Para evaluar si existe algún cambio en la productividad respecto al clima actual se procedió a calcular la diferencia entre la productividad de un escenario futuro y la productividad obtenida para el clima actual. Esto se representó en un mapa donde se indican las diferencias porcentuales para la zona de estudio.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1 El Bosque y el sector forestal

El bosque es un recurso natural que tiene diversas definiciones según el enfoque del definidor, por ejemplo, en un sentido ecológico corresponde a una comunidad biológica de plantas y animales que existen en interacción con el ambiente inerte (Young, 1991), pero para sectores económicos la definición de bosque pasa por el interés en el recurso, es así como la FAO (INFOR, 2005) considera tanto los bosques naturales como las plantaciones forestales dentro de la misma definición. Por lo cual, los bosques corresponden a un sitio poblado de especies vegetales con predominancia de árboles y de una superficie igual o mayor a 5.000m², con árboles de una altura mínima de cinco metros y donde no existan otros usos de suelo dominante, además se incluyen bosques con fines de producción, protección, conservación y usos múltiples. Por otra parte, en la ley chilena de bosques se consideran como bosque un sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 metros cuadrados, con un ancho mínimo de 40 metros, con cobertura de copa arbórea que supere el 10% de dicha superficie total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables (BCN, 2008).

El sector forestal es definido por el Instituto Nacional de Estadísticas (2007)₁ como aquel sector que *“comprende todas las operaciones para regenerar, explotar y proteger los bosques, además de la recolección de sus productos, es decir, la plantación, replante, transplante, conservación de bosques y zonas forestadas y la explotación tanto de bosques nativos como de las plantaciones”*; definición similar a la de Cerda (1998), pero con la salvedad que éste incluye no solo las operaciones para obtener madera sino que también los servicios y infraestructura que permite el funcionamiento del sector, también aclara que corresponde a una actividad económica, por lo cual se perciben retornos. La definición de Cerda es: *“el conjunto de actividades económicas cuya estructura interna y relaciones con el sistema económico social y ambiental se encuentran determinadas en diversos niveles de importancia relativa, desde la cosecha forestal y la industrialización de los productos forestales, hasta sus respectivos servicios e infraestructura”*.

El sector forestal tiene una historia de vida de no más de 60 años; al inicio de la década del 50 la explotación sólo se realizaba sobre bosque nativo y las técnicas e inversiones sobre las plantaciones eran mínimas. Posteriormente, se incentiva la modernización de las técnicas y de los procesos productivos e industriales al introducirse las plantas de tableros y pulpa que trabajan con plantaciones de *Pinus radiata*. Según el trabajo de Solórzano (2007) Katz, Stumpo y Varela mencionan que *“la actividad forestal ha presentado a lo largo del tiempo distintas características en su producción, así como en el uso y extensión de sus plantaciones”*, por lo cual es posible identificar cuatro períodos en la actividad forestal nacional (Cuadro 04).

Cuadro 04: Descripción de los periodos del sector forestal.

Período	Descripción
1930 a 1974	Este período se inicia con la “Ley de Bosques” (D.S. N°825), que constituye el primer documento legislativo forestal y que exime de todo pago de impuesto por 30 años a los propietarios de terrenos forestales y donde se promovió la creación de empresas forestadoras que aumentaron la superficie plantada a 300.000 ha. En un principio basada principalmente en la producción de madera aserrada de bosques naturales y están orientadas a satisfacer el mercado interno con escaso nivel de exportación, en promedio US\$27 millones/año. CORFO impulsa la creación de las primeras plantas de celulosa y papel. A partir de 1965 el consumo de especies nativas decrece aceleradamente y las plantaciones de <i>Pino radiata</i> son la fuente principal de la industria forestal. Se introducen entonces, cambios tecnológicos y unidades de producción con mecanización de los procesos, lo que produce un aumento en los rendimientos y mayor volumen de madera aserrada llegando al millón de m ³ para el '70. El destino de las exportaciones era en su mayor parte hacia Argentina con un 15% de su producción. Entre los productos generados se encuentra la pulpa, tableros y chapas.
1974 a 1984	Comienza con la promulgación del decreto ley N°701 con el propósito de abastecer con materia prima la industria forestal mediante un incentivo directo a la plantación de terrenos de aptitud forestal. Este decreto establece la absoluta inexpropiabilidad de terrenos forestales y una bonificación de hasta un 75% del total de los costos de producción de forestación y manejo de la plantación de bosques introduciendo exenciones y reducciones de impuestos territoriales y de utilidades derivadas de la explotación de bosques naturales y artificiales. Este decreto produjo un aumento en las plantaciones forestales comerciales y, se produce un aumento desde un 4% a un 10% en la participación del sector en las exportaciones nacionales. A esto contribuyó una política económica y forestal orientada a minimizar el riesgo a largo plazo que posee el desarrollo de las plantaciones. Entre 1973 y 1976 las plantaciones aumentaron en una tasa promedio anual de 50%. También se privatizan las empresas de celulosa y papel. Las exportaciones aumentan a US\$277 millones/año.
1985 a 1992	En los 90, la industria se establece como el segundo sector de la economía chilena tras la minería alcanzando una tasa promedio de crecimiento de un 6,4% y un aumento de la superficie plantada de 1.850.000 ha. en aproximadamente 25 años. Se generan importantes inversiones en el sector con la entrada en operación de las plantas Celulosa Pacífico, Arauco 2 y Santa Fe y el aumento de las exportaciones de pulpa química de 665 a 1.210 miles de toneladas entre 1991 y 1992. En esta época se restringe la oferta especialmente de bosques tropicales principalmente por razones ecológicas y ambientalistas y con el argumento de dar mayor valor agregado a las materias primas. En esta situación Chile posee la mayor ventaja comparativa, ya que tiene disponibilidad de suelos de aptitud forestal, especies de rápido crecimiento que se encuentran adaptadas a las condiciones del país.

(continúa)

Cuadro 04: (continuación) Descripción de los periodos del sector forestal.

Período	Descripción
1992 a 2007	Este período se caracteriza por la internacionalización de las inversiones de las empresas forestales, dirigida a comprar plantas y a ampliar la superficie plantada en Uruguay, Perú y Argentina. Surge mayor preocupación por la responsabilidad social y ambiental del sector, materializándose en certificaciones, creación de fundaciones y en la suscripción de acuerdos de producción limpia. Las exportaciones alcanzan en promedio unos US\$2.100 millones. En el segundo semestre de 1996 se produce una caída de los precios de la celulosa, lo que provoca una contracción del ritmo de crecimiento de la actividad forestal, junto a esto cae el tipo de cambio y hay un alza de los costos internos, a lo que se suma la inestabilidad legal. La crisis financiera de Japón y Corea compromete las exportaciones, debido a que casi la mitad de la oferta exportable es dirigida a esos mercados.

Fuente: Elaboración propia en base a: Solórzano (2007); Cerda (1998); Fresno y Orella (1995); Bordeu (1998).

Lo primero a considerar dentro de la estructura del sector forestal, es la superficie forestal, Chile posee un total de 0,4% de los bosques del mundo y un 1,7% de los de América del Sur (INFOR, 2005); en cuanto al total superficial de Chile, un tercio del territorio tiene aptitud silvoagropecuaria, del cual 11,6 millones de hectáreas presentan aptitud forestal (INE, 2007)¹. Para el año 2004 la superficie forestal alcanzó un 20.5% del total nacional donde el 17.7% es bosque nativo y el 2.8% corresponde a plantaciones forestales (Solórzano, 2007). La tasa de plantación ha aumentado en función del tiempo, desde unas 95 mil hectáreas promedio en las dos últimas décadas del siglo XX hasta unas 117 mil hectáreas promedio en los cinco primeros años del siglo XXI (INFOR, 2005). Los bosques plantados son en un 100% de propiedad privada al igual que en el caso del bosque natural, exceptuando el Sistema de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE); las sociedades anónimas u otras sociedades formales que poseen el 64%, mientras que las instituciones fiscales y municipales un 19%, los productores individuales un 17% y las comunidades indígenas tienen el 0,4%.

Las plantaciones de Pino (*Pino radiata* y *Pino oregón*) y de varias especies de la familia Eucalyptus, como *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus*, son la materia prima principal en las que el sector forestal basa su producción. En cuanto a la superficie efectiva plantada obtenida en el Censo Nacional Agropecuario y Forestal (INE, 2007) se puede apreciar el valor exacto en hectáreas en el Cuadro 05. Se observa en el cuadro que la especie *Pino radiata* supera notablemente la superficie de las demás especies, debido a que es la principal especie del sector forestal. Algunas características productivas de la especie que le confieren la supremacía en el sector son que posee una gran variedad de usos, destacando la pulpa, papel, combustible y usos estructurales; los cambios dimensionales debido a la variación de humedad son casi insignificantes, lo que le da gran estabilidad estructural y diversidad de usos (Riquelme, 2004); la tendencia en las tasas de plantación se mantiene con más de medio millón plantada y la industria consume anualmente alrededor de 18.369

millones de m³ de pino radiata.

Cuadro 05: Superficie (ha) nacional plantada según especie forestal

<i>Eucaliptus nitens</i>	<i>Eucaliptus globulus</i>	<i>Pino radiata</i>	<i>Pino oregón</i>
239.456,28	655.859,80	1.614.015,75	44.718,35

Fuente: (INE, 2007).

En cuanto a la ubicación de las plantaciones forestales, éstas se presentan en la mayoría de las regiones de Chile, desde la Región de Atacama hasta la Región de Los Ríos, pero la concentración de las plantaciones forestales se encuentra en las regiones VII a X, siendo la VIII región la que presenta la mayor superficie plantada tanto de pino como de eucaliptos (Figura 13). También se observa en esta figura que la superficie plantada en la VIII región es de alrededor de 650 mil hectáreas las cuales se diferencian también por especie dentro del género *pinus*, siendo en todas las regiones mayor la superficie destinada a *Pino radiata* que a *Pino oregón* con la excepción de la región de Aysén que presenta a esta última especie como dominante dentro de las plantaciones (Figura 14), además se evidencia que la diferencia en la superficie plantada es considerablemente alta, no superando las 20.000 hectáreas por región para *Pino oregón*, mientras que *Pino radiata* se acerca y en la mayoría de las regiones superada ampliamente las 100.000 hectáreas plantadas.

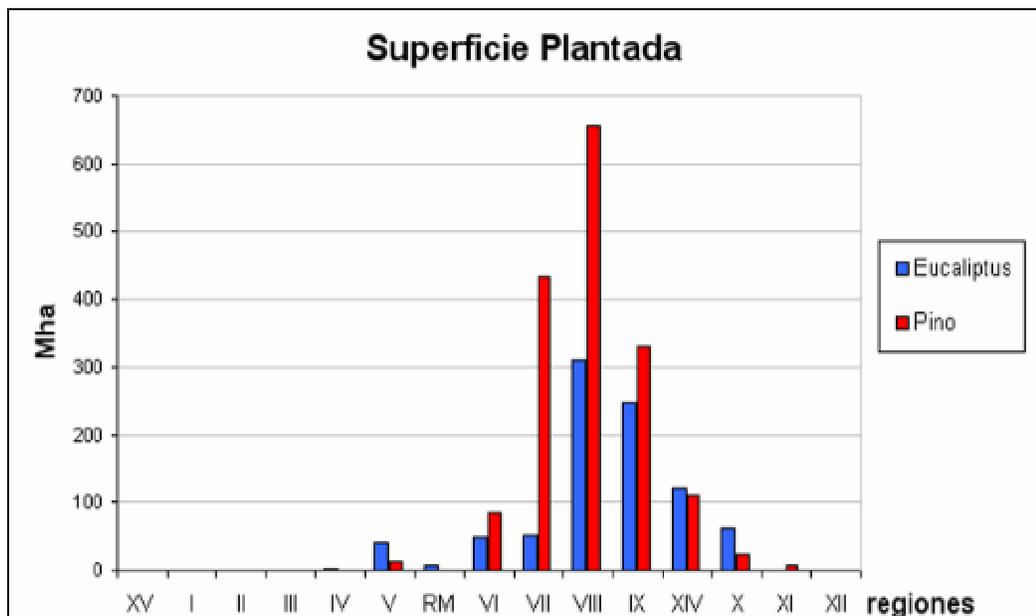


Figura 13: Superficie plantada por región y por género.

Fuente: Elaboración propia en base a (INE, 2007).

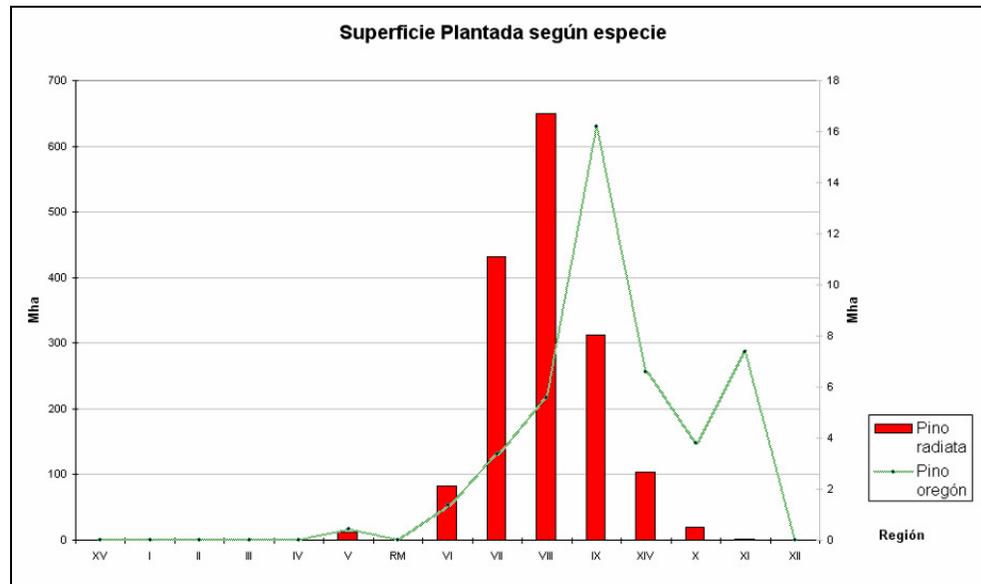


Figura 14: Superficie plantada por región y por especie.

Fuente: Elaboración propia en base a (INE, 2007).

El Cuadro 06 presenta la distribución de las plantaciones de *Pino radiata* según el tipo de propietario y la edad de los árboles, se observa en el mismo cuadro que las mayores superficies plantadas se concentran en propiedades privadas, es decir, en empresas forestales; además se destaca el hecho de que las plantaciones jóvenes de pino no concentran las mayores superficies, este hecho se explica principalmente por la conducta de los medianos y pequeños empresarios de reforestar con eucalyptus luego de cosechar *Pino radiata* (INFOR, 2006). La clasificación de los propietarios de acuerdo al tamaño mencionada en el trabajo de Cerda (1998) menciona que los grandes propietarios son aquellos que poseen sobre las 5.000 ha. plantadas, mientras que los medianos se encuentran entre las 4.999 y 1.000 ha. y finalmente los pequeños propietarios cuentan con menos de 1.000 ha. plantadas.

Cuadro 06: Superficie en hectáreas de pino radiata según propietario y edad.

Edad	Tipo de propietario			Total
	Empresas	Medianos	Pequeños	
0 a 4	217.181	32.213	38.724	288.118
5 a 9	257.368	47.478	52.056	356.902
10 a 14	214.026	50.776	54.704	319.506
15 a 19	156.984	41.585	44.973	243.543
20 a 24	126.643	28.086	23.756	178.485
Mayor a 25	24.732	14.798	9.556	49.087
Total	996.934	214.936	223.769	1.435.639

Fuente: (INFOR, 2005)₁.

El aporte del sector forestal a la economía nacional corresponde al segundo entre los

sectores de recursos naturales, después del cobre, esto medido por el valor bruto de la producción. El mercado forestal ha entregado aportes económicos al país durante más de 10 años, manteniendo un alza sostenida en el balance entre importaciones y exportaciones, se observa en la Figura 15 que tanto las exportaciones como importaciones han presentado una constante alza aún en períodos de crisis económica nacional o internacional; además se desprende que la producción nacional satisface las necesidades de la industria lo que explica las bajas tasas de importaciones.

Las importaciones durante el 2008 alcanzaron un monto de US\$1.232 millones lo que superó en un 10,7% al monto del año 2007. Los principales productos importados por Chile corresponden a papeles, cartones y sus derivados, algunos productos de madera para construcción (principalmente tableros para pisos), tableros y chapas. El aumento que se evidenció comparativamente entre los años mencionados se debe a que el sector de la construcción presentó un alto índice de edificación el que se mantuvo casi todo el año, decayendo en los últimos meses, pero manteniéndose en valores positivos hasta agosto del 2008 (Cámara Chilena de Construcción CCHC, 2009). Los mercados de origen de las importaciones son encabezados por Estados Unidos, siendo el sector de papeles el principal con un 79% del valor importado, también se importa de mercados como Brasil (principal proveedor de muebles a Chile) y Argentina.

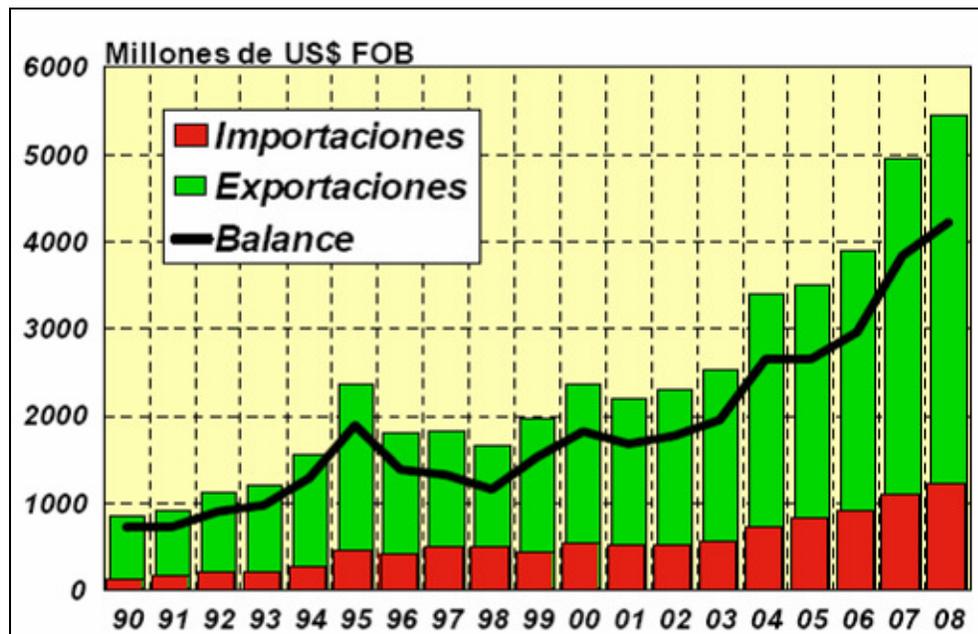


Figura 15: Balance exportaciones/importaciones desde 1990.

Nota: FOB= Free on Board, sigla empleada en comercio para indicar que el vendedor esta obligado a poner la mercancía en el punto de embarque listo para el envío. Siendo el vendedor el encargado de los gastos, riesgos y derechos hasta que la mercadería haya pasado la borda del barco, excluyéndose el flete.

Fuente: (INFOR, 2009).

En cuanto a las exportaciones, éstas significan casi dos tercios de la actividad económica del sector forestal, por lo cual son afectadas por la economía mundial y la situación de los principales mercados. En la Figura 15 se observan las exportaciones desde el año 1990 al 2008, período en el cual se mantuvo un crecimiento sostenido de las mismas, notándose la crisis de 1996 mencionada anteriormente, además se aprecia que las exportaciones desde el año 1990 hasta el 2005 se han triplicado. El año 1995 las exportaciones alcanzaron los 3.000 millones de dólares, cifra que se mantuvo como récord por ocho años, siendo superada el año 2004 por 3.600 millones de dólares. Para el año 2005 las exportaciones cubrieron el 8,8% del total de las exportaciones chilenas con un total de 3.495 millones de dólares (INFOR, 2007). Durante el año 2006 la cifra fue de US\$3.800 millones, mientras que para el año 2008 se produjo un aumento considerable alcanzando los US\$5.452,5 millones, cifra que superó en un 10,1% a las exportaciones del 2007 (INFOR, 2008).

Entre los principales mercados con los cuales se comercian los productos forestales nacional se encuentran China, Estados Unidos, Japón, México e Italia, variando el orden cada año, en la Figura 16 se muestran los principales mercados de las exportaciones forestales para el año 2007 y 2008 respectivamente. Los países líderes en el destino de los productos forestales son China y Estados Unidos, con valores cercanos al 15%. La posición de Estados Unidos como principal destino de las exportaciones nacionales, se registra a partir de 1999, China por su parte desplazó a Bélgica en su tradicional tercera ubicación y es la nación que presenta mayores crecimientos como destino de exportaciones en los últimos años (Riquelme, 2004). Además en el figura se observa que son estos dos países también los que han disminuido su participación en el mercado, esto se puede deber a la crisis económica del año 2008 que sigue teniendo repercusiones en el presente. Debido a la crisis económica actual el precio del cobre ha tenido una marcada baja, desde abril del 2008 que presentó un valor de US\$ 3,94/libra hasta noviembre del mismo año que alcanzó los US\$1,69/libra y que ha continuado bajando, lo que ha traído repercusiones en el saldo comercial de Chile. Es en este escenario de crisis económica donde las exportaciones se han visto afectadas, principalmente por la baja en la demanda por parte de los países afectados por la crisis y que a la vez son el destino de las exportaciones chilenas, como lo es el caso de EE.UU. que en el informe del Mercado Forestal elaborado por la INFOR (2008)₁ se menciona que *“ha bajado sus importaciones de madera y sus productos desde un récord de US\$23.800 millones en 2005 a US\$18.700 millones en 2007, mientras que en 2008 llegaron a US\$12.400 millones, con una disminución de 22,5%, si esta tendencia se mantiene representaría una baja cercana al 40% en tan sólo tres años”*.

La baja sostenida que ha experimentado el mercado estadounidense en las importaciones de productos forestales se debe principalmente a las repercusiones de la crisis económica en el sector de la construcción, lo que produce menos necesidad de productos importados para ese sector. El caso de China presenta una leve variación, el aumento de las importaciones desde Chile se relaciona con el aumento de las compras de la pulpa y su precio en alza sostenida en los últimos años, y que entre 2006 y 2007 manifestó una variación de más del 100% principalmente por este motivo. Además en el año 2008 China alcanzó el primer lugar de importadores de productos chilenos debido también por el aumento del precio de la pulpa blanqueada, además según INFOR (2009) Chile logró mantener un nivel de

exportaciones por buscar mercados alternativos a los cuales dirigir sus productos como alternativa del mercado estadounidense.

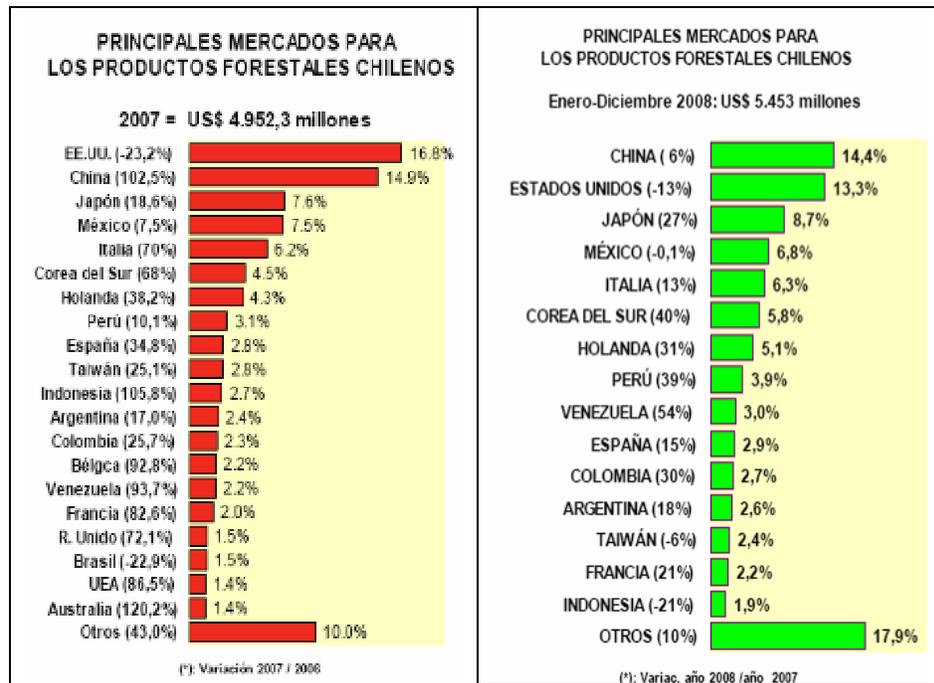


Figura 16: Principales mercados de productos forestales.

Fuente: En rojo: año 2007 (INFOR, 2008); En verde: año 2008 (INFOR, 2009).

Con relación a la estructura de propiedad del sector, ésta en general se encuentra concentrada en grandes empresas, a las que pertenece el 60% de la superficie plantada. Los grupos económicos principales que operan en el complejo forestal chileno son tres: Matte, Angelini y Terranova. El grupo Matte opera en el sector forestal mediante el Holding CMPC (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones), tiene cinco filiales a su mando: Forestal Mininco S.A. con un patrimonio aproximado de 600.000 ha localizadas en la VIII y IX región, CMPC Celulosa S.A., CMPC Papeles S.A., CMPC Productos Tissue S.A. y CMPC Productos de papel S.A. Presenta además inversiones en Uruguay, Argentina y Perú.

El grupo Angelini tiene presencia en el sector forestal a través del Holding COPEC, este grupo tiene casi la totalidad de las acciones de ARAUCO. Las principales filiales de ARAUCO en Chile son: Forestal Arauco S.A, Aserraderos Arauco S.A., Paneles Arauco S.A., Forestal Los Lagos S.A., Bosques Arauco S.A., Forestal Celco S.A., Forestal Valdivia S.A., Forestal Cholguán S.A., Molduras Trupán S.A., además de otras filiales de distribución y servicios logísticos. ARAUCO cuenta con 5 plantas de celulosa, 14 aserraderos, 4 plantas de paneles y 7 plantas de remanufacturas, además de 1,5 millones de hectáreas en superficie distribuidas en Chile, Argentina, Brasil y Uruguay. ARAUCO también posee la filial Bioforest que es la encargada del área investigativa de la empresa.

El grupo forestal Terranova es controlado por el Grupo Nueva y se encuentra presente en Chile, Estados Unidos, Brasil, Argentina, Venezuela, México, Colombia, Centro América y Perú. Opera en el sector a través de las siguientes filiales: Forestal Millalemu S.A. con un patrimonio de 120.000 hectáreas distribuidas entre la VII y IX región, Forestal Tornagaleones S.A., Andinos S.A., Terranova Forest Product Inc., Terranova Internacional S.A., y Masisa S.A., con 295.000 ha de plantaciones (Solórzano, 2007).

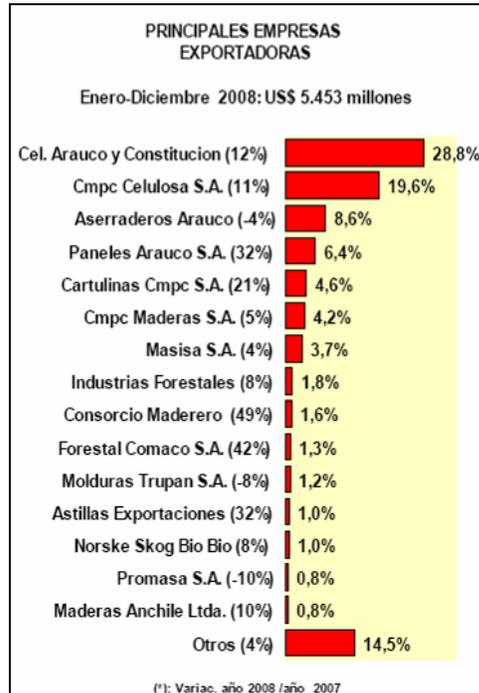


Figura 17: Principales empresas exportadoras.

Fuente: (INFOR, 2009).

Son las empresas del grupo CMPC y COPEC las principales empresas exportadoras que tiene un 87,2% de participación del monto total exportado, el grupo COPEC que concentra las filiales de ARAUCO concentra alrededor del 45% de las exportaciones mientras que el grupo CMPC tiene una participación del 30% (INFOR, 2009). En la Figura 17 se observan las principales empresas exportadoras con su respectivo porcentaje del monto total exportado por el sector.

Las actividades que implica todo el sector forestal se pueden agrupar según Cerda (1998) en: (1) **silvicultura y extracción** que se relaciona al establecimiento, manejo del bosque y la extracción de los productos; (2) **manufactura forestal primaria** que reúne las actividades relacionadas de la conversión química, mecánica o mixta de los productos. Los productos mantienen la condición de bien intermedio. (3) **Manufactura forestal secundaria**, recibe los productos de la manufactura primaria y se caracteriza por ser la de mayor crecimiento en el país donde predomina el concepto de valor agregado por sobre el de volumen de producción. (4) La **manufactura forestal terciaria** produce bienes de uso

final, siendo lo más representativo las imprentas; (5) los **servicios forestales** que corresponden a transportes, comercio, financiamiento, investigación, educación, turismo, servicios ambientales. Finalmente (6) la **construcción en madera**.

Las etapas mencionadas se observan representadas en la Figura 18 que ejemplifica el ciclo forestal y menciona las actividades de cada etapa.

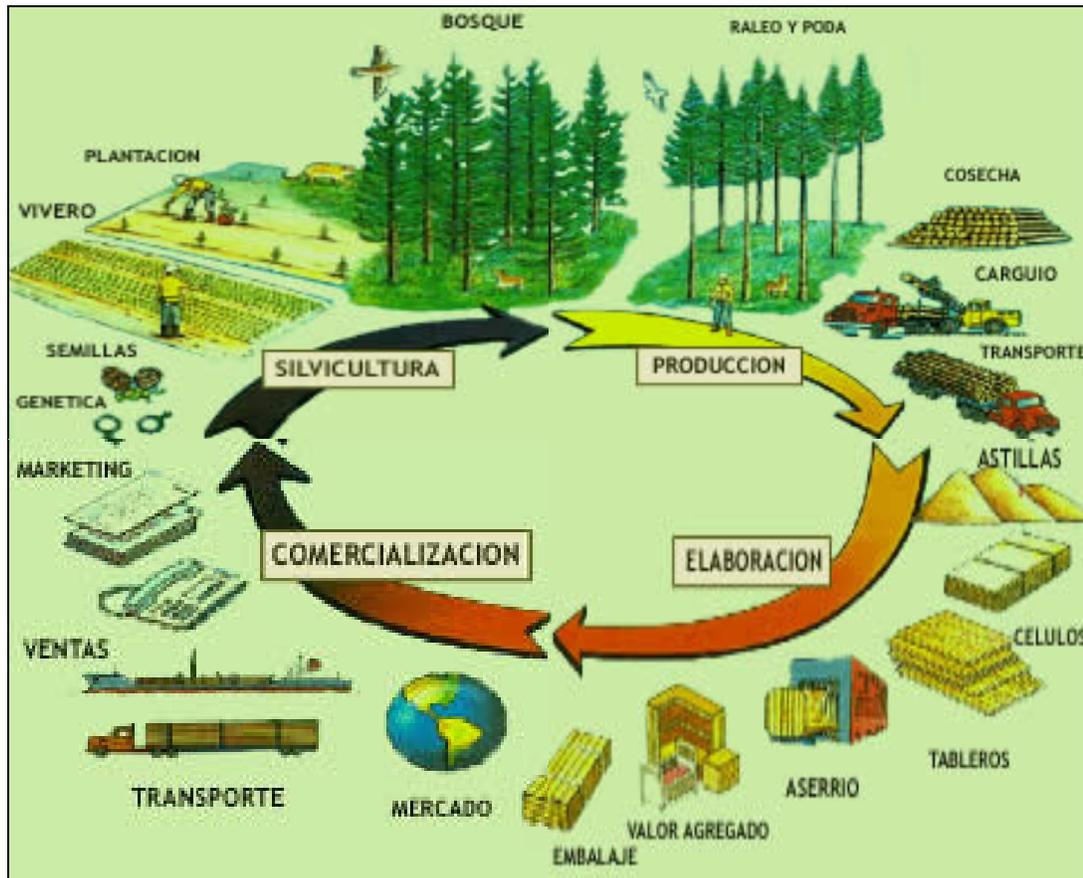


Figura 18: Etapas del ciclo forestal.

Fuente: (Forestal Tornagaleones S.A., 2009).

V.2. Requerimientos ambientales de *Pinus radiata*

El *Pino insigne* o también llamado *Pino radiata*, es una especie exótica originaria de la costa de California, E.E.U.U., que se introdujo en Chile a fines del siglo XIX y que se adaptó perfectamente a las condiciones climáticas del país, alcanzando elevadas tasas de crecimiento y un excelente desarrollo. Este crecimiento promedio es incluso superior al incremento medio anual de los bosques de coníferas de países del hemisferio norte (CORMA, 2009). Estas características permitieron que la especie se convirtiera en la especie principal de las actividades productivas del sector forestal.

Como lo menciona Gana (1982) el *Pino radiata* pertenece a la clase de las coníferas o resinosas, familia de las *Pináceas*, y es una especie de fibra larga que proporciona una madera blanda, resinosa, liviana, de moderada resistencia mecánica y de fácil secado. Su estabilidad y buena resistencia estructural permiten una buena retención de clavos y tornillos, y su color claro otorga la facilidad de teñirla y pintarla (CORMA, 2009). Debido a estas cualidades la madera es utilizada para múltiples fines como la fabricación de pulpa y papel, muebles, viviendas, embalajes, fabricación de postes para la agricultura y la transmisión eléctrica. En general, las coníferas son especies de crecimiento rápido, lo que permite obtener materia prima de bajo costo, razón por la cual, su madera es ampliamente utilizada y hay una tendencia generalizada a nivel mundial de intensificar las plantaciones de coníferas en desmedro de las especies latifoliadas o de maderas duras que conforman la otra gran clase forestal (Gana, 1982).

Particularmente en Chile, la tasa de crecimiento del *Pino radiata* es de alrededor de 22m³/ha año, siendo la maduración comercial a los 20 años, con períodos de rotación en general inferiores a los observados en otros países. La especie se desarrolla entre la región de Valparaíso y de Los Lagos, pero sus rendimientos volumétricos varían según el tipo de clima y suelo en que se desarrolle, por lo cual las tasas de crecimiento varían entre regiones y en zonas dentro de una misma región. Las zonas entre Arauco, Cautín y Malleco presentan las mejores zonas y a la vez, las mayores superficies plantadas (Gana, 1982), mientras que en los sitios muy secos, en la cordillera de Los Andes, en suelos pantanosos y en zonas que presenten abundantes nevadas o temperaturas inferiores a los -7°C no se presenta la especie. La especie presenta los crecimientos óptimos entre Constitución y Valdivia, en las colinas de la Cordillera de la Costa, donde se encuentran temperaturas mínimas no menores a los -5°C y una precipitación media anual entre los 1.000 y 2.000 mm. En estas zonas es posible que el pino crezca a una tasa de 25m³/ha (Gayoso, s. a.).

La rotación del pino fluctúa entre los 20 a 25 años, en tanto que en Canadá el periodo se duplica y en Suecia se triplica. En cuanto a Nueva Zelanda y E.E.U.U., el periodo de rotación es ligeramente mayor (Gana, 1982). En cuanto a los requerimientos ecológicos de *Pinus radiata* en el Cuadro 07 se destacan los principales parámetros necesarios para el crecimiento y desarrollo de la especie.

Cuadro 07: Requerimientos ecológicos de pino radiata.

REQUERIMIENTOS ECOLÓGICOS		
Parámetro	Valor	Comentario/Fuente
Precipitación anual	Igual o superior a 380 mm	• Necesita lluvias desde 380 mm distribuidas en invierno y comienzos de primavera y es favorecido por las nieblas en el verano. [1]
Temperatura mínima media del mes más frío	Entre 1,5° y 12°C	[1] • -2°C [2]

(continúa)

Cuadro 07: (continuación) Requerimientos ecológicos de pino radiata.

REQUERIMIENTOS ECOLÓGICOS		
Parámetro	Valor	Comentario/Fuente
Temperatura máxima media del mes más cálido	Entre 17°y 30°C	[2] <ul style="list-style-type: none"> • El período de máxima actividad vegetativa esta entre febrero y junio (Hemisferio Norte) en donde la temperatura media varía ente 11-16°C y la máxima entre 17-24°C. [1] • En Chile se observa que en invierno se encuentran los menores crecimientos tanto en diámetro como en altura, mientras que el crecimiento en diámetro es mayor en otoño y en altura en verano.[3]
Temperatura media anual	Entre 10 y 18°C	[1]
Meses secos	6 a 7	[2]
Humedad relativa verano	Igual o superior a 40%, entre diciembre y febrero	[1]
Textura del suelo	Muy Liviana a Pesada	<ul style="list-style-type: none"> • Liviana a medias, donde livianas incluye arenosas a franco arenosas y media incluye a francas a franco arcillo arenosa [1]. • No crece bien en suelos arcillosos, en la zona de Arauco los suelos son principalmente de texturas pesadas [1]. • En textura del suelo, se desarrolla mejor en suelos de texturas francas, franco limosas y franco arenosas, no creciendo bien en suelos delgados, mal drenados o con presencia inmediata de napas freáticas [2]
Drenaje del suelo	Bueno a Moderado	<ul style="list-style-type: none"> • El pino tendrá mal crecimiento en suelos muy pedregosos o de mal drenaje, igual que en terrenos pantanosos o que se anegan continuamente [1]. • La especie se desarrolla en cualquier tipo de suelo mientras que este bien drenado [1]. • En los sectores cercanos a Valdivia se determinó que el desarrollo del pino presenta un estrecho rango de variación en su crecimiento con excepción de suelos mal drenados. Lo que se ratifica en Cautín donde el pino no prospera en suelos con mal drenaje y mal estructurados [1].

(continúa)

Cuadro 07: (continuación) Requerimientos ecológicos de pino radiata.

REQUERIMIENTOS ECOLÓGICOS		
Parámetro	Valor	Comentario/Fuente
Reacción del suelo	pH igual o inferior a 7,4	<ul style="list-style-type: none"> • Reacción neutra a ácida [2].
Profundidad del suelo	Igual o superior a 25cm	<ul style="list-style-type: none"> • En su hábitat natural requiere como mínimo 35 cm, pero para crecer hasta los 30 m necesita más de 90 cm [1].
Altitud	Hasta los 3.000 msnm	[1] <ul style="list-style-type: none"> • Hasta alrededor de los 1.500 msnm [2].

Fuente: Elaboración propia en base a: [1] (Peralta, 1976); [2] (García *et al*, s. a.); [3] (Toral, 2005).

V. 3. Evaluación del modelo PRECIS

V.3.a. Climatologías, percentiles e histogramas

Se calcularon las climatologías de precipitación y temperaturas extremas a partir de los datos de las 38 estaciones y las variables PRECIS. La comparación entre ambas series de climatologías, permiten afirmar que para toda la zona de estudio el modelo PRECIS simula correctamente el ciclo anual de dichas variables, es decir, presenta el mínimo en los meses de invierno y el máximo en verano para la temperatura y por el contrario para las precipitaciones. No obstante, presenta un sesgo sistemático de una sobre-estimación de la temperatura en los meses de verano (enero-febrero) para la variable temperatura mínima y en ciertas estaciones para la temperatura máxima, es decir, los meses de verano son más cálidos en el modelo PRECIS que en las observaciones de las estaciones. Este sesgo varía entre los 2-5°C en la mayoría de las estaciones. Las climatologías de las estaciones se disponen en el Apéndice 1. Además se observa que PRECIS simula adecuadamente la variación espacial de las variables. Las estaciones ubicadas al norte de la zona de estudio presentan mayores temperaturas y menores precipitaciones que las ubicadas al sur de la zona de estudio. Esto refleja la variación norte-sur de las variables climáticas en el país.

En las climatologías las diferencias entre las magnitudes de los valores de cada variable se presentan dispares, existiendo estaciones con gran similitud de magnitud entre PRECIS y observaciones, y otras con diferencias más sustanciales en el mismo aspecto. A continuación se presentan dos climatologías que evidencien estas situaciones (Figura 19 y Figura 20).

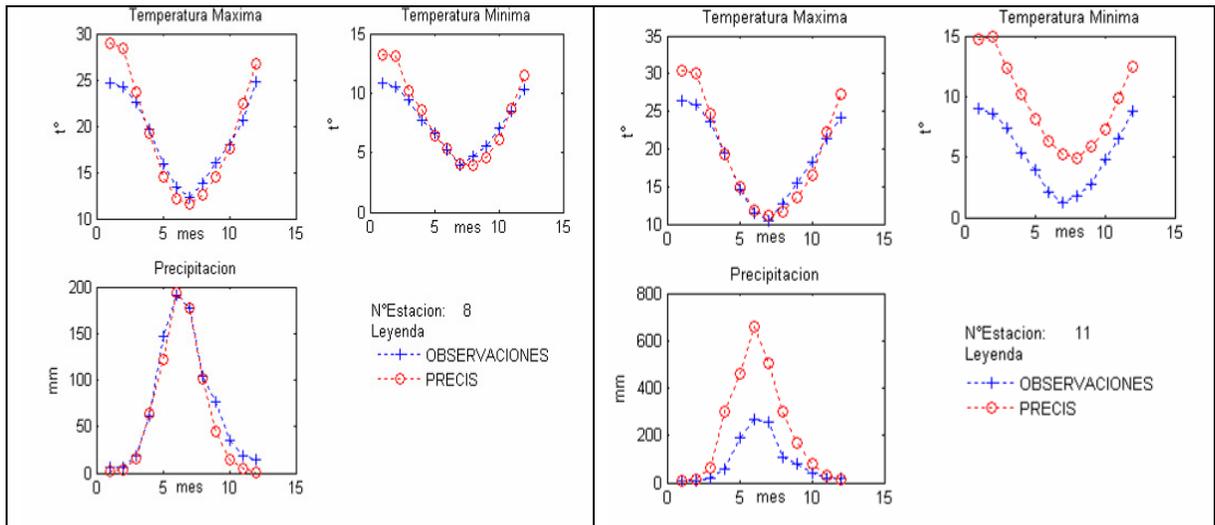


Figura 19: Climatología de similares magnitudes en cada variable.

Figura 20: Climatología de distintas magnitudes en dos variables.

La primera climatología corresponde a la estación ocho (Figura 19), ubicada en la región del Maule hacia la costa y presenta en todas las variables una correspondencia casi exacta entre lo simulado por PRECIS y lo observado en dicha estación; por su parte la estación 11 (Figura 20) presenta disparidad en la magnitud entre lo simulado por PRECIS para la temperatura mínima y precipitación respecto de lo observado. Cabe mencionar además que esta estación también se encuentra ubicada en la región del Maule, pero en dirección a la cordillera. Las estaciones que presentaron una situación similar a la estación 11, es decir, diferencias considerables en Temperatura mínima y Precipitación, y sin discrepancia en la Temperatura máxima presentan como factor común que todas se encuentran ubicadas a altura, en el sector precordillerano.

Los percentiles se realizaron con datos mensuales de una serie de tiempo igual de 21 años para lo modelado como lo observado, y permiten observar la distribución de los valores de una determinada variable. Los datos representados manifiestan la diferencia observada en las climatologías respecto a los valores de mayor magnitud en la variable temperatura mínima y máxima. En la mayoría de las estaciones la diferencia entre los datos observados y modelados se presentó en los valores de mayor magnitud, lo que muestra que PRECIS presenta temperaturas más calidas que las observaciones. En cuanto a las precipitaciones, los percentiles presentaron una tendencia disímil en los valores de mayor magnitud comparando ambas series. Los percentiles que presentaron la mayor diferencia corresponden a estaciones ubicadas en el sector precordillerano, lo que coincide con lo observado en la climatología. La totalidad de los percentiles es posible encontrarla en el Apéndice 2.

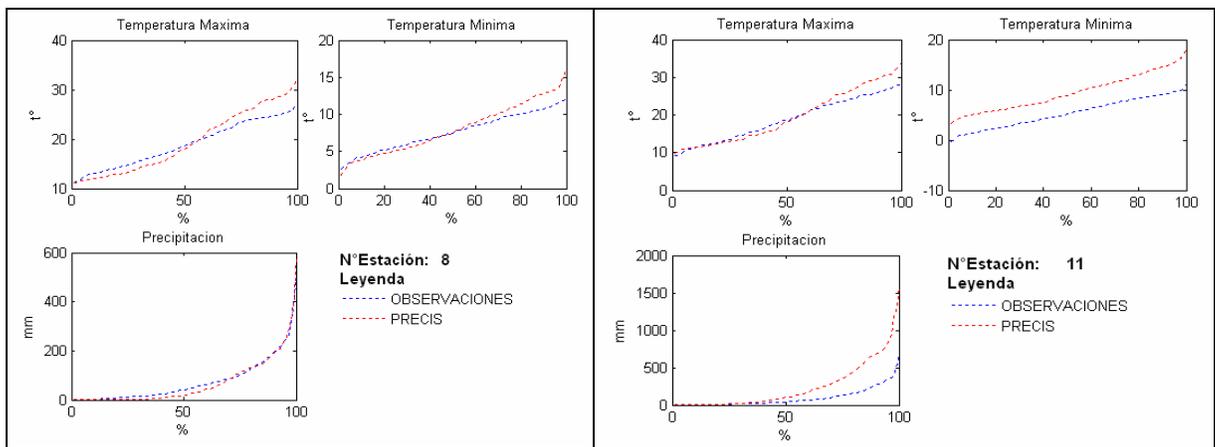


Figura 21: Percentil estación 8.

Figura 22: Percentil estación 11.

Los percentiles mostrados (Figura 21 y Figura 22) pertenecen a las mismas estaciones señaladas en el ítem de climatologías, y se puede observar la correspondencia entre cada una de ellas. La estación 8 (Figura 21) presenta una similitud casi exacta en su climatología lo que se evidencia en los percentiles, principalmente en el de precipitaciones. En cuanto a la estación 11, se observa una diferencia clara entre los valores de cada variable, la temperatura mínima simulada por PRECIS presenta siempre valores mayores en relación a

los datos reales de la estación, alrededor de 5°C; la precipitación por otra parte presenta diferencias en los valores extremos existiendo una diferencia de agua caída de alrededor de 500 mm a favor de lo modelado. También se observa en la temperatura máxima de la estación 11 la diferencia en el valor extremo mayor respecto a lo observado, situación también presente en la estación 8 y que se explica por la sobre-estimación de la temperatura en los meses más cálida mencionada anteriormente.

Los histogramas se realizaron con la misma serie de 21 años de los percentiles, pero para las temperaturas se diferenciaron en temporada otoño/invierno y primavera/verano, mientras que las precipitaciones se trabajaron como datos anuales, es decir, la precipitación anual para los 21 años. En casi su totalidad las estaciones presentaron un comportamiento gaussiano en la distribución de los datos de cada variable tanto para PRECIS como para los datos reales. Los histogramas de cada estación se encuentran disponibles en la sección 3 del Apéndice.

En cuanto a la temperatura máxima se puede mencionar que para la temporada otoño/invierno el rango de los histogramas va desde los 5 y 20°C, estando la mayor frecuencia de los datos en el intervalo 10-15°C siendo muy similares entre ambas series. Mientras que para la temporada primavera/verano el rango fluctúa desde los 10 a 35°C y no se presenta algún intervalo común para todas las estaciones donde se presente mayor frecuencia de datos, es decir, existe una distribución más uniforme de los valores. En el caso de la temperatura mínima para la temporada de otoño/invierno el rango fluctúa entre los -4 a 12°C, mientras que para primavera/verano va desde los 0 a 20°C. El rango con mayor frecuencia de valores para ambas temporadas se encuentra en el intervalo 4 a 12°C, existiendo además una distribución más pareja en todo el rango. En ambas variables (temp. max. y temp.min.) se observa que la temporada primavera/verano de PRECIS presenta una barra de frecuencia en los rangos más altos para cada una. Esto se corrobora con la información de climatologías y percentiles descrita anteriormente.

En el caso de las precipitaciones se observa que en la mayoría de las estaciones los histogramas comparten un rango de precipitaciones relativamente común entre los datos de PRECIS y los datos reales. Este rango corresponde a la precipitación entre los 0 a 2000 mm anuales. La frecuencia dentro de cada intervalo del rango es distinta entre estaciones, pero es posible distinguir que para intervalos inferiores a los 700 mm/año PRECIS presenta mayores frecuencias que lo observado. Se distingue además que un grupo de estaciones presentan histogramas completamente separados, es decir, no comparten un rango común de precipitaciones. Este es el caso de las estaciones 7, 11, 12, 17, 18, 19, 27, 31, 32, 37, todas ellas ubicadas en el sector cordillerano, donde PRECIS simula hasta el doble de precipitaciones que lo observado.

En las dos estaciones representadas posteriormente los histogramas presentan las características mencionadas anteriormente. En el caso de la estación ocho (Figura 23) se observa que para la temporada otoño/invierno de la temperatura máxima y mínima las frecuencias por intervalos son relativamente similares entre ambas series, mientras que para la temporada primavera/verano de ambas variables la diferencia se presenta marcadamente

en las temperaturas extremas más cálidas. En el caso de las precipitaciones se observa que ambas series poseen barras en los mismos intervalos, teniendo mayor frecuencia PRECIS en aquellos valores menores a 700 mm. En el caso de la estación once (Figura 24) se observa como el histograma de precipitaciones de PRECIS (rojo) se ubica en la zona de mayores valores del rango representado, siendo coincidente solo en el intervalo de 1.250 a 1.500 mm/año.

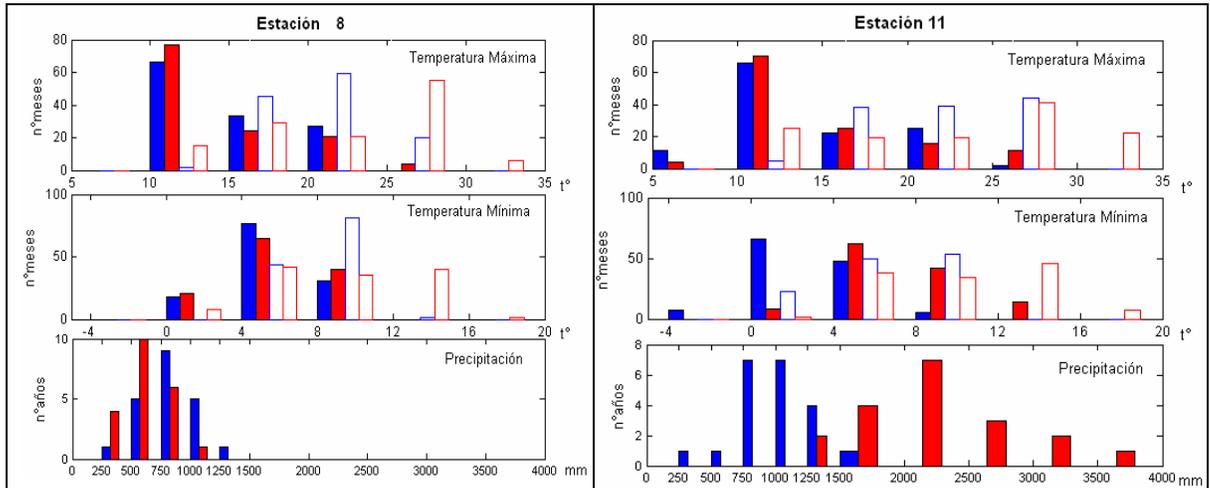


Figura 23: Histogramas estación 8.

Figura 24: Histograma estación 11.

Nota: En las temperaturas las barras de color sólido representan la temporada otoño/invierno, mientras que las blancas corresponden a la temporada primavera/verano. El color azul corresponde a lo observado y el color rojo a lo modelado por PRECIS. En las precipitaciones no se separa por temporadas por lo cual las barras corresponden a lo observado versus lo modelado.

Se debe hacer mención además, al hecho de que en ciertas estaciones las precipitaciones reales fueron mayores a las precipitaciones simuladas por PRECIS, específicamente en las estaciones 2, 4, 6, 10. Estas estaciones se ubican en la región del Maule, estando las dos primeras localizadas en la costa de la región y las dos últimas en el sector del valle transversal.

Al graficar la totalidad de las climatologías juntas por variable y por serie (PRECIS y observadas) (Apéndice 4), se observó que el ciclo anual de las temperaturas en la zona de estudio presenta un máximo en verano y un mínimo en invierno específicamente en el mes de Julio. En el caso de las temperaturas mínimas PRECIS tiende a correr el mínimo del ciclo anual desde Julio a Agosto. En cuanto a las precipitaciones el ciclo anual presenta el máximo de agua caída en invierno, en particular en el mes de Junio, y el mínimo en los meses de verano. Las precipitaciones de PRECIS presentan una diferencia notoria con la precipitación observada en la cantidad de agua caída, la cual alcanza valores de hasta 800 mm mensuales mientras que las precipitaciones de datos observados presentan como valor máximo los 300 mm mensuales. Esto evidencia una sobreestimación de las precipitaciones por el modelo, si bien el modelo simula adecuadamente el comportamiento estacional de las

precipitaciones, presentando el máximo en los meses de invierno que corresponde al período de lluvias del país, las magnitudes de la precipitación son sobredimensionadas para la realidad.

En el Cuadro 08 se presenta una comparación de estaciones entre lo observado y PRECIS, donde en base a las climatologías agrupadas mencionadas anteriormente se identificaron las estaciones que se separaban de la media, tanto por encontrarse sobre (mayor) o bajo (menor) el grupo. Esto se realizó para evaluar la espacialidad de las estaciones, es decir, si PRECIS simula correctamente la variabilidad espacial de las variables. Se observa en el cuadro que la simulación y las observaciones tienen correspondencia en varias de las estaciones para cada variable. Para precipitación, once estaciones se encuentran en ambas series de datos, mientras que para la temperatura máxima son cinco y la temperatura mínima seis. La distribución espacial de estas estaciones se presenta en la serie de Figuras 25, 26 y 27, donde se muestra la ubicación geográfica de las estaciones del Cuadro 08. Se observa en dichas figuras que PRECIS reproduce el comportamiento espacial de las variables comparando con lo Observado.

Cuadro 08: Comparación estaciones según variables.

Variable		Estaciones Observaciones	Estaciones PRECIS
Precipitación	Mayor	11 – 12 – 17 – 18 – 19 – 32 – 36	7 – 11 – 12 – 17 – 18 – 19 – 27 – 31 – 32 – 37
	Menor	1 – 2 – 3 – 5 – 6 – 14 – 29	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 10
Temperatura Máxima	Mayor	2 – 3 – 6 – 10	2 – 6 – 10
	Menor	9 – 12 – 18 – 19 – 38	14 – 18 – 19
Temperatura Mínima	Mayor	2 – 3 – 4 – 5 – 15 – 22 – 24	2 – 4 – 11 – 23 – 24
	Menor	7 – 11 – 12 – 17 – 18 – 19	1 – 9 – 12 – 18 – 19

Nota: La definición Mayor identifica a aquellas estaciones que se encuentran sobre el grupo medio y Menor a aquellas que se encuentran por debajo de este mismo grupo.

Fuente: Elaboración propia.

Para las precipitaciones (Figura 25) tanto PRECIS como las observaciones identifican la zona cordillerana como la zona donde se presentan precipitaciones de mayor magnitud, mientras que las precipitaciones de menor magnitud se localizan en el extremo norte de la zona de estudio y más centradas hacia la costa y algunas pocas hacia el valle central. Además se debe destacar que la región del Maule es la que presenta como unidad geográfica las menores precipitaciones de toda la zona de estudio, ya que a medida que se

avanza latitudinalmente hacia el sur los montos de agua caída aumentan. En el caso de las temperaturas máximas (Figura 26) también se observa una variación latitudinal, las mayores temperaturas máximas están localizadas en la región más norte de la zona de estudio, mientras que las temperaturas máximas inferiores se encuentran más al sur. Finalmente, para las temperaturas mínimas (Figura 27) se observa un gradiente longitudinal, con menores valores en la cordillera y valores mayores en la costa. Se debe tener en cuenta que se trabajó con climatologías, que corresponden al promedio mensual de una variable en una cantidad determinada de tiempo (años), por lo cual las temperaturas se homogenizan y la diferencia entre zonas no resulta tan notoria. Además debido al análisis de histogramas se observa que existe una distribución relativamente uniforme de los valores de temperatura tanto para otoño/invierno como primavera/verano en todas las estaciones.

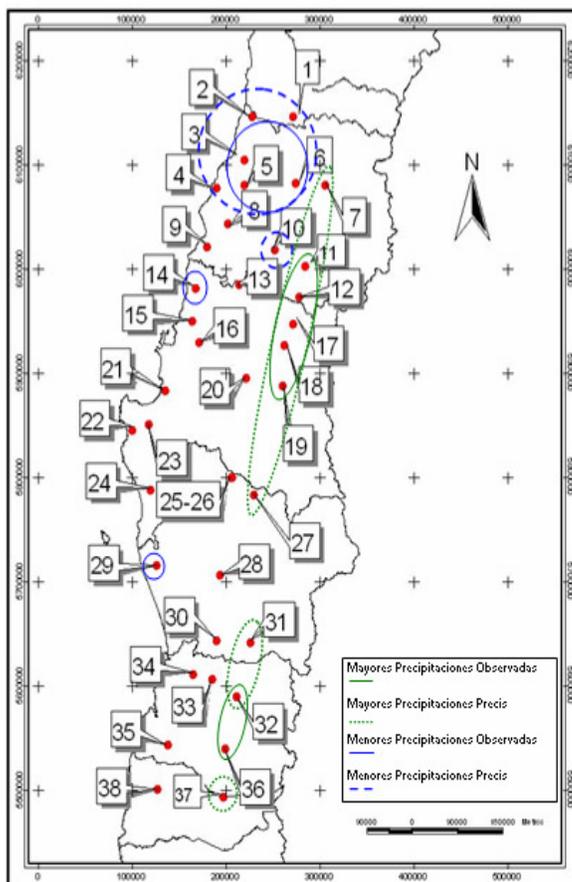


Figura 25: Ubicación de estaciones para precipitación.

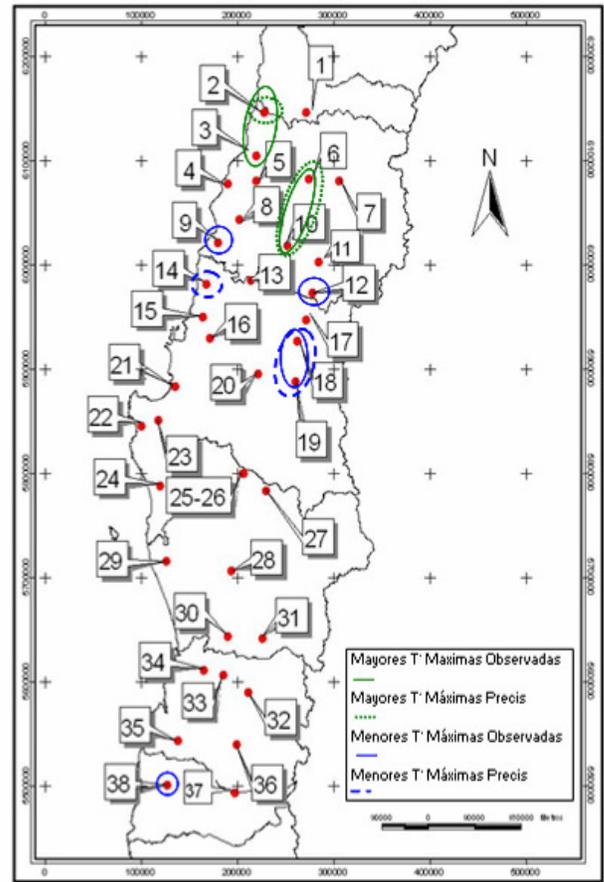


Figura 26: Ubicación de estaciones para temperaturas máximas.

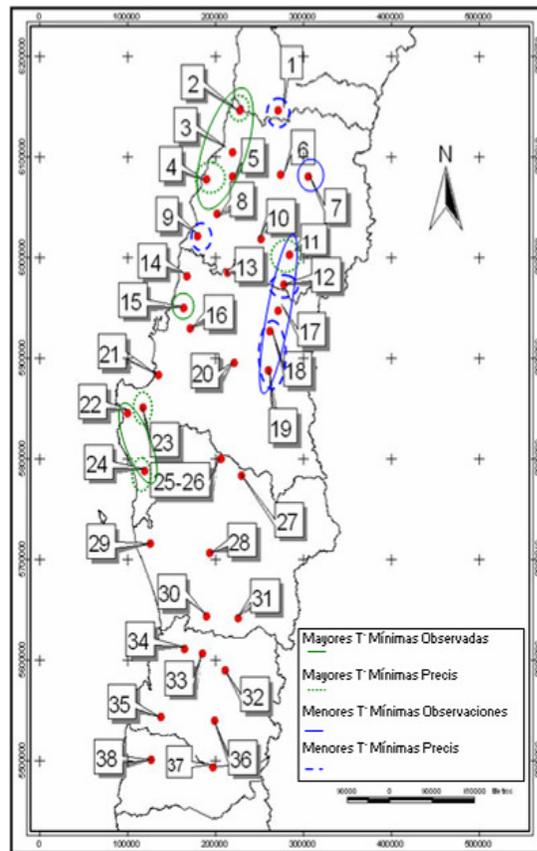


Figura 27: Ubicación de estaciones para temperaturas mínimas.

Debido al análisis anterior, es decir, a las climatologías, percentiles e histogramas junto con la representación espacial de las variables, es posible señalar que PRECIS simula adecuadamente el comportamiento anual de las variables evaluadas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación). En el caso de las temperaturas PRECIS presenta el máximo en los meses de verano y el mínimo en invierno, por el contrario de las precipitaciones que presentan su máximo en los meses de invierno y el mínimo en verano. PRECIS además simula la variación espacial de las variables, indicando que las estaciones localizadas más al norte son más cálidas que las ubicadas hacia el sur y en el sentido este-oeste, la zona cordillerana localiza menores temperaturas y mayores precipitaciones respecto a la costa.

En específico para cada variable se puede mencionar que PRECIS para la temperatura máxima sitúa el mínimo en el mes de Julio coincidiendo con las observaciones, en cuanto a la distribución de los valores para la temporada otoño/invierno PRECIS y lo observado coinciden en situar la mayor frecuencia (meses) en el intervalo de 10 a 15°C para todas las estaciones, mientras que en primavera/verano el rango es más amplio alcanzando desde los 10° a los 35°C sin dominio general de algún intervalo. Para las temperaturas mínimas PRECIS tiende a correr el mínimo hacia el mes de Agosto; además se observa un sesgo sistemático de una sobre-estimación de la temperatura para los meses de verano (enero-

febrero). En cuanto al rango de distribución de los valores para otoño/invierno fluctúa entre los -4 a 12°C y para primavera/verano entre 0 a 20°C . En general el rango donde se presenta la mayor frecuencia (meses) va desde los 4° a 12°C , existiendo una distribución pareja entre cada intervalo que lo compone. Finalmente, para las precipitaciones PRECIS sitúa el máximo de agua caída en el mes de Junio, existiendo una sobre-estimación de la precipitación con una diferencia máxima de 500 mm para el mes de Junio. Las estaciones que presentan una diferencia considerable con PRECIS son aquellas localizadas en el sector precordillerano, por lo cual se puede afirmar que PRECIS sobre-estima la precipitación en altura. En relación a los valores de la variable el modelo y lo observado fluctúan dentro del rango de 0 a 2.000 mm anuales de agua caída para las estaciones que no se presentan en altura, dentro de este rango es necesario destacar que las frecuencias (años) son mayores para PRECIS bajo el límite de los 700 mm anuales.

V.3.b. Análisis de correlaciones

Las correlaciones de las variables temperatura y precipitación realizadas para cada estación entre los datos simulados y observados contemplaron el período de tiempo desde noviembre de 1981 hasta noviembre de 1990, es decir, se obtuvo una muestra de 109 datos para cada serie. Todos los coeficientes presentan valores sobre el 0.5 y son positivos, lo que indica una correlación positiva. Además la prueba de significancia realizada con el test T de Student indicó que todos los coeficientes obtenidos son significativos, con p-value inferiores al $0,0005$. Los coeficientes se presentan a continuación en el Cuadro 09.

En la variable temperatura máxima todas las estaciones presentan coeficientes con valores sobre 0.90 , mientras que para la temperatura mínima se encuentran entre 0.80 y 0.90 y finalmente para las precipitaciones los valores de los coeficientes se distribuyen entre el intervalo 0.45 y 0.6 . La precipitación es la variable que presenta la correlación más baja, lo que es coherente con los análisis previos de climatologías, percentiles e histogramas, donde se observó que esta variable es la que presenta mayores discrepancias entre PRECIS y las observaciones. Al mismo tiempo la correlación de la temperatura máxima es coherente con la alta similaridad que se presentó entre los datos reales y simulados en el punto anterior.

Cuadro 09: Coeficientes de correlación por estación y variable.

Estación	TMX	TMN	PP
1	0,963	0,890	0,466
2	0,963	0,889	0,474
3	0,960	0,878	0,523
4	0,951	0,885	0,551
5	0,959	0,887	0,559
6	0,968	0,880	0,582
7	0,954	0,877	0,553
8	0,954	0,882	0,581

Estación	TMX	TMN	PP
20	0,959	0,873	0,610
21	0,941	0,849	0,590
22	0,934	0,816	0,538
23	0,941	0,827	0,604
24	0,931	0,796	0,605
25	0,955	0,861	0,553
26	0,955	0,861	0,551
27	0,945	0,836	0,610

(continúa)

Cuadro 09: (continuación) Coeficientes de correlación por estación y variable.

Estación	TMX	TMN	PP
9	0,932	0,867	0,568
10	0,965	0,888	0,595
11	0,943	0,876	0,580
12	0,939	0,884	0,617
13	0,958	0,892	0,591
14	0,941	0,883	0,570
15	0,947	0,872	0,574
16	0,951	0,869	0,583
17	0,945	0,874	0,600
18	0,941	0,886	0,619
19	0,944	0,884	0,617

Estación	TMX	TMN	PP
28	0,940	0,823	0,494
29	0,922	0,797	0,530
30	0,929	0,804	0,583
31	0,926	0,809	0,585
32	0,929	0,811	0,624
33	0,926	0,794	0,600
34	0,926	0,801	0,602
35	0,933	0,828	0,632
36	0,935	0,786	0,587
37	0,937	0,783	0,609
38	0,930	0,839	0,619

Fuente: Elaboración propia.

V.3.c. Validación de datos PRECIS y observados en 3-PG.

Se evaluó en el modelo 3-PG las series climáticas tanto observadas como simuladas por PRECIS para el escenario actual de cada estación. Los datos de radiación observada necesarios para correr el modelo se encuentran en el Apéndice V. De la evaluación de 3-PG obtenida se rescató la información relativa a biomasa ($t_{DM}ha^{-1}$) y volumen (m^3ha^{-1}) de cada estación y se comparó entre lo observado y modelado.

En términos generales, todas las estaciones presentaron una curva de igual tendencia, es decir, la biomasa o volumen aumentaban en función del tiempo. Las curvas obtenidas por PRECIS y lo observado presentaron similitud en los valores de la variable (biomasa y volumen) durante todo el intervalo de tiempo evaluado para la gran mayoría de las estaciones. Los resultados de cada variable a una edad de rodal 20 años se presentan en el Cuadro 10 donde se indica el porcentaje de variación entre los resultados y las gráficas de cada estación se presentan en el Apéndice 6. Además en el cuadro se resaltan aquellas estaciones en que el resultado obtenido con datos PRECIS es mayor al obtenido con las observaciones. Se aprecia en el cuadro que existe una variación en el sentido norte-sur de los resultados, ya que los valores mayores se encuentran en estaciones ubicadas hacia el sur, se excluyen de esta aseveración las estaciones desde la 32 a la 38, cuya situación se mencionará posteriormente.

Cuadro 10: Valor de biomasa y volumen a los 20 años para cada estación.

	Biomasa	Dif %
1	130/97	-25.38
2	151/147	-2.64
3	145/136	-6.21
4	173/215	24.28

	Volumen	Dif %
1	238/177	-25.63
2	276/268	-2.89
3	265/248	-6.41
4	316/392	24.05

(continúa)

Cuadro 10: (continuación) Valor de biomasa y volumen a los 20 años para cada estación.

	Biomasa	Dif %		Volumen	Dif %
5	154/132	-14.28	5	280/241	-13.92
6	137/101	-26.28	6	250/185	-26
7	138/158	14.49	7	252/289	14.68
8	159/143	-10	8	291/260	-10.65
9	177/163	-7.91	9	323/297	-8.05
10	159/111	-30.18	10	290/201	-30.69
11	150/179	19.33	11	274/327	19.34
12	149/190	27.51	12	271/346	27.67
13	240/129	-46.25	13	439/235	-46.46
14	182/213	14.55	14	332/387	16.56
15	178/159	-10.67	15	324/290	-10.49
16	177/152	-14.12	16	322/277	-13.97
17	123/193	56.91	17	231/352	52.38
18	139/184	32.37	18	253/336	32.81
19	141/188	33.33	19	257/342	33.07
20	159/157	-1.25	20	291/286	-1.72
21	178/210	17.97	21	324/384	18.51
22	195/233	19.48	22	356/425	19.38
23	186/193	3.76	23	339/352	3.83
24	186/208	11.83	24	339/380	12.09
25	166/164	-1.20	25	304/299	-1.64
26	166/164	-1.20	26	304/299	-1.64
27	161/190	18.01	27	293/346	18.08
28	209/158	-24.40	28	370/288	-22.16
29	189/206	8.99	29	345/377	9.28
30	195/171	-12.31	30	355/311	-12.39
31	188/200	6.38	31	342/364	6.43
32	409/226	-44.74	32	746/412	-44.77
33	401/178	-55.61	33	731/324	-55.67
34	408/165	-59.55	34	743/301	-59.48
35	408/167	-59.06	35	743/304	-59.08
36	404/198	-50.99	36	737/360	-51.15
37	393/207	-47.33	37	716/377	-47.35
38	421/178	-57.72	38	758/320	-57.78

Nota: La biomasa se mide en t_{DM}/ha^{-1} y el volumen en m^3/ha^{-1} . Los valores se representan como OBS/PRECIS y el porcentaje se obtuvo mediante la forma $(PRECIS-OBS)/OBS*100$. Los porcentajes negativos representan un disminución de la variable respecto a lo observado.

Fuente: Elaboración propia.

Las estaciones resaltadas se pueden agrupar en las estaciones cordilleranas de la séptima a la novena región (7, 11, 12, 17, 18, 19, 27, 31) y las estaciones costeras de las mismas regiones (4, 14, 21, 22, 23, 24, 29). En las estaciones cordilleranas la productividad mayor obtenida con datos de PRECIS se explica por la sobre-estimación de las precipitaciones en el modelo de simulación climática en el sentido este-oeste; en cambio en las estaciones costeras se presenta una situación distinta, donde las temperaturas máximas de PRECIS son inferiores a las observadas, las mínimas son relativamente similares y en las precipitaciones existen leves diferencias de magnitud, lo que en conjunto presenta condiciones favorables para el crecimiento del pino, ya que presenta una menor diferencia de temperaturas lo que se traduce en un mayor período de crecimiento.

Como se mencionó anteriormente las diferencias más notorias se presentaron en las estaciones desde la 32 a la 38, todas ubicadas en la región de Los Ríos, donde los resultados obtenidos por los datos reales fueron considerablemente mayores que los datos obtenidos con PRECIS. Esta diferencia es de alrededor de un 45% a 60% más dependiendo de la estación a observar. La única diferencia que presentaron éstas estaciones en relación al resto es que la radiación fue obtenida del Mapa Agroclimático de Chile (INIA, 1989), mientras que la radiación de las demás estaciones se obtuvo del Atlas Agroclimático (Santibañez, 1993). En el Apéndice 5 se encuentra detallada la radiación mensual utilizada para cada estación. El trabajo de Santibañez utiliza una metodología propia, donde se realiza un detallado manejo de los datos meteorológicos, dividiendo el territorio en numerosos distritos agroclimáticos los cuales proporcionan datos mensuales de varios factores climáticos. Mientras que el Mapa Agroclimático se basa en la clasificación de Papadakis, que divide los climas en 10 grupos con subgrupos, y junto a la clasificación del mismo autor de los requerimientos climáticos de ciertas especies cultivables se definieron agroclimas, de los cuales se especifica una estación particular como representante de la zona. Se debe hacer mención al hecho de que las radiaciones de Santibañez se ajustan mejor a las radiaciones simuladas por PRECIS, mientras que las obtenidas del trabajo del INIA se alejan de estos valores. También se debe destacar que sólo las estaciones con radiaciones del INIA presentaron diferencias considerables con PRECIS en las dos simulaciones 3-PG.

El resto de las estaciones presentan diferencias en los valores de biomasa y volumen, mas no son diferencias tan mayores, como máximo de un 30% (excepto la estación 13 con un 46%). Estas diferencias podrían explicarse a las series climáticas usadas y al hecho de que el modelo 3-PG utiliza los datos climáticos mes a mes para simular el crecimiento del pino, por lo cual pequeñas variaciones dentro de un mes en una variable para la misma estación, pero de distintas series puede significar una diferencia en la productividad.

V.3.d Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó debido a la necesidad de identificar las variables condicionantes para el crecimiento de la especie. A las cuatro variables usadas (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación) se les modificó sus valores en un

porcentaje determinado mientras el resto de las variables no sufrían modificación alguna. La Figura 28 presenta los resultados obtenidos por 3-PG para biomasa y volumen con variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 30\%$ para cada variable.

Se observa en la serie de representaciones de la Figura 28 que aumentar la precipitación en 10% y 30% resulta en valores de biomasa y volumen mayores a los obtenidos en la simulación control, específicamente aumenta un 2% y 5% respectivamente. La temperatura máxima presenta una situación diferente, ya que al disminuir en ambos porcentajes se obtuvo mayor productividad respecto al control, en cambio al aumentar la variable un 10% y 30% la productividad disminuyó en un 12% y 32% respectivamente. Se aprecia también en la figura que la diferencia entre los resultados variados y el control es mayor o menor en función del porcentaje de variación. Además se observa que el efecto sobre la productividad disminuye con los años, es decir, si a los 10 años, un cambio de +10% en temperaturas máximas, produce una disminución de 14%, a los 20 años la diferencia es de 12%. La temperatura mínima y la radiación presentaron una situación similar a la precipitación, donde las variables aumentadas significaron mayor productividad que aquellas en que se disminuyó un cierto porcentaje. La diferencia entre las magnitudes no se observa tan marcada en la temperatura mínima, situación similar a la radiación con la excepción de que al disminuir un 30% se presenta una diferencia más notoria respecto al control.

Las diferencias porcentuales entre la productividad con variación porcentual y la productividad control se representan en el Cuadro 11. La productividad se calculó con la información climática de la línea base, específicamente del período entre los años 1960 y 1980. Se debe hacer notar que la biomasa y el volumen varían en el mismo porcentaje, por lo cual no se clasifica la productividad según tipo sino que se indica el valor de variación respectivo. Se observa en el cuadro que la precipitación disminuye la productividad del pino en hasta un 6% cuando la precipitación es menor en un 30%, para una variación del 10% la productividad presentan una variación mínima, de alrededor de 2% sea positiva o negativa. Esto es coherente con los requerimientos ecológicos del pino (Capítulo V.2.), donde se indica que se necesitan lluvias desde 380 mm al año, valor que es superado por la totalidad de estaciones de la zona de estudio, ya que las climatologías muestran que en la estación más al norte para el mes de mayor precipitación la menor cantidad de agua caída es de la mitad del requerimiento de la especie.

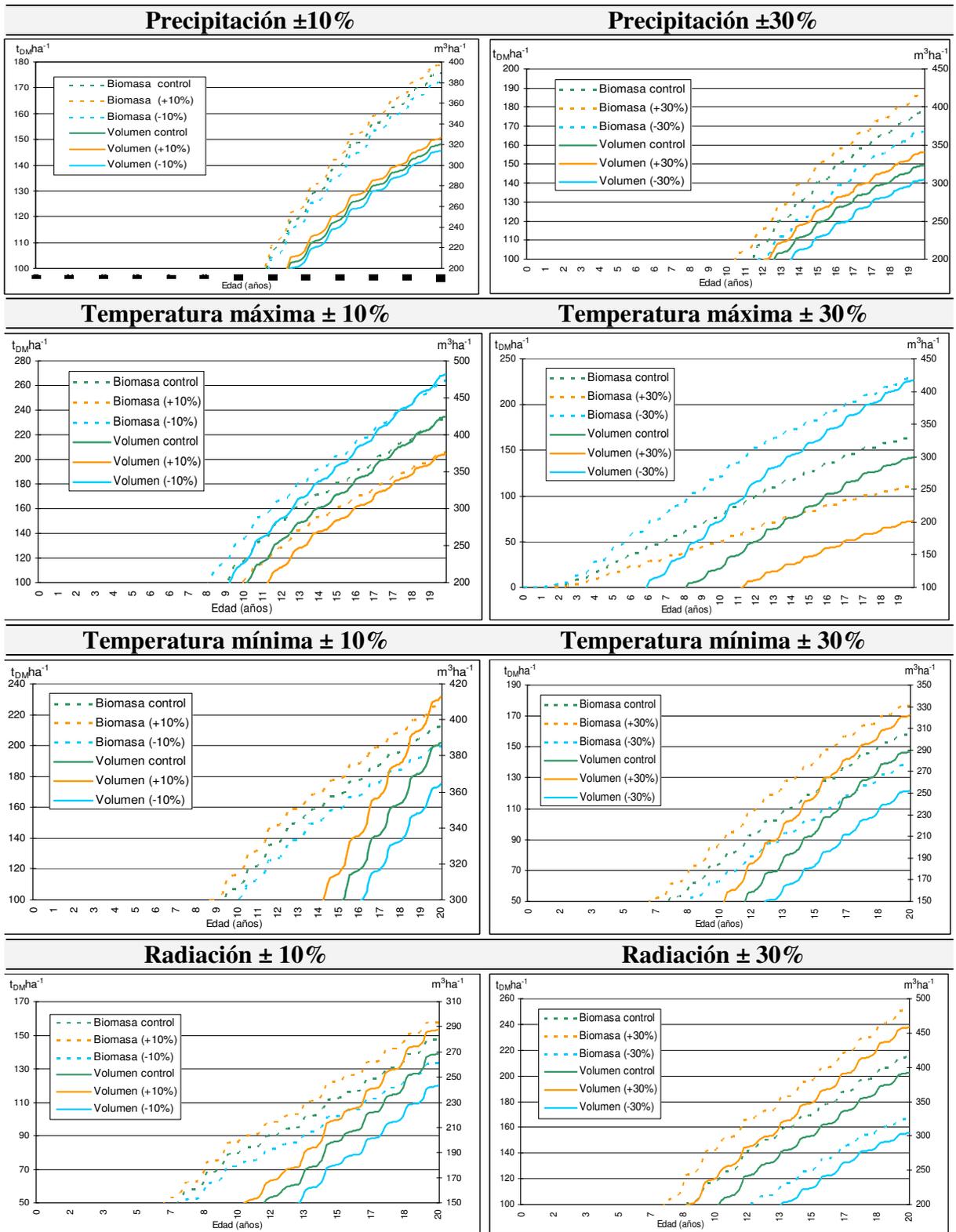


Figura 28: Sensibilidad de 3-PG a las variables climáticas.

Cuadro 11: Variación porcentual entre variables modificadas ($\pm 10\%$ y $\pm 30\%$) y la variable control.

		Variable Control				
		Δ	Precipitación	Temp. Máx.	Temp. Mín.	Radiación
Variable	Precipitación	+10	1,91	-	-	-
		-10	-1,97	-	-	-
		+30	5,33	-	-	-
		-30	-5,90	-	-	-
	Temp. Máx.	+10	-	-11,85	-	-
		-10	-	13,41	-	-
		+30	-	-32,41	-	-
		-30	-	39,66	-	-
	Temp. Mín.	+10	-	-	6,54	-
		-10	-	-	-5,99	-
		+30	-	-	11,59	-
		-30	-	-	-12,50	-
	Radiación	+10	-	-	-	7,11
		-10	-	-	-	-9,46
		+30	-	-	-	16,99
		-30	-	-	-	-22,47

Nota: El signo delante del porcentaje representa la disminución o aumento de la productividad respecto al control.

Fuente: Elaboración propia.

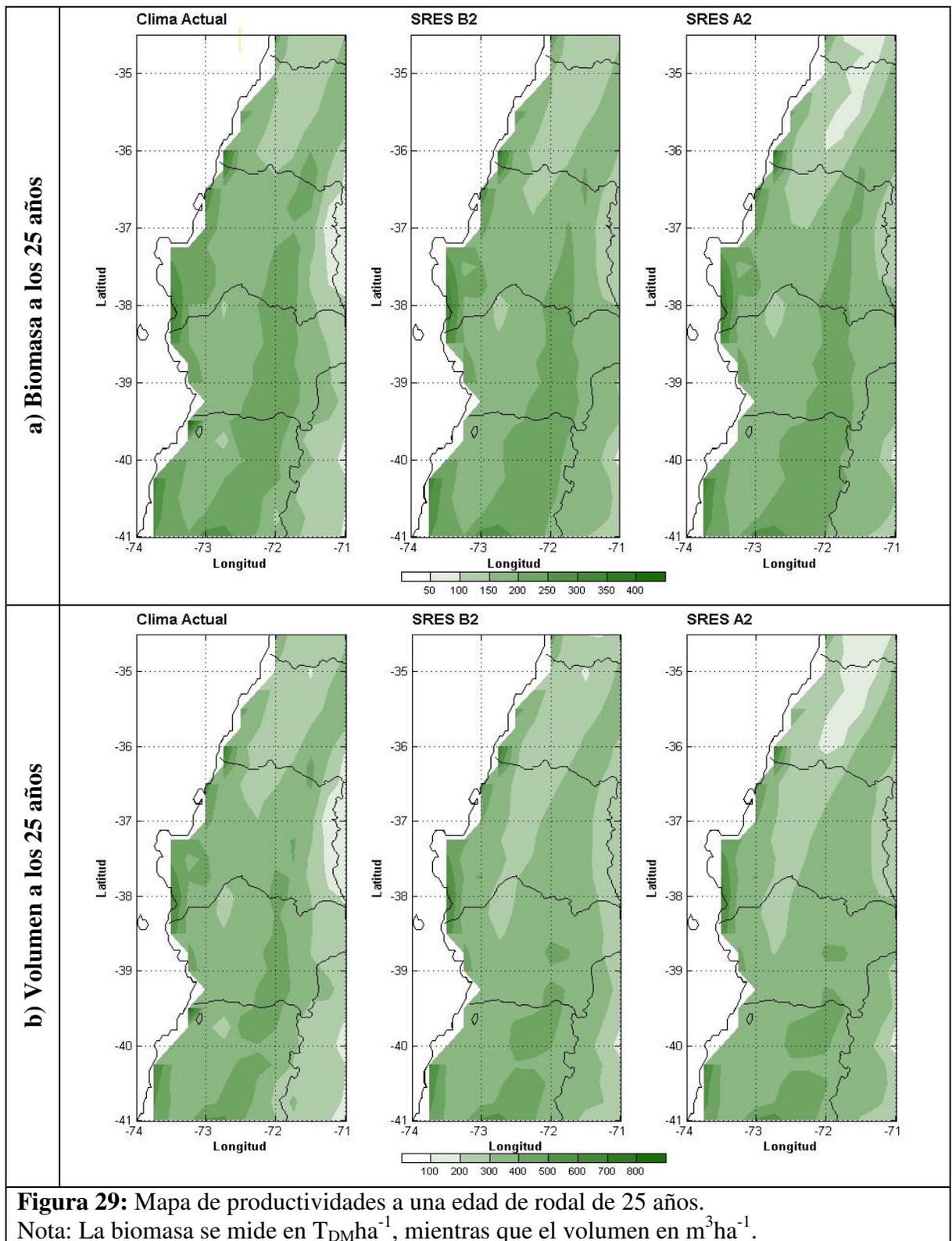
En relación al Cuadro 11 se indica que para un aumento del 10% de la temperatura máxima la productividad disminuye un 12% en comparación a la situación sin variación, esta disminución casi se triplica cuando el aumento es de un 30%, alcanzando un 32,5%. En el caso de una disminución en la temperatura máxima se favorece la productividad aumentando un 13% y un 40% a una disminución de un 10% y 30% respectivamente. Por lo mismo, se puede afirmar que la temperatura máxima restringe el crecimiento cuando aumenta porcentualmente y favorece el crecimiento cuando disminuye. Esta diferencia es de mayor magnitud al estar la temperatura máxima aumentada en un 30%. Este comportamiento se relaciona con que la especie presenta su mayor actividad vegetativa en los meses de otoño para el diámetro y en verano para la altura, encontrándose el menor crecimiento en invierno (Toral, 2005). Es decir, al disminuir la temperatura máxima en verano y otoño se favorece el crecimiento, ya que los estomas no se cerrarían para impedir la evapotranspiración de la planta, y por el contrario, al disminuir la temperatura en invierno el árbol inicia un período de receso. En el caso de la temperatura mínima se obtiene hasta un 12% de aumento en la productividad con un aumento de hasta 30% y disminuye en hasta un 12% para el mismo porcentaje. Para la radiación se observa que al disminuir un 10% y un 30% la productividad disminuye en un 10 y 22% respectivamente, mientras que para un aumento de los mismos porcentajes, la productividad aumenta en un 7 y 17%.

Se debe tener en cuenta que el Estudio de Variabilidad Climática para Chile (CONAMA, 2006) simula una disminución de hasta un 50% de la precipitación para el sector centro-sur del país en el escenario A2 y un aumento de hasta 4°C de temperatura para la misma zona en igual escenario. Esta combinación junto con los resultados del análisis de sensibilidad permiten suponer que se produciría una disminución de la productividad.

V.4. Evaluación de productividades

La evaluación de las productividades en 3-PG para cada escenario climático simulado por PRECIS reveló que la productividad en la zona de estudio disminuye en relación al escenario de clima actual. Es decir, el sector forestal se vería afectado por una disminución de la productividad de las plantaciones debido a las condiciones climáticas que presentará el país como consecuencia del cambio climático. La Figura 29 corresponde a los mapas de volumen y biomasa a la edad de rodal de 25 años para cada escenario climático, además se presenta en la sección 7 de los Apéndices los mapas correspondientes para una edad de rodal de 20 años. Se observa para ambas variables, volumen y biomasa, un impacto mayor en el escenario A2, con áreas más extensas de menor productividad, lo que indicaría que las condiciones climáticas que se proyectan para este escenario son desfavorables para el crecimiento del pino en comparación con las actuales. Además en cada mapa se observa notoriamente una zona de baja productividad en el norte de la zona de estudio, específicamente entre las latitudes -35° y -36°, siendo más relevante en el escenario A2, y una zona de mayor productividad hacia el sur en el sector precordillerano. También se distingue que las zonas costeras entre los -37° y -38° presentan los mayores niveles de biomasa tanto para A2 como B2, junto con esto se observa la presencia de áreas puntuales en el sector central de la región del Bío-Bío (lat -38°) de baja biomasa que no se presentan en el mapa de clima actual.

En cuanto a los valores de biomasa (Figura 29a), la evaluación con el clima actual entregó como máximo 400 $T_{DM}ha^{-1}$, ubicado en el sector costero entre la latitud -39° y -40°; y la evaluación con los climas futuros (A2 y B2) presentó un máximo de 300 $T_{DM}ha^{-1}$ en el sector costero de la octava región (-37° y -38°). Respecto al volumen (Figura 29b), la escala de las figuras muestra la disminución del mismo, ya que el máximo valor para el clima actual es de 700 m^3ha^{-1} , ubicado en el mismo lugar que el máximo de biomasa; mientras que para los climas futuros el máximo es de 650 m^3ha^{-1} ubicado en la misma área que en biomasa, el sector costero de la octava región. En la Figura 29b se observa que para los tres escenarios climáticos evaluados se presenta una zona de bajas productividades en la zona de los valles transversales de la región del Maule (tono verde claro), pero en el caso de los mapas que representan el clima futuro (A2 y B2) ésta área cubre una mayor extensión, alcanzando la región del Bío-Bío (lat. -39°) por el interior. Además en el caso del escenario A2 se observa la inclusión de otra área de bajas productividades no existentes en los demás escenarios con valores menores a los obtenidos con las otras dos simulaciones.



En la Figura 29, en la zona central a la latitud -38° para el clima actual se observa un área de baja productividad que para los mapas de clima futuro se desvanece debido al aumento de la extensión del área de baja productividad del norte de la zona de estudio mencionada anteriormente. En cuanto a las zonas de alta productividad se observa que para ambos escenarios futuros estas zonas se concentran en el sector precordillerano, además de observarse que las mayores productividades se encontrarían en los sectores costeros de la región del Bío-Bío y de Los Ríos. Se debe hacer notar que al final de la zona de estudio en la Figura 18, en el sector de los valles transversales se observa una pequeña área de alta productividad en los climas futuros, por lo cual puede suponerse que la productividad de *Pino radiata* en cuanto a los mayores volúmenes se concentrará en un futuro en zonas más al sur de la región del Bío-Bío, región que concentra hoy en día, la mayor superficie plantada de pino de todo el país.

Se debe mencionar que a los 20 años (Apéndice 7) las productividades tanto en volumen como en biomasa son inferiores a las obtenidas a una edad de rodal de 25 años. En cuanto a la biomasa, la zona de baja productividad estaría presente en el valle transversal y se extendería para los tres escenarios hasta la latitud -39° , siendo esta zona más extensa y ancha para los escenarios futuros. Además se observa que la zona de altas productividades del sector precordillerano se presenta como manchas insipientes no como una zona definida y clara como es el caso a los 25 años. Para el volumen a los 20 años, la zona de baja productividad también se encuentra en los valles transversales, pero cubre toda la zona de estudio, es decir, desde -35° a -41° . También se observa que el área entre las latitudes -35° y -36° para los tres escenarios climáticos evaluados corresponde a un área de mínima productividad, siendo más extensa para el escenario A2. Además no se aprecian zonas definidas de altas productividades sino que se cubre toda el área restante en una zona homogénea.

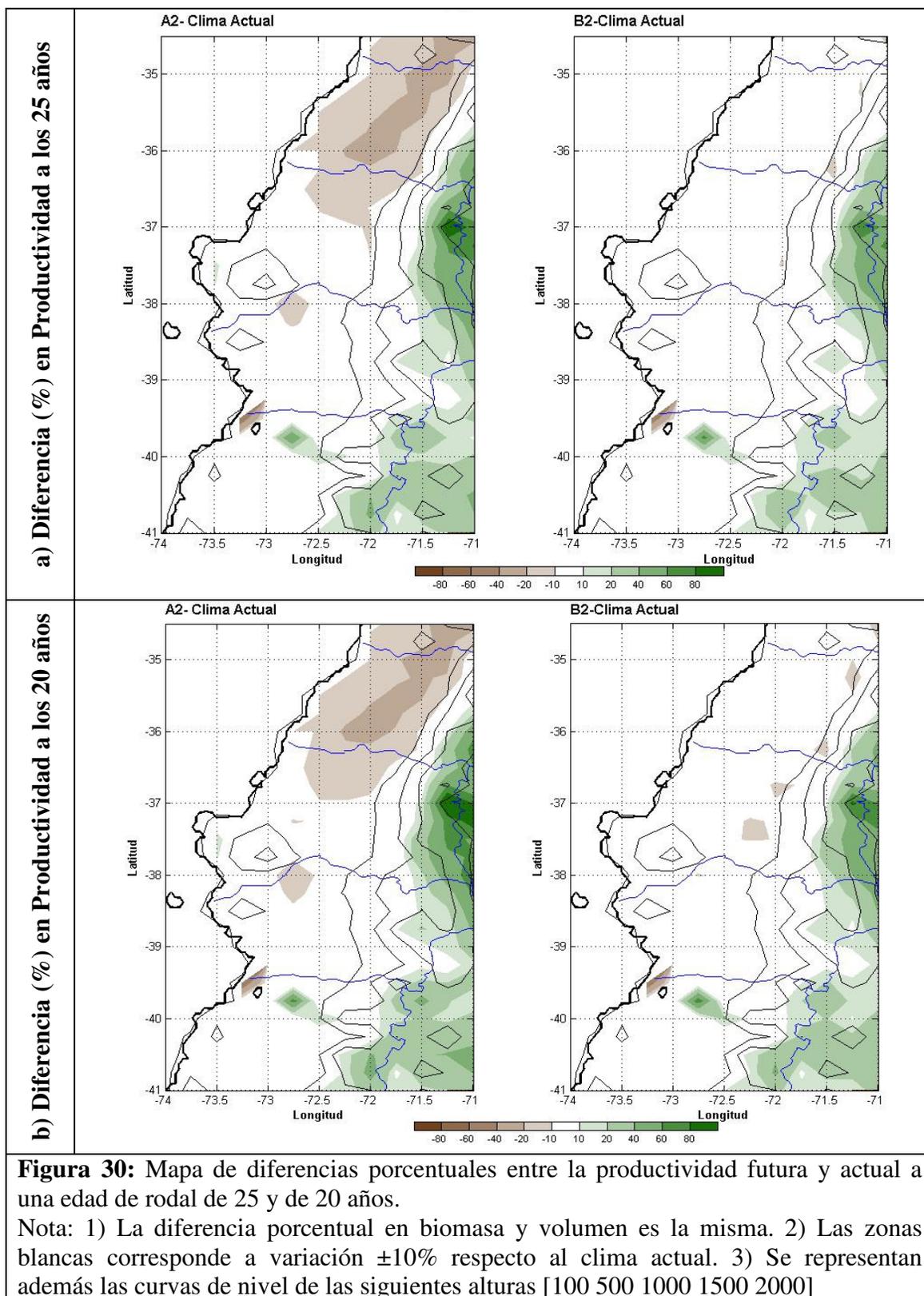
Para visualizar el cambio efectivo entre la productividad del clima actual y la de cada escenario del clima futuro se procedió a calcular la diferencia porcentual respecto al clima actual. Esto se representa en la Figura 30, que muestra en a) la diferencia porcentual entre el clima actual y futuro a una edad de rodal de 25 años y en b) la diferencia a una edad de rodal de 20 años. Se representan además las curvas de nivel de la zona de estudio a una separación de cada 500 metros. En el mapa los tonos cafés corresponden a diferencias negativas, es decir, donde con el clima actual se obtendrían mayores productividades; y los tonos verdes corresponden a diferencias positivas, donde con el clima futuro se obtendrían mayores productividades con respecto al clima actual. No se separó en biomasa y volumen debido a que la diferencia porcentual entre las variables mencionadas respecto al clima actual es la misma, esto sucede ya que en 3-PG la biomasa y el volumen varían en la misma proporción respecto al clima actual, por ende tienen el mismo porcentaje.

Se observa en la Figura 30a, que para el escenario climático A2 las diferencias respecto a la productividad del clima actual son marcadas para ambas edades de rodal, mientras que para el escenario B2 las diferencias son menores. En el caso del escenario A2 tanto para una edad de 25 y 20 años se observa que la zona entre las latitudes -35° y -37° , correspondiente a la región del Maule, presenta un área de diferencia negativa, es decir, la productividad

futura será menor que la productividad actual. Esta zona bajaría su productividad entre un 20% y 40% respecto al clima actual. La mayor extensión de la zona de estudio presenta variaciones de alrededor de un $\pm 10\%$, lo que corresponde a toda el área blanca de la zona. Esta variación puede deberse a las variaciones mensuales de las series utilizadas; se debe recordar que 3-PG reproduce el crecimiento a nivel mensual por lo que las variaciones mensuales de las distintas series pueden producir leves cambios en la productividad sin corresponder esto a una diferencia sustancial entre el clima actual y el clima futuro. En cuanto a las áreas donde con el clima futuro se obtendrían mayores productividades, éstas se encuentran ubicadas en toda la zona de estudio en el sector precordillerano y cordillerano, además de un área puntual en la latitud -40° . Las diferencias porcentuales alcanzan entre el 10% y 80% para A2. Se observa además, gracias a las curvas de nivel representadas, que éstas áreas presentan mayores alturas y se recuerda que en la discusión del modelo PRECIS, éste sobre-estima las precipitaciones en altura.

Para el escenario B2 se observa que para toda el área de estudio las diferencias son de alrededor de un 10%, excepto en la región cordillerana, mayor a 1.500 metros, donde se observan productividades mayores. Las áreas de mayor productividad con el clima futuro (verdes) son las mismas que en A2, pero con menor porcentaje de diferencia, entre un 10% y 60%. En relación a las áreas de menor productividad para el clima futuro (café), no se observan sectores marcados claramente para ninguna de las edades evaluadas (25 y 20 años).

En las figuras (29 y 30) obtenidas y representadas se indica que las zonas cordilleranas presentarían en un futuro las mayores productividades, es decir, a una altitud por sobre los 1.500 metros el crecimiento de la especie estudiada es mayor. En la actualidad esta zona corresponde a una zona sin potencial forestal debido a la constante presencia de nieves y de bajas temperaturas lo que impediría el crecimiento del pino (Gana, 1982). Pero se debe mencionar también que para el futuro se espera una disminución del área nival y un aumento de las temperaturas, por lo cual estas zonas obtendrían interés comercial. Sin embargo, las condiciones climáticas no son el único factor que determina el crecimiento de la especie, el pino requiere suelos de buen drenaje y de una profundidad de suelo de aproximadamente 90 cm. Además el crecimiento de dicha especie varía aún en zonas de altitud similar (Millar, 1974) y recién ahora se están observando anillos de crecimiento de mayor grosor en zonas montañosas (Ambrojo, 2009). Junto con lo anterior, el costo económico de plantar, manejar y extraer el material desde la plantación es un tema a considerar y analizar para evaluar la rentabilidad del proyecto.



Las figuras siguientes (Figura 31 y Figura 33) representan la biomasa a distintas latitudes, para los tres escenarios climáticos evaluados, en la longitud indicada en su respectivo título. Es pertinente aclarar que cada punto representado en la vertical, es decir en la latitud indicada, representa la biomasa por año de crecimiento, siendo el punto final a una edad de rodal de 25 años. Además se representa en cada figura la distancia a la costa del punto evaluado y en la Figura 32 se indican las alturas correspondientes a cada punto junto con la línea que representa cada longitud de las figuras 31 y 33 en la zona de estudio.

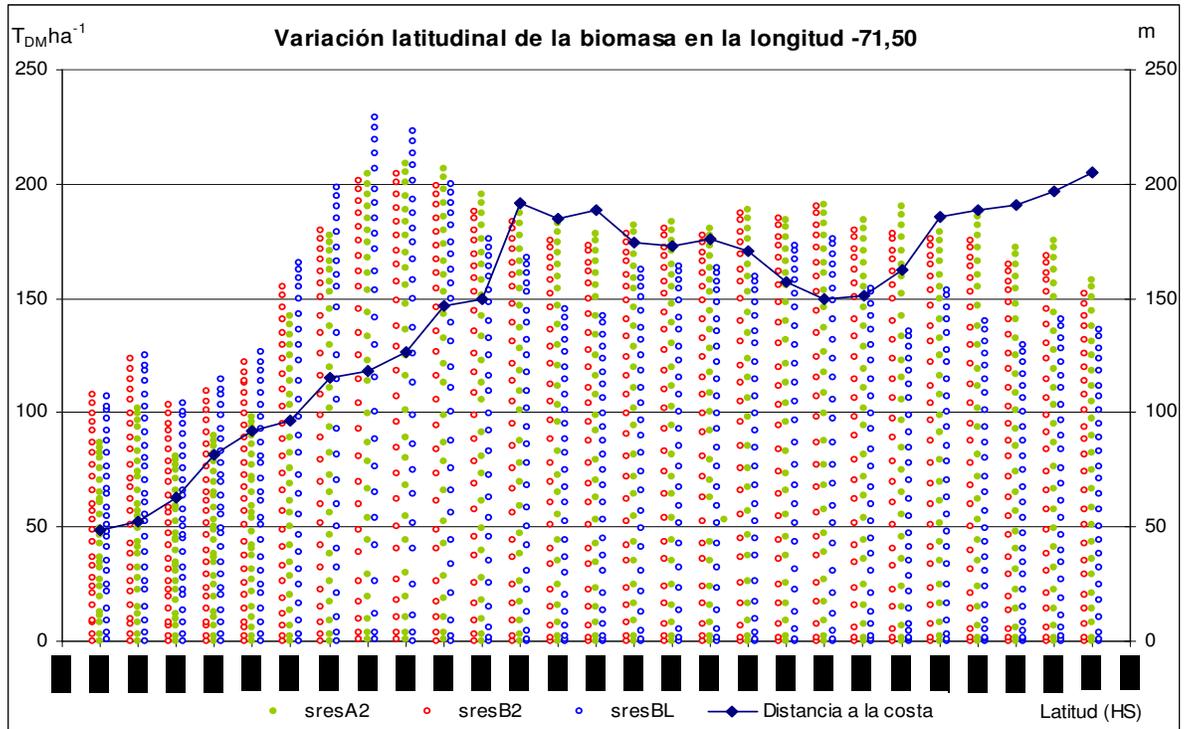


Figura 31: Variación latitudinal de la biomasa en la longitud -71,50.

Se observa que para la longitud -71,50 (Figura 31) toda la zona de estudio presenta valores de biomasa, debido a que todos los puntos se encuentran dentro del territorio continental de la zona de estudio (ver representación en Figura 32), también se distingue que entre las latitudes -36° y -37° se encuentran los valores máximos de biomasa. Además es notorio que hacia el sur se presentan valores mayores de productividad en comparación con las productividades de la zona norte. Para el escenario BL (Línea base o clima actual representado con los puntos color azul) las productividades obtenidas tienen mayor valor que aquellas del clima futuro hasta la latitud $-36,75$ mientras que después de este punto hacia el sur tienen menor valor respecto a la biomasa obtenida con los climas futuros. Para el escenario A2 (puntos verdes) se observa que en la zona norte presentaría productividades menores en toda la edad del rodal y que en la zona sur los valores son mayores. La línea representada en la figura indica que hacia el sur la distancia desde el punto evaluado hasta la costa es mayor, es decir, los puntos se encuentran ubicados al interior del país. Esta situación manifiesta la existencia de una relación entre la productividad y la distancia a la

costa, ya que los puntos de menor biomasa coinciden con aquellos ubicados cerca de la costa y los de mayor biomasa son aquellos localizados en los valles transversales. Esto se observa además en los mapas de productividades (Figura 29) donde se indican que las zonas cordilleranas son las cuales presentarán mayores productividades en un futuro y gracias a la Figura 32 se observa que todas las zonas de mayor productividad se encuentran sobre los 1.000 metros.

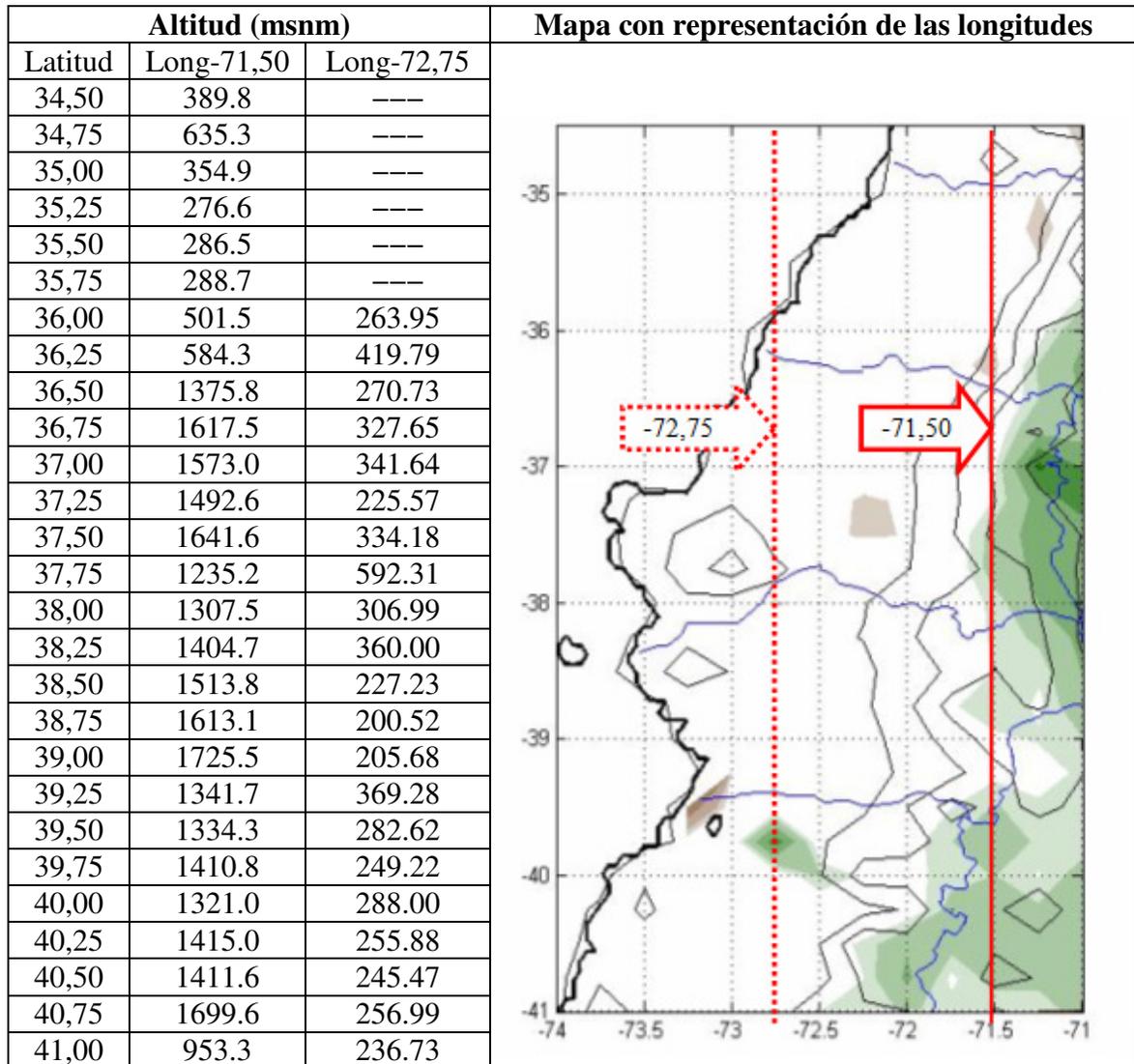


Figura 32: Alturas de cada punto de las figuras 31 y 33 y representación en líneas de las longitudes usadas en dichas figuras.

En cuanto la Figura 33, se representa la biomasa para cada latitud en la longitud -72,75 para el clima actual (BL) y el clima futuro, representado por los escenarios A2 y B2. Es posible observar que la figura tiene valores representados desde la latitud -36°, ya que las latitudes al norte de este punto corresponden a zonas marinas. Además se observa que en las

latitudes -36° y $-36,25^\circ$ presentan alta productividad comparativamente con los demás puntos representados, mas estos puntos se encuentran muy cercanos a la costa, por lo cual se presume que podrían verse alterados por esta situación, siendo una posible causa que por la interpolación utilizada los datos para ese punto correspondan a datos climáticos de la zona marina. La biomasa indicada desde la latitud $-36,50^\circ$ hasta la -41° presenta valores relativamente parejos, en el rango de 150 y 250 $T_{DM}ha^{-1}$. En esta figura es posible identificar que al contrario de la figura anterior la productividad obtenida con el clima actual es mayor en la mayoría de las latitudes respecto al clima actual, no siendo ésta una gran diferencia. Se debe destacar que en la latitud $-38,75^\circ$ la biomasa para el clima actual (azul) es considerablemente inferior a la del clima futuro. Este punto coincide con el punto de baja productividad de la zona sur de la zona de estudio visualizado en la Figura 29 y con la zona de alta productividad en porcentajes de la Figura 30. Se observa además que hacia el sur se encuentran las productividades mayores. En relación a la distancia a la costa se observa que los puntos presentan una variación de la misma, encontrándose la mayoría de ellos en el sector de los valles transversales.

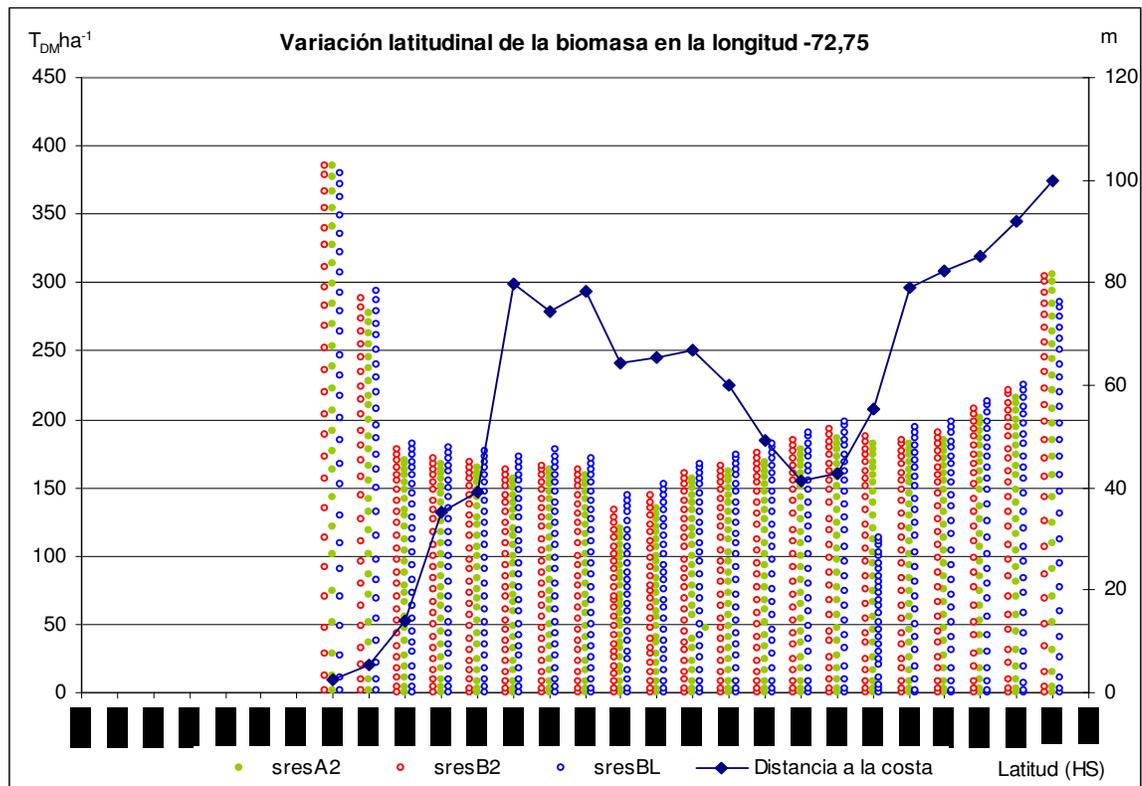


Figura 33. Variación latitudinal de la biomasa en la longitud -72,75.

El efecto del cambio climático en el sector forestal ha sido estudiado por distintas instituciones y organismos y diversos estudios señalan que América del Sur se vería favorecida por el cambio climático en el sector forestal, indicando algunos de estos estudios un aumento de entre un 10% y un 13% proyectado para el 2040 (Pérez-García *et al*, 2002), pero por otra parte, se plantea que existiría una reubicación de las plantaciones

principalmente desde las regiones tropicales a las subtropicales y en particular hacia Argentina y la zona sur de Brasil (Samaniego, 2009). Esta situación tiene relación con que en estas zonas se predice un aumento de las precipitaciones por el cambio climático y situación que es observable en las Figuras 07 y 08 de la simulación de PRECIS.

En el caso de Chile se observa una disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas en gran parte del país, que afecta principalmente a la zona centro-sur, donde coincidentemente se concentran los sectores silvoagropecuarios. Esto plantea una situación de escasez de recursos hídricos para el riego en agricultura, un potencial desplazamiento hacia el sur de las actividades agrícolas y una aceleración en los ciclos de las plagas. Es así como se menciona por ciertos especialistas que el efecto del cambio climático en la agricultura puede ser positivo o negativo dependiendo de la especie que se cultive y la zona donde se realice (Aldunce *et al.*, 2008). En el caso del sector forestal CONAMA (1999) indicó que bajo el escenario de duplicación del CO₂ se produce un deterioro notable del potencial productivo en las regiones V, VI y VII, observándose además una expansión de la zona de mayor potencial productivo desde la VIII región hacia el sur, donde la región de Los Lagos aumentaría sensiblemente su potencial forestal expandiéndose éste hacia el interior y la zona precordillerana (Neuenschwander, 2009). El trabajo realizado para esta tesis, confirma estas proyecciones. En los mapas de productividad mostrados (Figura 29), se observa que las zonas más cercanas al centro del país disminuirían su potencial, mientras que las zonas más al sur y cordilleranas podrían presentar un aumento de las mismas. Esto también es evidencia en el trabajo de Santibañez (2007), donde se realizó un análisis de la vulnerabilidad y adaptación de diversos sectores productivos al cambio climático y se indica que la zona de productividad del pino radiata mejora significativamente a partir de la región de Los Ríos hasta Chiloé. La explicación de este fenómeno, para el autor mencionado, es debido al “*mejoramiento en las temperaturas de primavera y otoño, que alargarán el ciclo anual de crecimiento de esta especie*”. Otro estudio realizado por el Instituto Forestal (Bahamondez, 2009) sobre el tema indica un valor porcentual de variación de la productividad por región, donde la región VII presentaría un variación de -8,63%, la VIII región de -6,54%; la IX región de -1,56% y la XIV región presentaría una variación positiva de 2,54%.

VI. CONCLUSIÓN

Los cambios en el clima y su variabilidad, proyectados para Chile como consecuencia del incremento de gases de efecto invernadero, representan un desafío para los sectores productivos primarios, es decir, aquellos como la agricultura, pesca y silvicultura. Por lo mismo es que existe el interés de los sectores económicos en estudiar este fenómeno y sus impactos para prevenir y adaptar sus actividades con el propósito de mantener o incrementar sus beneficios. El sector de interés para este estudio correspondió al sector forestal, sector que representa una actividad económica importante, contribuyendo con un 3% al PIB (Banco Central, 2008) y en permanente alza dentro de la economía nacional. La producción esta destinada principalmente a la exportación y al consumo nacional, por lo cual la importación de productos desde el extranjero es menor que la exportación. Además el sector esta basado en plantaciones forestales, principalmente de *Pino radiata*, especie introducida que es originaria de California, Estados Unidos. La concentración de las plantaciones se encuentra en la zona centro-sur de Chile, específicamente entre las regiones VII a X, siendo la región del Bío-Bío la que presenta la mayor superficie plantada del país.

Las proyecciones climáticas para fines de siglo realizadas por la Universidad de Chile en el marco del Estudio de variabilidad climática para Chile para fines de siglo (CONAMA, 2006) presentan dos escenarios climáticos para la región, con distintos escenarios de emisión. Además existe una simulación control, que representa el clima actual (periodo 1961-1990). La consistencia entre el clima actual simulado por PRECIS y datos reales de la zona de estudio demuestra que PRECIS modela apropiadamente el comportamiento anual y estacional de las variables climáticas ubicando el mínimo en invierno y el máximo en verano para las temperaturas y al contrario para las precipitaciones. No obstante, presenta un sesgo sistemático de una sobre-estimación de la temperatura en los meses de verano de alrededor de 2° a 4°C principalmente para la temperatura mínima y en la precipitación de la zona cordillerana. También se observó que modela correctamente la distribución espacial de la precipitación y temperatura, ubicando las zonas de mayor temperatura y menor precipitación al norte de la zona de estudio, mientras que las áreas de menor temperatura y mayor precipitación se concentran en los sectores precordilleranos y cordilleranos. En cuanto a la correlación de las variables los resultados son concordantes con los visualizados en las figuras de climatologías, histogramas y percentiles, donde la temperatura máxima presenta una correlación entre datos simulados y reales sobre el 0.9, para la temperatura mínima entre 0.8 y 0.9 y finalmente para la precipitación entre 0.45 y 0.6.

El cambio climático depara para Chile un aumento en las temperaturas en la totalidad del país y una disminución de las precipitaciones, además se proyecta un alza en la altitud de la isoterma 0°C, por lo cual la zona de acumulación de nieves se reduciría afectando directamente los ciclos hídricos de las cuencas y las actividades económicas respectivas. Estas variaciones climáticas tendrían un efecto en el crecimiento y productividad de *Pino radiata*. El trabajo realizado permite concluir que el pino es sensible a la variación de la temperatura máxima que restringe el crecimiento al producir un cierre en los estomas. En

cuanto a la temperatura mínima se prevé un aumento de su valor, por lo tanto en una leve variación positiva favorece el crecimiento de la especie al alargar la estación donde se produce el crecimiento vegetativo de la especie. En el análisis de sensibilidad se observó que la temperatura máxima actúa como el principal limitante de crecimiento, donde a mayor temperatura se obtiene menor productividad. Para un aumento del 10% de la temperatura máxima la productividad disminuye un 12% y esta disminución casi se triplica cuando el aumento es de un 30%, alcanzando un 32,5%. Además la precipitación disminuye la productividad del pino en hasta un 6% cuando la precipitación es menor en un 30% y para una variación del 10% la productividad presenta una variación mínima, de alrededor de 2%. Si bien en el análisis de sensibilidad realizado la precipitación por si sola no constituye un factor de restricción del crecimiento tan relevante como la temperatura se considera que la precipitación determina la cantidad disponible de agua en el suelo y se proyecta una disminución de esta en los dos escenarios climáticos futuros.

Los efectos de la variación climática sobre la productividad de pino en la zona comprendida entre la VII y la XIV región, corresponden a una disminución de ésta. Los mapas realizados muestran una disminución general de la productividad en toda la zona, donde las áreas donde se presentarían las mayores pérdidas corresponden a la región del Maule (VII) y al norte de la región del Bío-Bío (VIII). Para el escenario A2 la disminución sería del orden de un 20% a 40% respecto al clima actual para la zona del Maule. Además se observó que las zonas precordilleranas desde la VIII región al sur se verían favorecidas climáticamente para el crecimiento de pino. Las diferencias porcentuales entre el escenario A2 y el clima actual para esta zona alcanzan entre el 10% y 80%. Para el escenario B2 se observó que para toda el área de estudio las diferencias son menores a 10%, excepto en la región cordillerana, mayor a 1.500 metros, donde se encuentran productividades mayores. Las áreas de mayor productividad con el clima futuro son las mismas que en A2, pero con menor porcentaje de diferencia, entre un 10% y 60%. Si bien se proyecta una disminución en el potencial productivo de las zonas donde actualmente se concentra la producción de pino, se revela un reordenamiento de las zonas potenciales, las que se desplazarían hacia el sur del territorio, específicamente a los sectores de interior y precordilleranos. Esta conclusión se ha alcanzado en distintos estudios dentro de los cuales se puede mencionar los realizados por Santibáñez (2007), Bahamondez (2009) y CONAMA (1999).

El impacto en el sector forestal tendrá clasificación de negativo o positivo en base al nivel de adaptación de los involucrados a los cambios climáticos, es decir, a las políticas de mitigación o de prevención como a los mecanismos de acción adoptados. El manejo forestal involucra más actividades que solo la plantación y observación del crecimiento, existen técnicas de raleo, fertilización, manejos genéticos, entre otros, que potencian el crecimiento en conjunto con las variables climáticas. Por lo mismo, el estudio de estos factores se hace relevante ante un escenario climático adverso. Por otro lado, la extensión de las plantaciones hacia las zonas donde se proyectan condiciones climáticas aptas para la actividad se presenta como alternativa ante una disminución de la productividad. Sin embargo, surge la interrogante de que en las regiones X, XI y XII se concentra la mayor superficie de bosques naturales del país, y del cómo las industrias forestales ampliarían sus terrenos de plantación con especies introducidas. Ante este escenario el mercado de los

bonos de carbono se presenta como un mecanismo de fomento a la conservación del medio ambiente. A esto debe agregarse la nueva Ley de Bosques Nativo que persigue la protección y la intervención de las especies autóctonas sin su sustitución (Ley 20283).

Es relevante también comentar la utilización de un modelo de crecimiento basado en los procesos fisiológicos, debido a que se manejan los factores específicos que determinan el crecimiento para *Pino radiata*, además si a esto se acopla una base climática de simulación mensual para un amplio rango de años es posible simular con mayor precisión el comportamiento de la especie ante escenarios climáticos determinados.

Las recomendaciones que se pueden hacer para mejorar el trabajo realizado en esta tesis y que se aclararon una vez finalizado el tema tienen relación con: primero, realizar una corrección a las precipitaciones simuladas por PRECIS debido a la sobre-estimación de las mismas en relación a la altura. Segundo, modificar la fecha de plantación en terreno de *Pino radiata*, debido a que por los cambios climáticos la fecha habitual de plantación podría no presentar las condiciones climáticas apropiadas para dicha acción. El mencionar condiciones climáticas apropiadas hace referencia a que en un futuro quizás el mes de plantación en terreno actual tenga temperaturas mayores y precipitaciones menores que no favorezcan el crecimiento inicial de la especie. Tercero, se recomienda ampliar la superficie evaluada en 3-PG con la intención de abarcar la totalidad de la zona que se menciona puede presentar condiciones favorables para el crecimiento del pino. Cuarto, incluir métodos de manejo para plantaciones forestales, con el objetivo de encontrar los métodos adecuados para maximizar la productividad potencial de los escenarios futuros. Se debe especificar que la segunda recomendación es factible incorporarla en el modelo 3-PG al igual que la cuarta recomendación, tema que fue planteado en el trabajo de (Rodríguez *et al*, 2003).

VII. BIBLIOGRAFÍA

Aldunce, P. *et al*, 2008. Informe Final. Sistematización de las políticas y estrategias de adaptación nacional e internacional al cambio climático del sector silvoagropecuario y de los recursos hídricos y edáficos. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Ambrojo, 2009. Los árboles más longevos del mundo crecerán más desde 1950. Diario el País, sección Sociedad, 17/11/2009. Disponible en el WWW: http://www.elpais.com/articulo/sociedad/arboles/longevos/mundo/crecen/1950/elpepusoc/20091117elpepusoc_17/Tes Leído el 02 de Enero de 2010.

Bahamondez, C., 2009. Estimación de vulnerabilidad en bosques de Chile. Proyecto Integrado de riesgo climático en el sector silvoagropecuario, Consorcio INIA, INFO, CIREN. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 27pp.

Banco Central de Chile, 2008. Producto Interno Bruto por clase de actividad económica-Serie anual. Disponible en el WWW: www.bcentral.cl Leído el 09 de Diciembre de 2009.

Battaglia, M., Sands, P., 1997. Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors. En: Sands, P., 2004. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data Collection and promoter assignment. Cooperative Research center for Sustainable Production Forestry, CSIRO Forestry and Forest Products, Australia. 42 pp

Battaglia *et al.*, 2004. CABALA: a linked carbon, water and nitrogeno modelo f forest growth for silvicultural decision support. En: Sands, P., 2004. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data Collection and promoter assignment. Cooperative Research center for Sustainable Production Forestry, CSIRO Forestry and Forest Products, Australia. 42 pp

Biblioteca Congreso Nacional (BCN), 2008. DTO-4363, Aprueba texto definitivo de la ley de bosques. Ministerio de tierras y colonización, Gobierno de Chile. 7pp

Bordeu, A., 1998. Panorama del Sector Forestal de Chile. Disponible en el WWW: <http://www.inta.gov.ar/concordia/info/Forestales/contenido/pdf/1998/81%20BordeuIXrevisado.pdf> Leído el 03 de Noviembre de 2008.

Bureau of Meterology, 2009. The greenhouse efect and climate change. Australian Government. Disponible en el WWW: <http://www.bom.gov.au/index.shtml> Leído el 20 de Febrero de 2009.

Cámara Chilena de Construcción (CCHC), 2009. Índice mensual de la actividad de la

construcción (IMACON). Disponible en el WWW: <http://www.cchc.cl/estadisticas/cgi/imacon.asp> Leído el 05 de Junio de 2008.

Castaño, E. y Martínez, J., 2008. Uso de la función de correlación cruzada en la identificación de modelos ARMA. *Revista Colombiana de Estadística* (31)2: 293-310.

Cerda, I., 1998. Trayectoria del sector forestal chileno: sus logros y desafíos. Informe Técnico N°140. Instituto Forestal. Santiago, Chile.

CONAMA, 1999. Primera Comunicación Nacional bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comisión nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile. 156pp.

CONAMA, 2006. Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, cambios climáticos regionales para fines del siglo XXI obtenido mediante el modelo PRECIS. Disponible en el WWW: <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/> Leído el 10 de Marzo de 2009.

CONAMA, 2006₁. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Elaborada por el Comité Nacional Asesor sobre el Cambio Climático, Gobierno de Chile. 8pp

CORMA, 2009. Plantaciones forestales/*Pinus Radiata*. Disponible en el WWW: http://www.corma.cl/portal/menu/recurso_forestal/Plantaciones/pino_radiata.html Leído el 02 de Junio de 2009.

Coops, N. and Waring, R., 2001. Assessing forest growth across southwestern Oregon under a range of current and future global change scenarios using a process model, 3-PG. *Global Changes Biology* 7, 15-29.

Departamento Geofísica (DGF), 2009. Atmósfera, Meteorología interactiva. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible en el WWW: <http://www.atmosfera.cl/> Leído el 16 de Febrero de 2009.

Dirección Meteorológica de Chile (DMC), 2009. Climas de Chile. Dirección meteorológica de Chile, Dirección general de aeronáutica civil. Disponible en el WWW: <http://www.meteochile.cl/climas/climas.html> Leído el 04 de Marzo de 2009.

Donoso, 1982 en Miquel, R., 2002. Crecimiento temporal del diámetro fustal en *Eucalyptus globulus* Labill y su relación con la temperatura, precipitación y humedad relativa en el fundo Los Pinos, comuna de Valdivia X Región. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 100pp

Flores, F. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque* 25(3): 11-24.

- Forestal Tornagaleones S.A., 2009. Procesos. Disponible en el WWW: <http://www.forestaltornagaleones.cl/procesos.html> Leído el 15 de Septiembre de 2009.
- Fresno, F. y Orella J., 1995. El Sector Forestal Chileno. El campesino 126:10 (Oct 1995).12 pp.
- Gajardo, R., 1995. La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica. Segunda Edición, Editorial Universitaria, Santiago. 165 pp
- Gana, J., 1982. Análisis y perspectivas del sector forestal. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. 354pp.
- García, E., Sotomayor, A., Silva, S., Valdebenito, G., s. a. Establecimiento de plantaciones forestales, *Pinus radiata*, *Pinus ponderosa*, *Pseudotsuga menziesii*. Fondo de de Desarrollo e Innovación, Instituto Forestal. 38pp
- Gayoso, J., s. a. *Pinus radiata*. Resultados Proyecto FONDEFF D98i1076 “Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales y promoción en el mercado mundial del carbono”. Disponible en el WWW: <http://www.uach.cl/> Leído el 02 de Junio de 2009.
- Gestión forestal, 2009. *Pino radiata (pino insigne)*. Sistema de gestión forestal. Disponible en el WWW: <http://www.gestionforestal.cl:81/index.html> Leído el 09 de Marzo de 2009.
- González, L., 2003. Apuntes de Geografía General, Revisión 2003. Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 80 pp
- Hinton, O., s. a. Chapter 6: Describing Random Sequences en “EEE305”, “EEE801 Part A”: Digital Signal Processing. University of Newcastle upon Tyne, School of Electrical, electronic and computer engineering. 8pp.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2007. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2007₁. Enfoque estadístico, VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Boletín informativo del Instituto Nacional de Estadísticas, 12pp
- Instituto Forestal (INFOR), 2005. El sector forestal chileno en una mirada. Instituto Forestal, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 68pp
- INFOR, 2005₁. Resumen ejecutivo del Estudio de Disponibilidad de Pino radiata: 2003-2032. Instituto de Investigación Forestal de Chile, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 6pp.

INFOR, 2006. Superficie de plantaciones forestales IV a XI regiones, actualización a diciembre de 2005. Instituto Forestal, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 40 pp.

INFOR, 2007. Evolución de las exportaciones forestales 1990-2005. Disponible en el WWW:

<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servlet/contenidos.ServletDetallesScr;jsessionid=7DDCEB015BB82C9D5D401AC1761B26A5?idcla=2&idcat=9&idclase=99&idn=1905> Leído el 20 de Mayo de 2009.

INFOR, 2008. Información digital de exportaciones forestales: Exportaciones forestales 2008. Disponible en el WWW: http://www.infor.cl/estadisticas_mercado/sistema_exportaciones_digital.htm Leído el 22 de Mayo de 2009.

INFOR, 2008₁. Mercado Forestal n°32, Enero-Marzo de 2008. Área de economía y Mercado, Sede Metropolitana, Instituto Forestal, Chile. 17pp.

INFOR, 2009. Mercado Forestal n°36, Enero-Marzo de 2009. Área de economía y Mercado, Sede Metropolitana, Instituto Forestal, Chile. 16pp.

Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Republica de Chile, Ministerio de Agricultura, Santiago. 221pp

IPCC, 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento técnico II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza, 60pp.

IPCC, 2007. Cambio climático 2007: 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 [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

IPCC, 2007₁. Climate change 2007: The physical science basis. Frequently Asked Questions and selected technical summary boxes. Working group I Contribution to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

Lambers, H., Chapin, III, F. S. and Pons, T. L., 1998. Plant Physiological Ecology. Springer-Verlag, New York.

Landsberg, J. and Waring, R., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. Forest Ecology and Management 95: 209-228.

Millar, 1974. *Pinus radiata* en el Ecuador, su ecología y crecimiento. En Perspectivas de la

madera en los Estados Unidos. Unasylya N° 105 (26). Disponible en el WWW: <http://www.fao.org/docrep/e7730s/e7730s05.htm> Leído el 02 de Enero de 2010.

Neuenschwander, A., 2009. Cambio climático: Perspectivas en el mundo y en Chile. Seminario de Cierre, Desarrollo de capacidades y promoción de proyectos de forestación en el MDL. Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 12 de marzo de 2009. 26pp.

Peralta, M., 1976. Requerimientos ecológicos *Pinus radiata* (Pino insigne). Disponible en el WWW: http://www.gestionforestal.cl:81/pt_02/plantaciones/fichap_radiata.htm Leído el 03 de Junio de 2009.

Pérez-García *et al*, 2002. Impacts of climate changes on the global forestall sector. Climate Change (54). En Samaniego, J., 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y El Caribe: una reseña. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL), Santiago, Chile. 148pp.

Riquelme, J., 2004. Estrategias comerciales para los principales productos y mercados internacionales del sector forestal chileno. Tesis para optar al grado de magíster en gestión y dirección de empresas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 92pp.

Rodríguez *et al*, 2003. Utilización del modelo 3-PG, un modelo basado en procesos, en el análisis de la productividad de plantaciones de pino radiata manejado con diferentes regímenes silviculturales. Bosque, 24(1): 35-45.

Salazar, C. 2003. Situación de los recursos hídricos de Chile. Reporte de investigación con aporte de The Nippon Foundation. Centro del tercer mundo para el manejo del agua, México. 109 pp

Samaniego, J., 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y El Caribe: una reseña. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL), Santiago, Chile. 148pp.

Sands, P., 2004. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data Collection and promoter assignment. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, CSIRO Forestry and Forest Products, Australia. 42 pp

Santana, J., 1998. Análisis del crecimiento de un rodal de *Pinus Radiata* D.Don de 42 años de edad. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 36pp.

Santibañez, F. y Uribe J. M., 1993. Atlas agroclimático de Chile: Regiones VI a IX. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agroclimatología, Santiago, Chile. 132pp

Santibáñez, F. y Uribe, J. M., 2007. Los cambios climáticos globales: ¿Qué deparan para la Agricultura en Chile?. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Chile. Septiembre 5 de 2007.

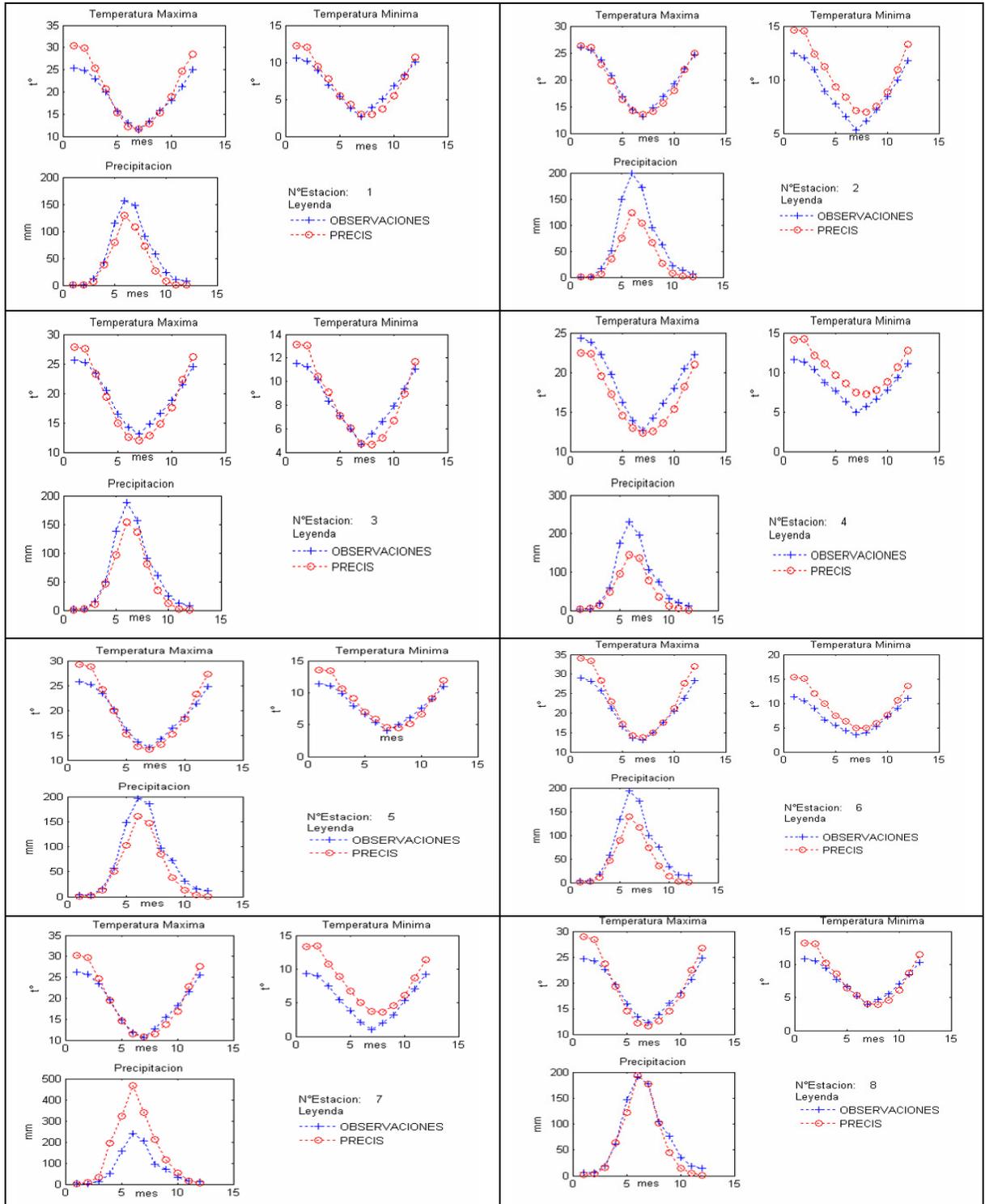
Solórzano, M., 2007. El sector forestal en Chile y su contribución al desarrollo. Tesis para optar al grado de magíster en gestión y políticas públicas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 221pp

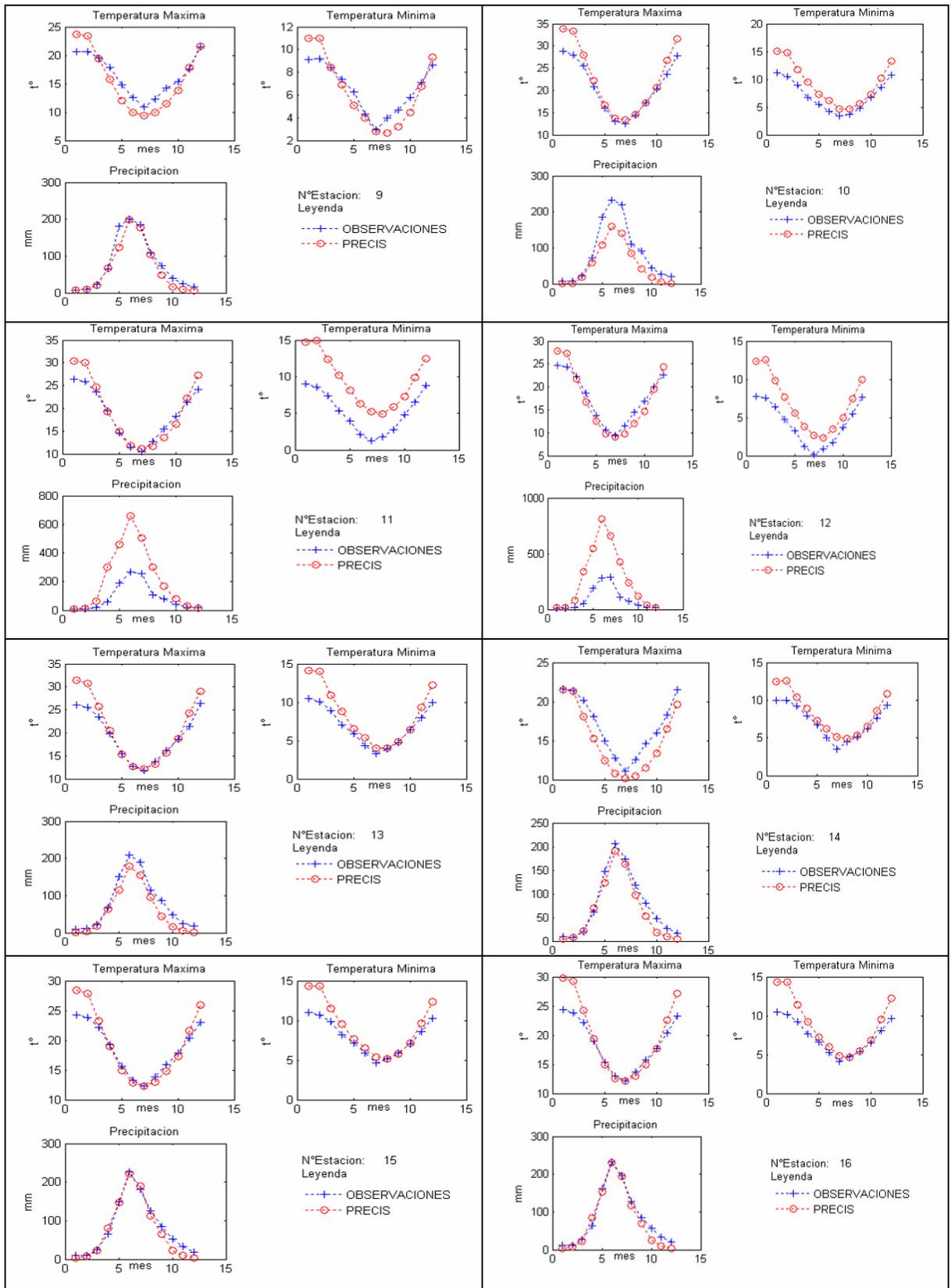
Toral, 2005. Crecimiento estacional y rentabilidad de plantaciones forestales comerciales de pino radiata en suelos de trumao según método de establecimiento. Bosque 26(1):43-54.

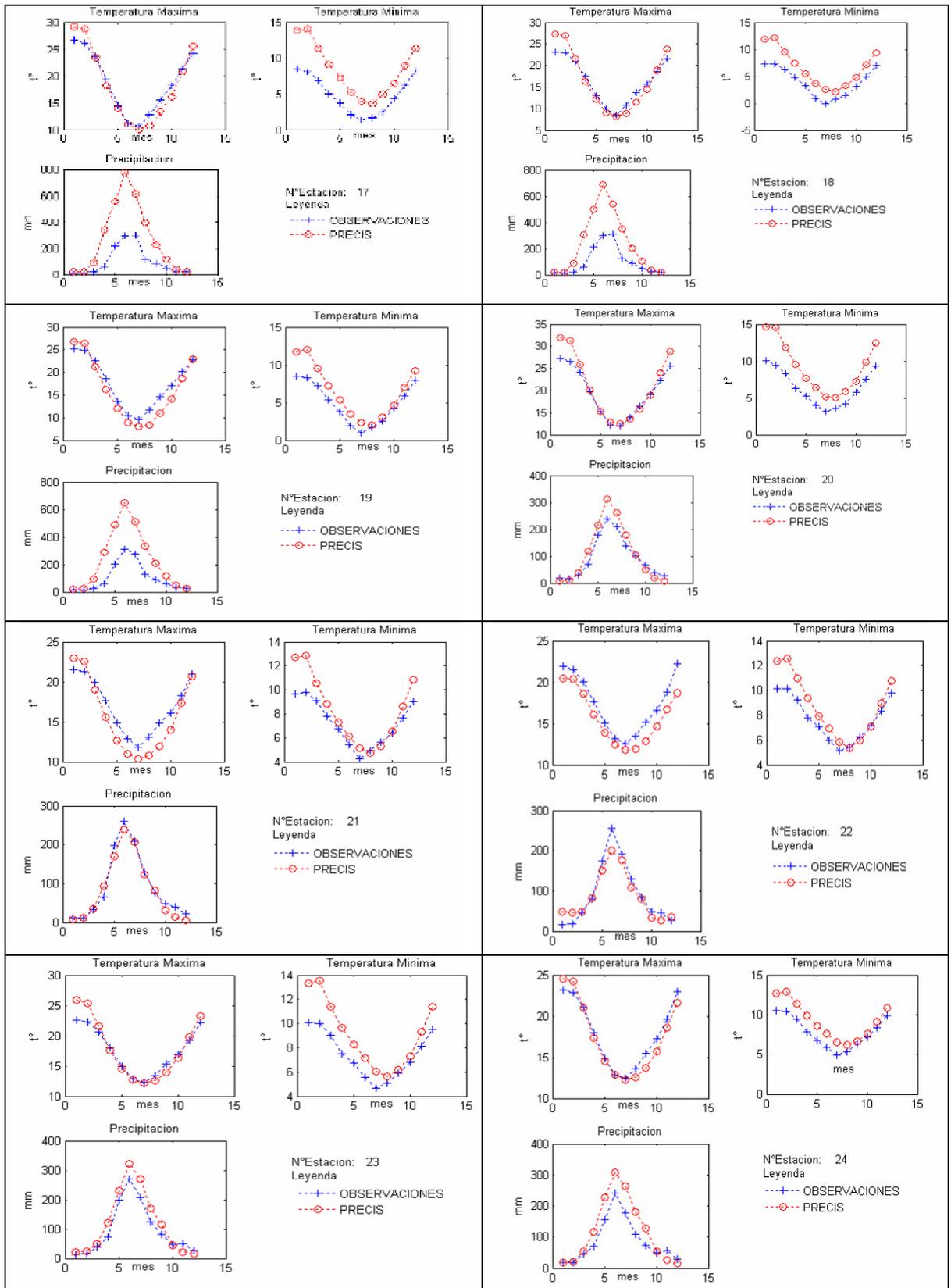
Young, R. 1991. Introducción a las ciencias forestales. Editorial LIMUSA, México. 632 pp

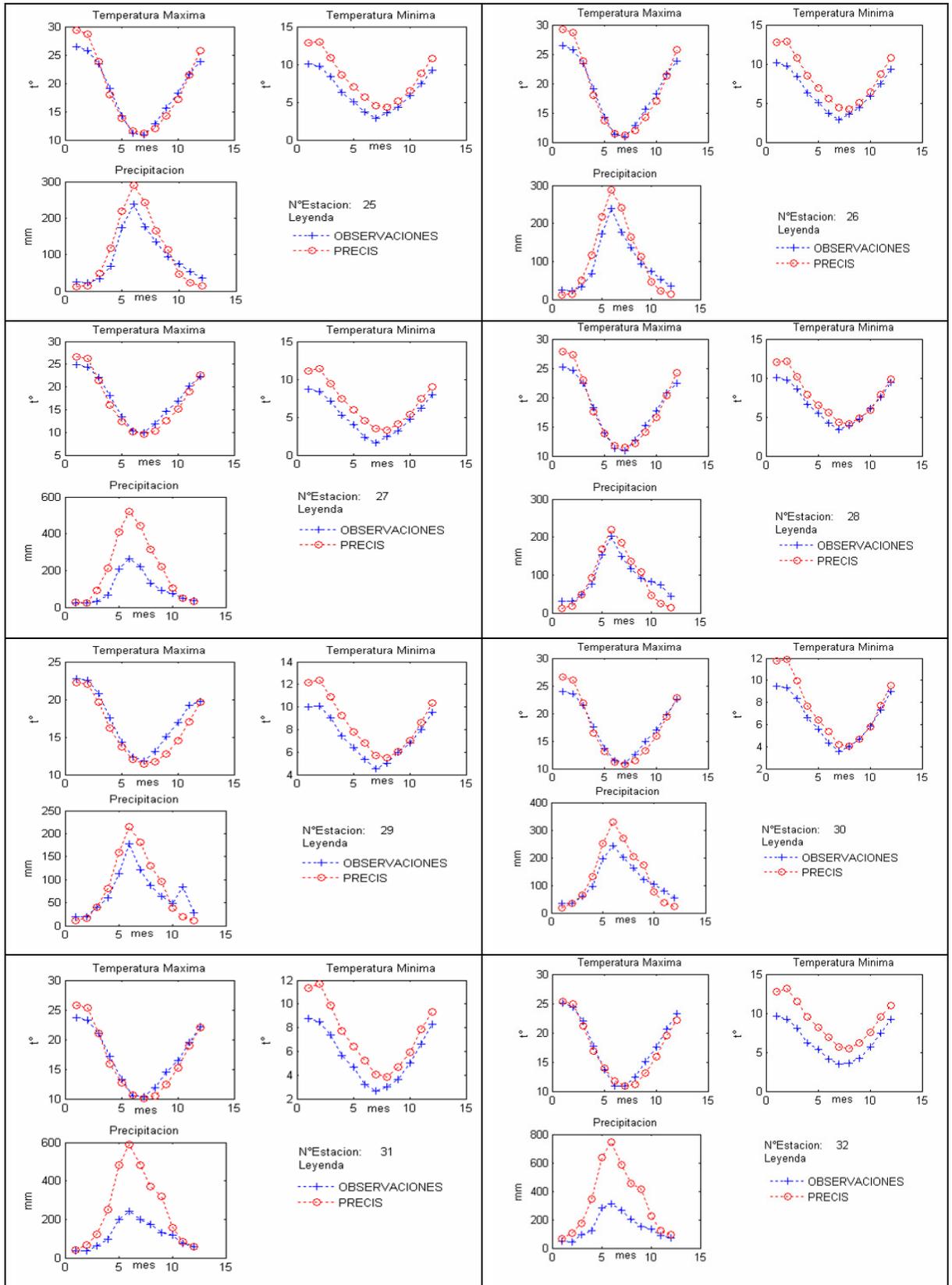
VIII. APENDICES

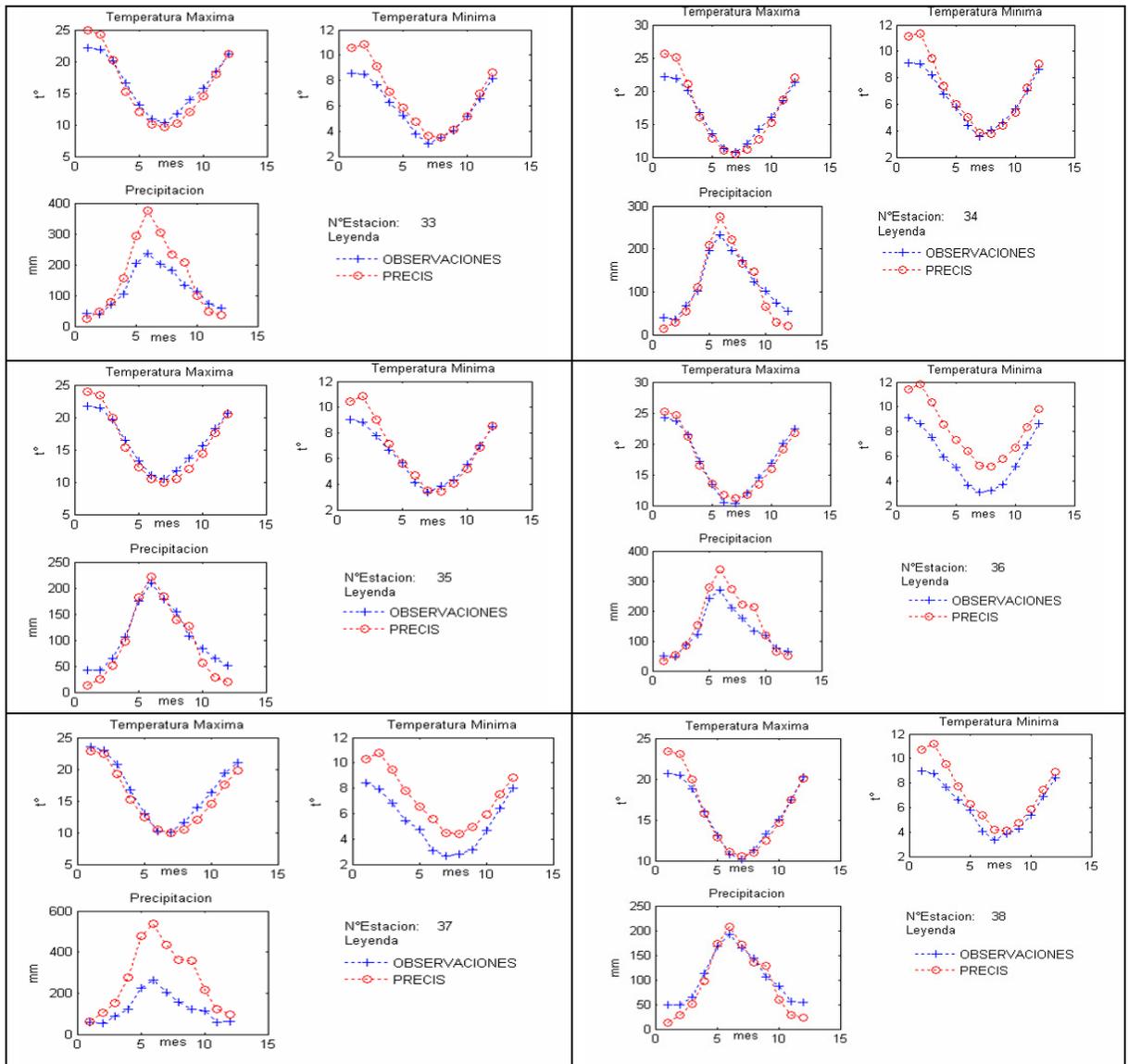
VIII.1. Climatologías



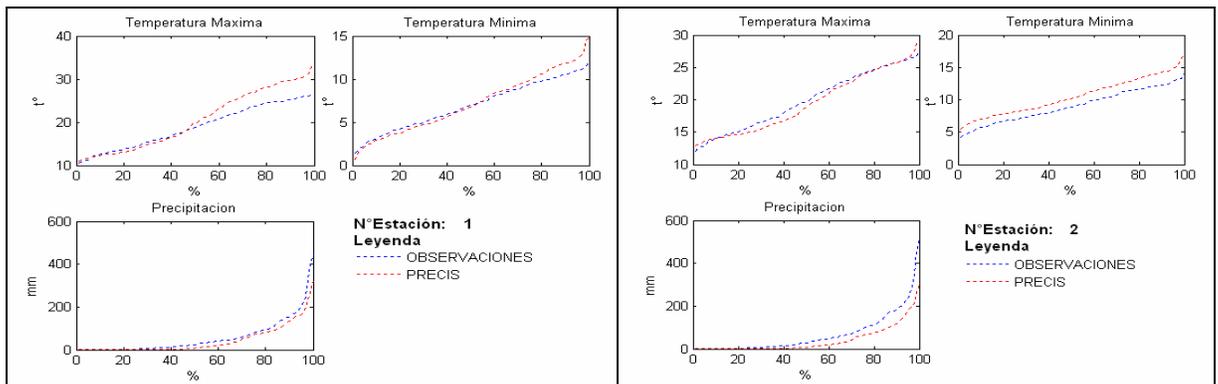


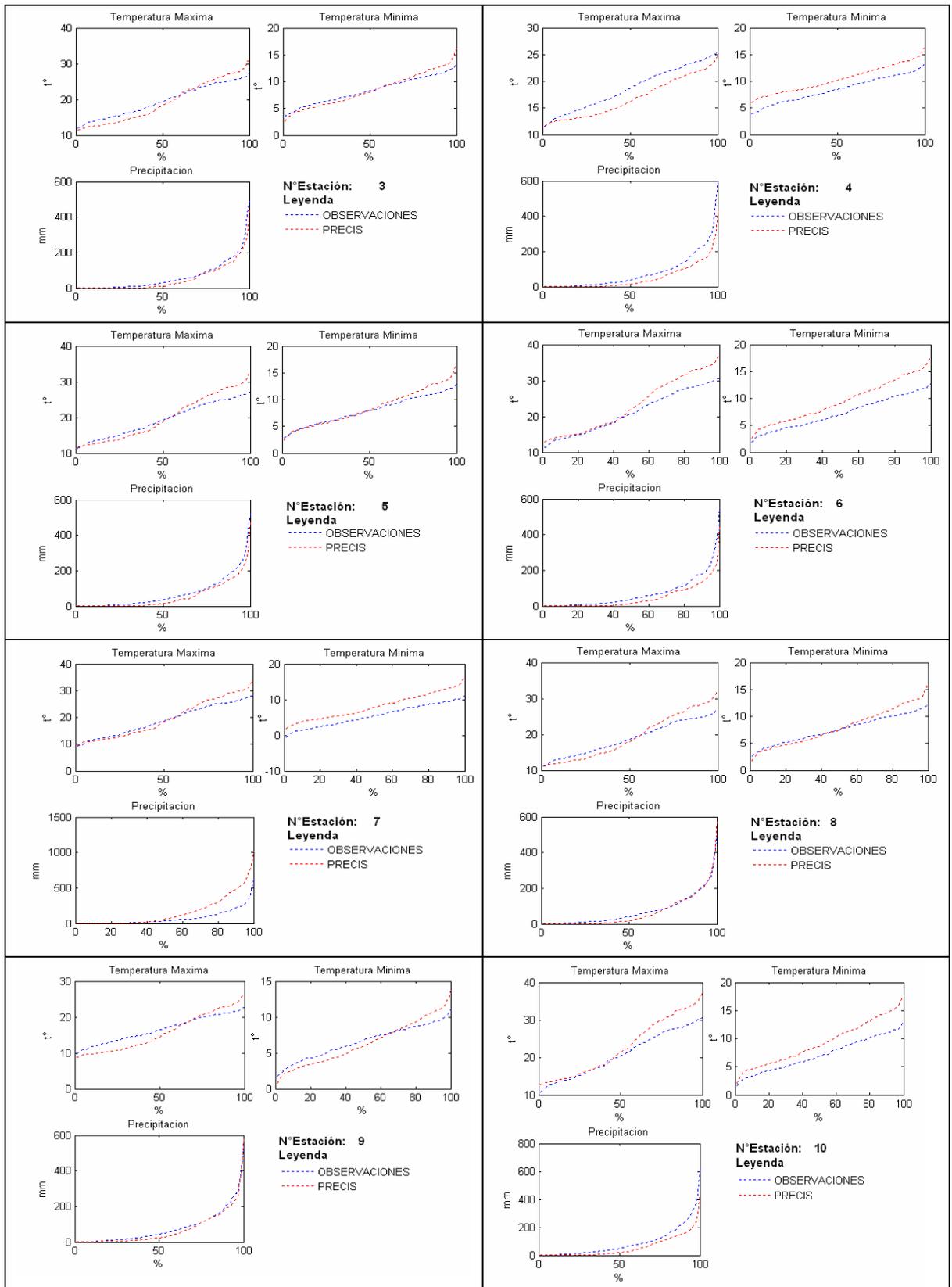


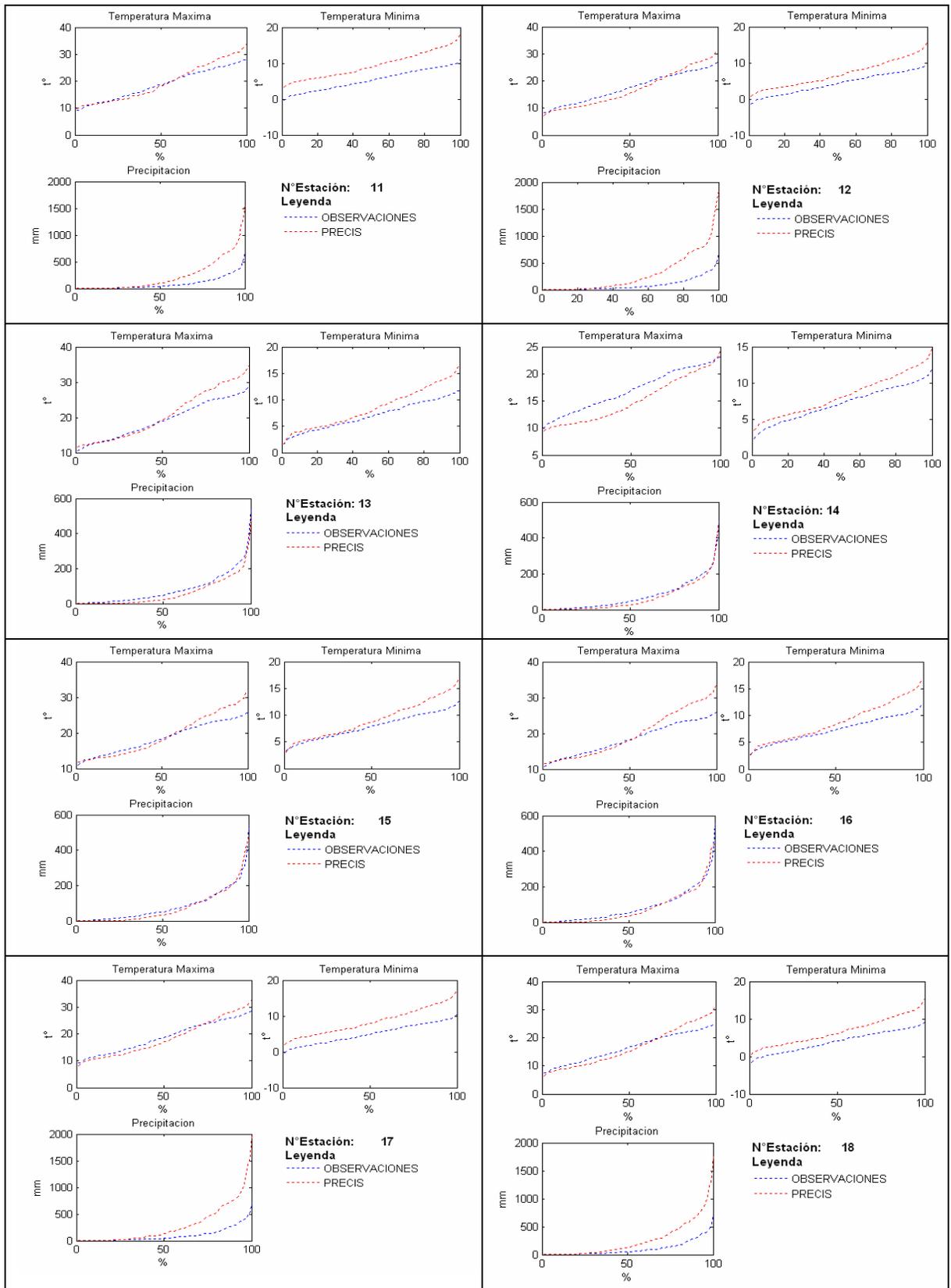


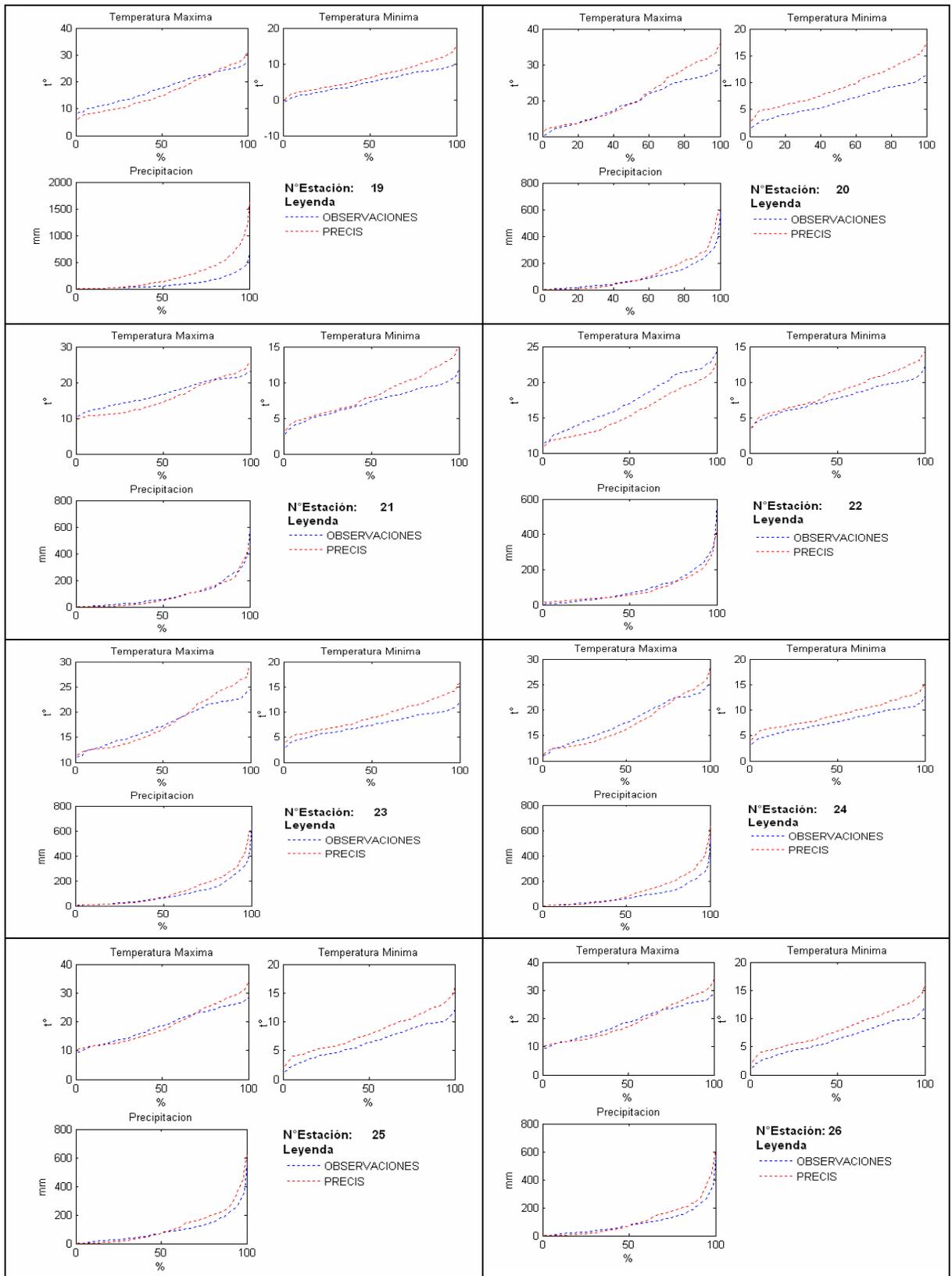


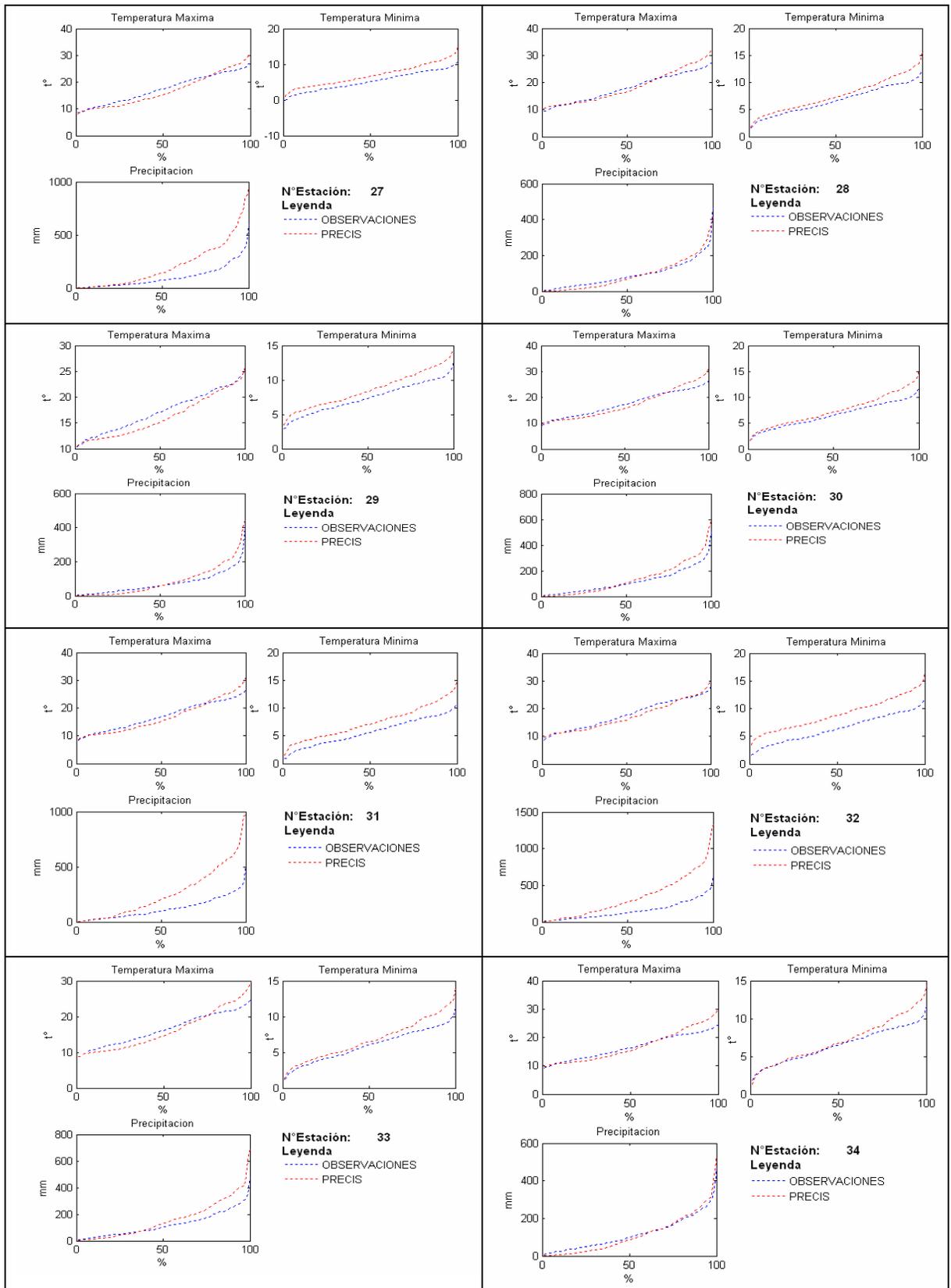
VIII.2. Percentiles

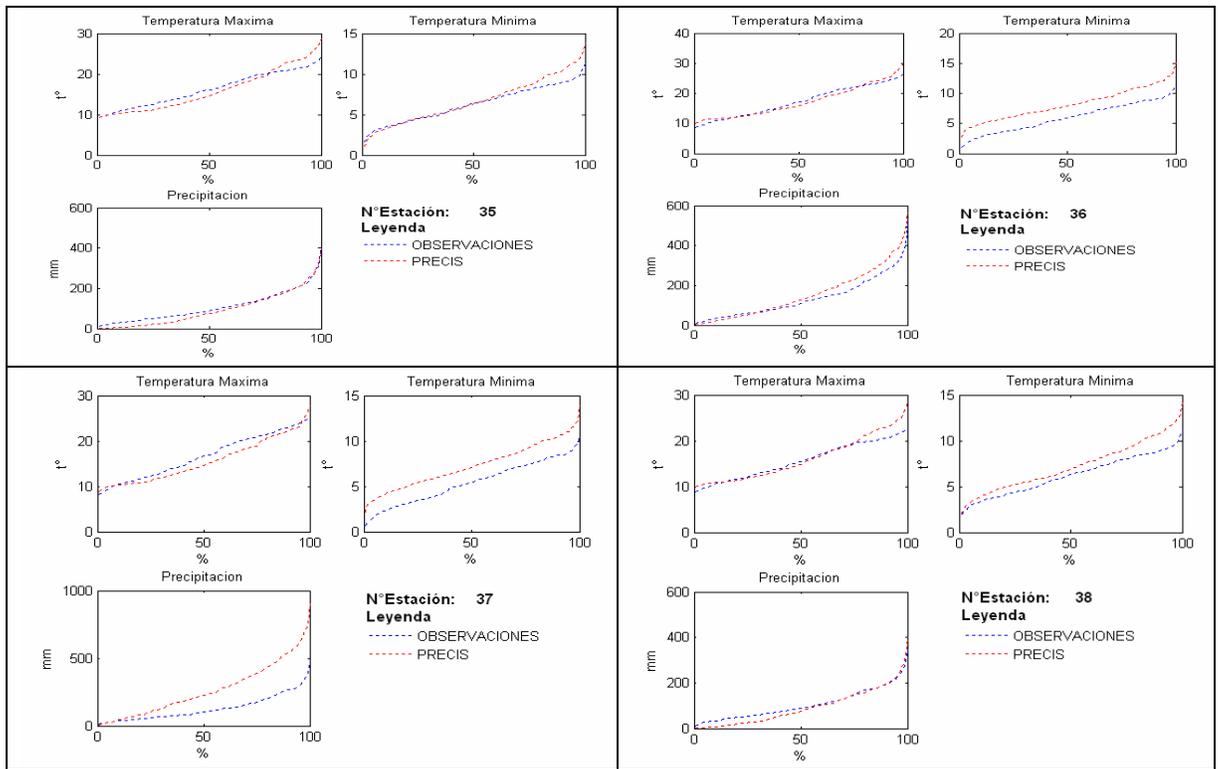




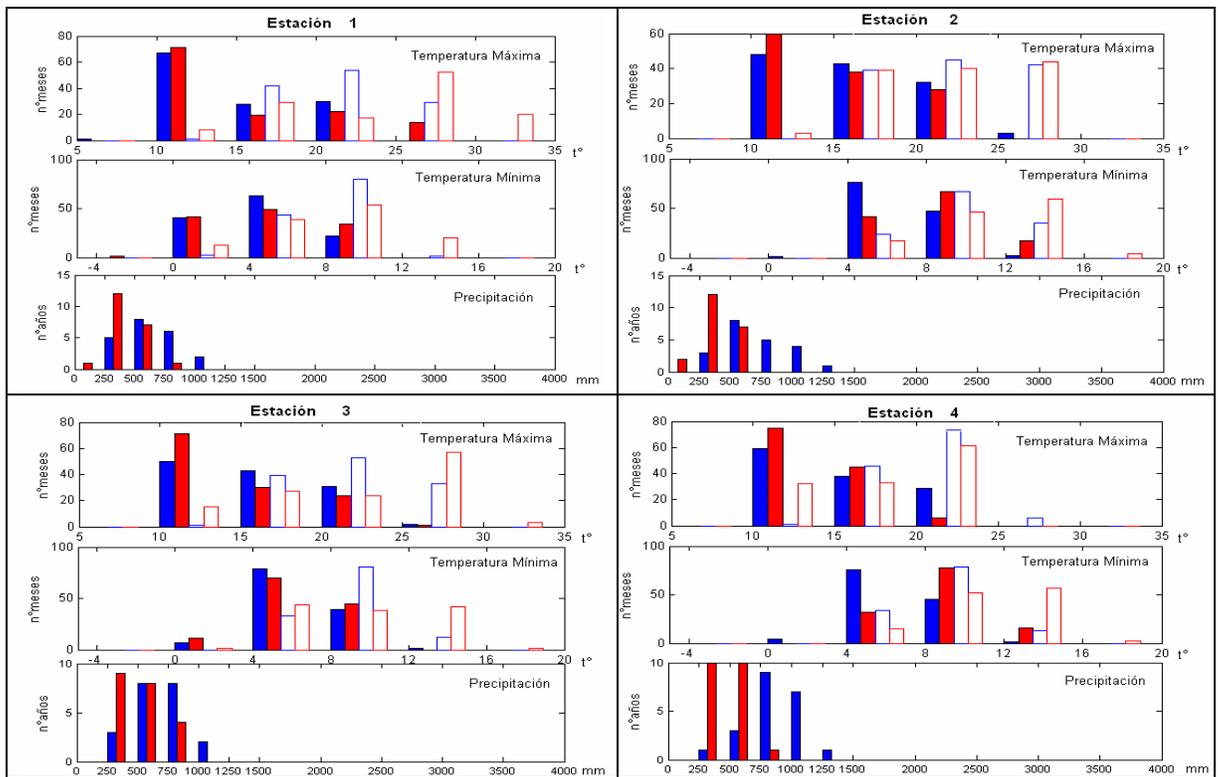


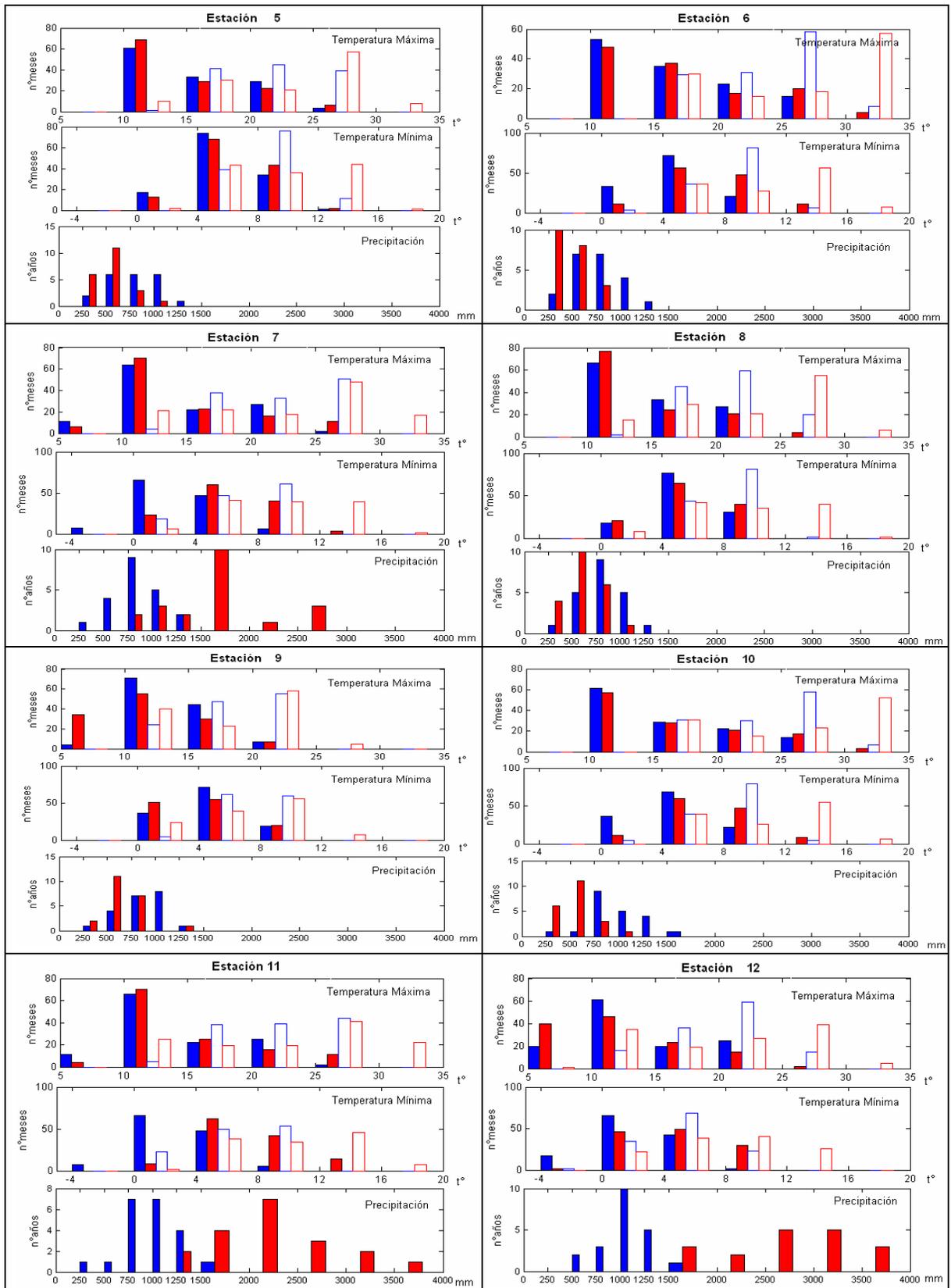


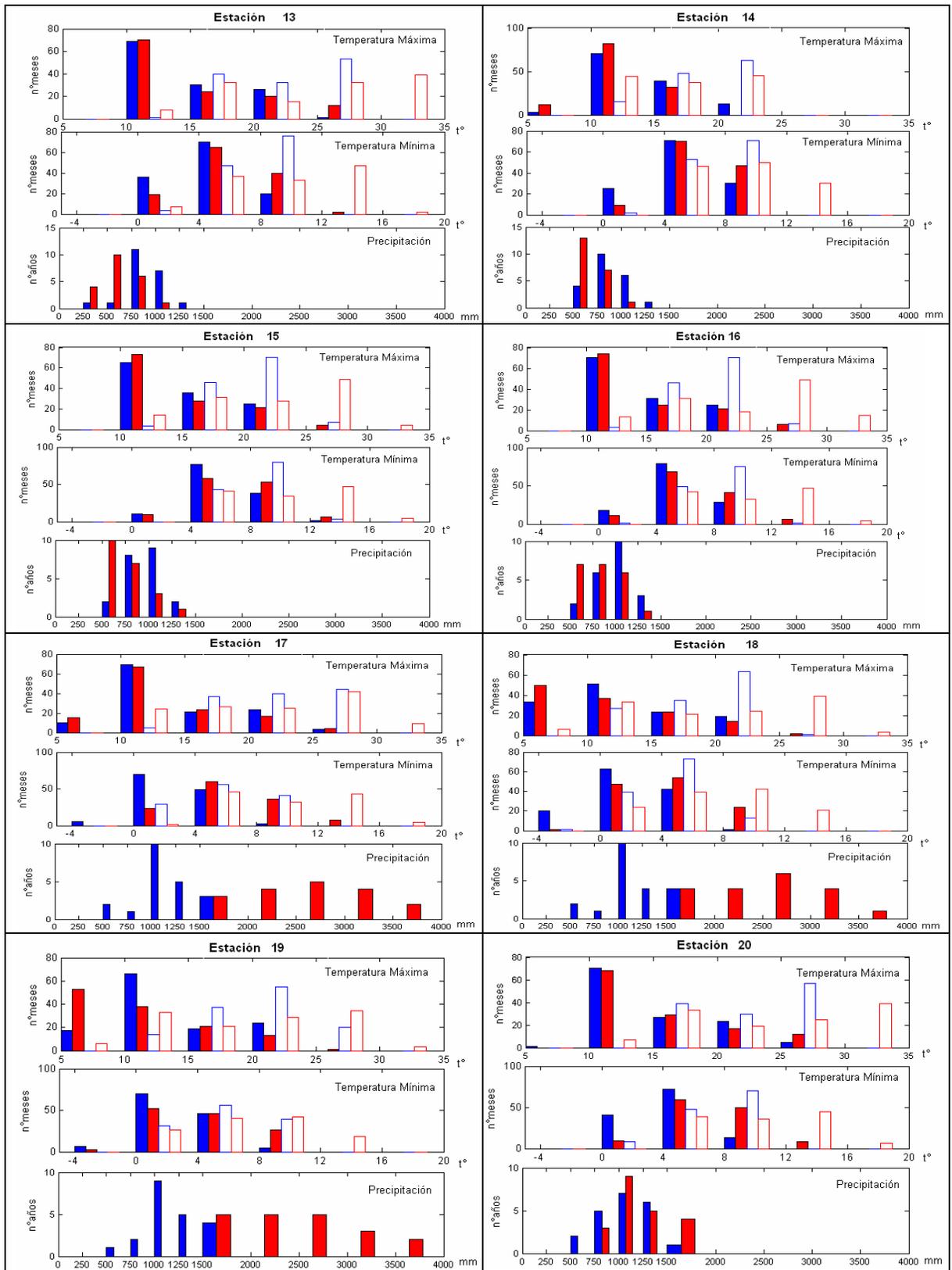


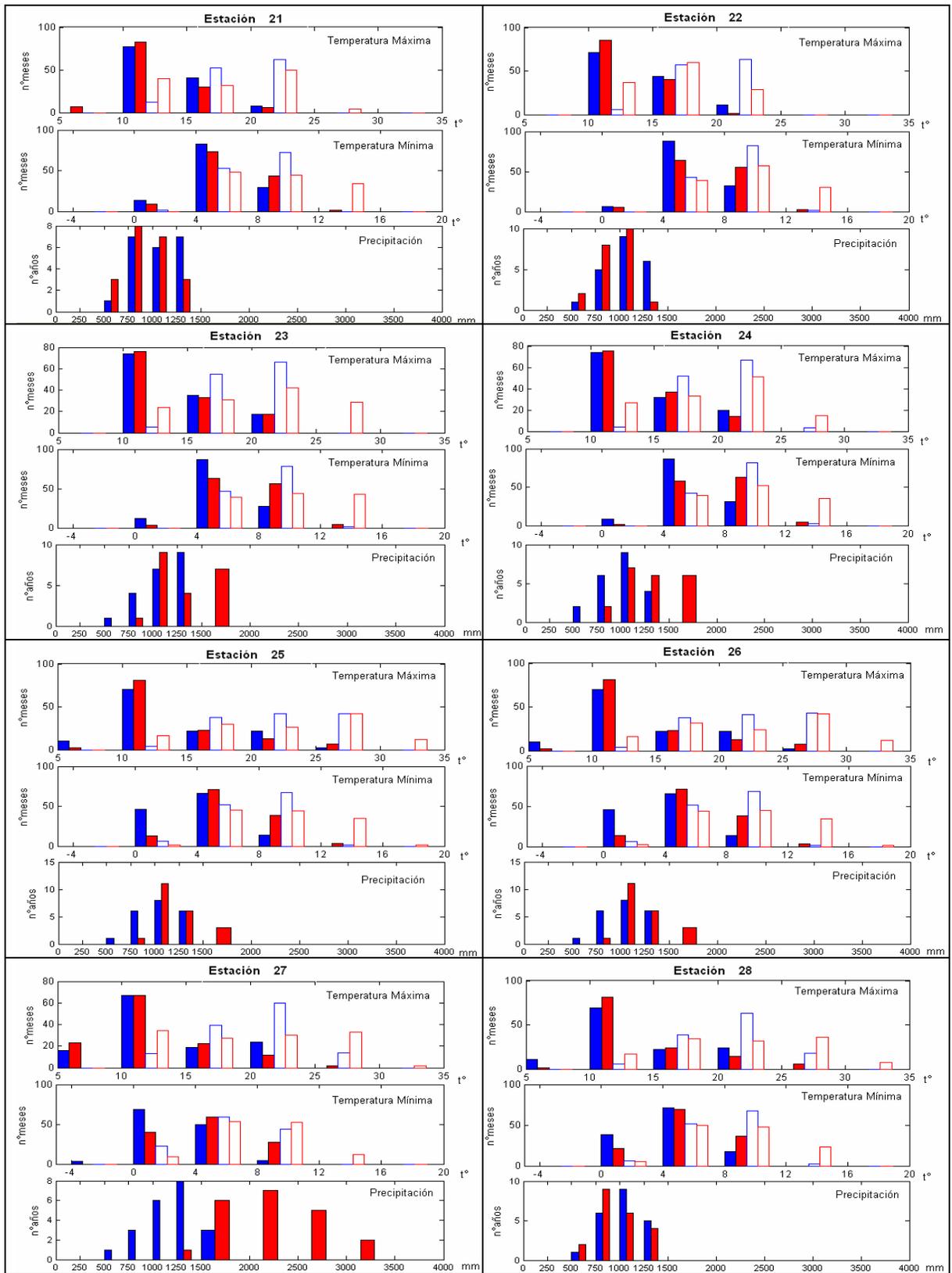


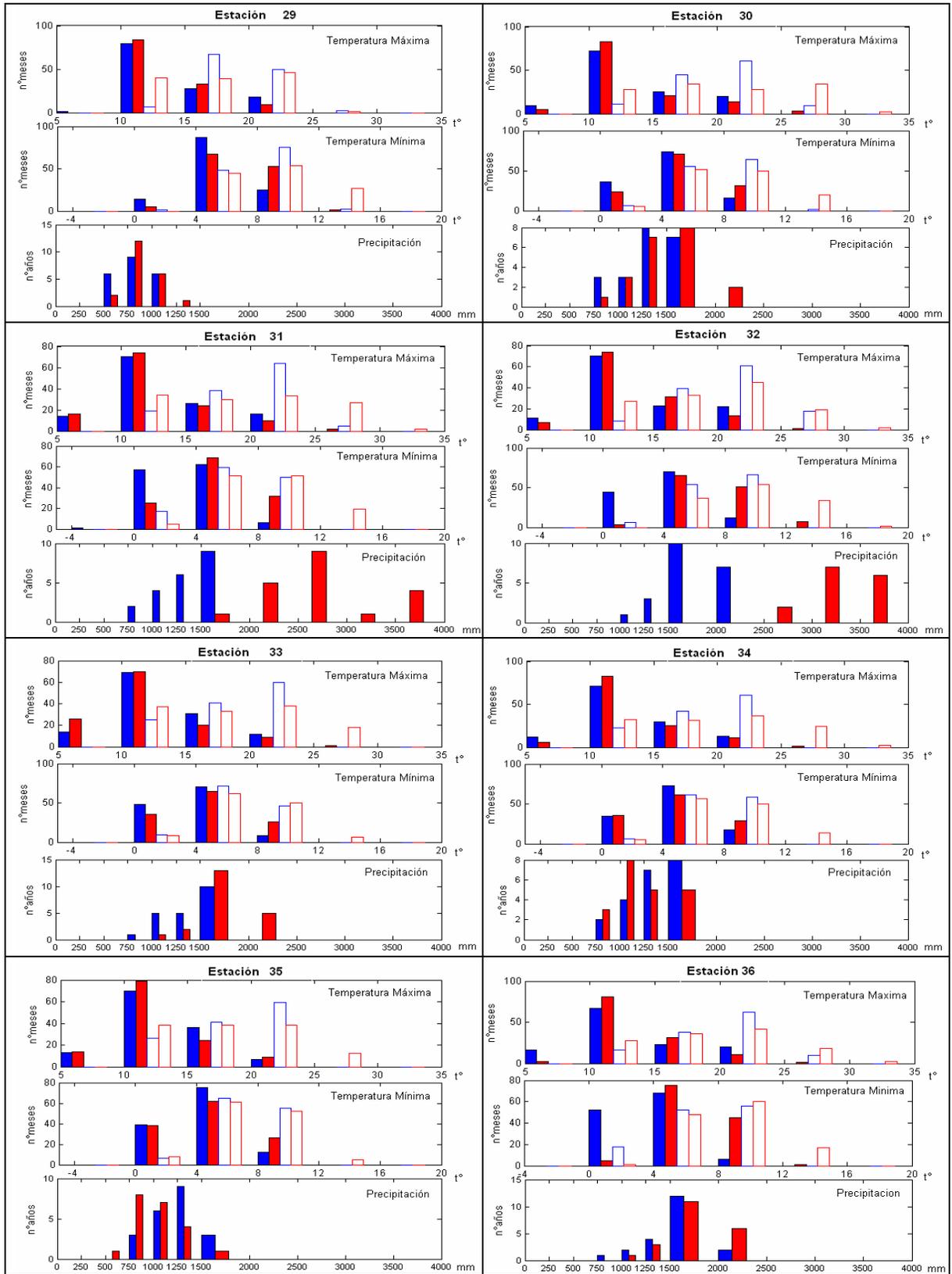
VIII.3. Histogramas

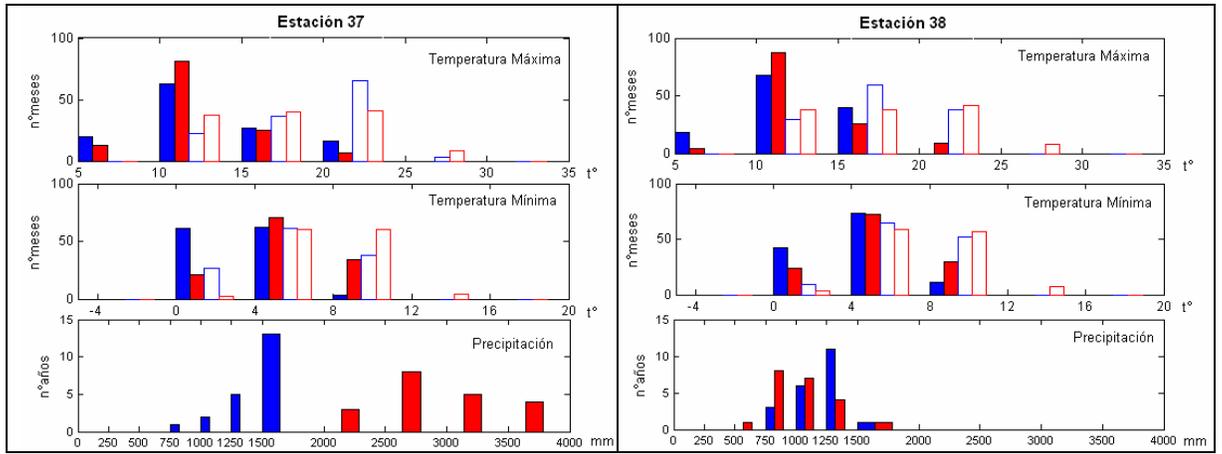




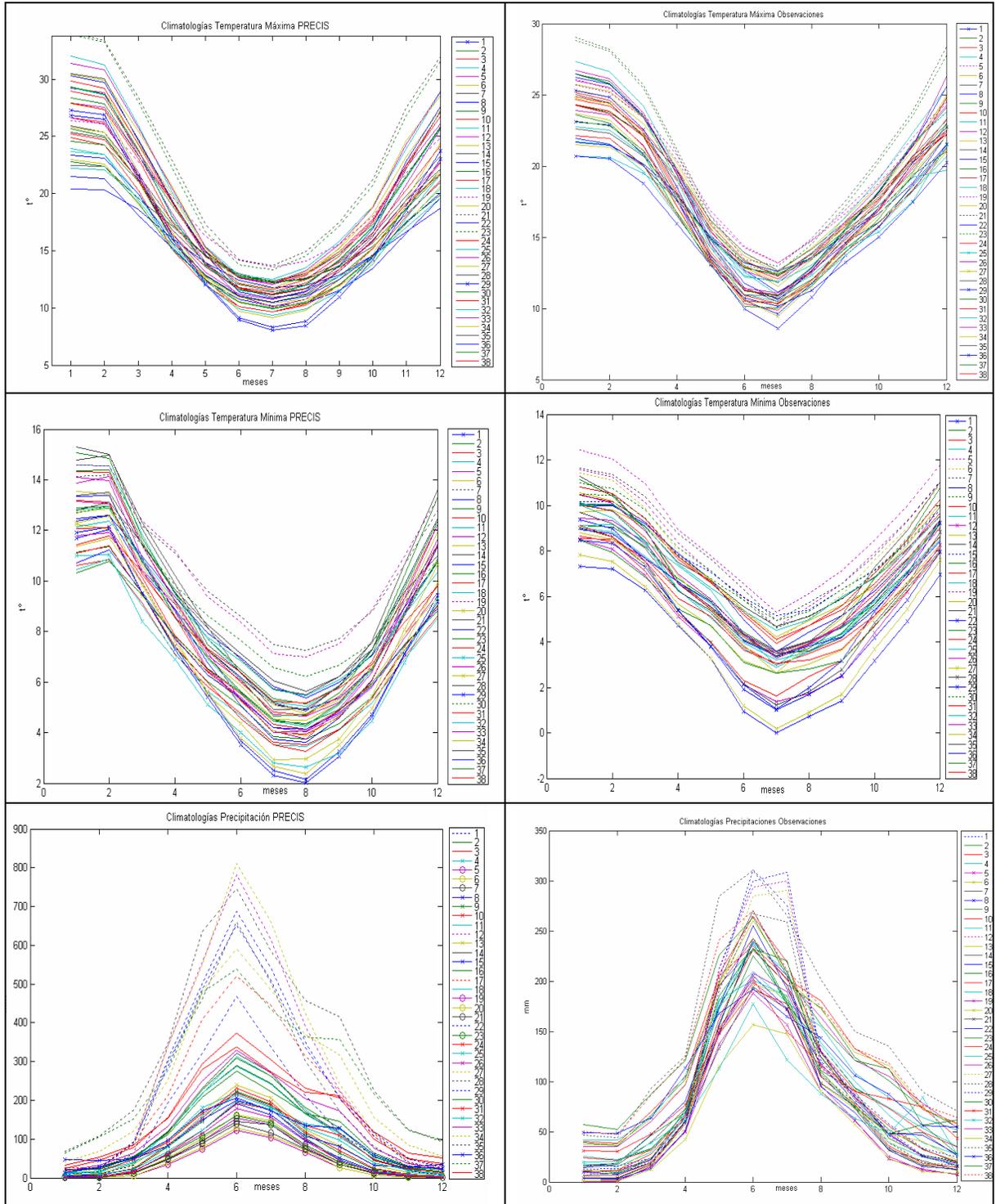








VIII.4. Climatologías de todas las estaciones según variable



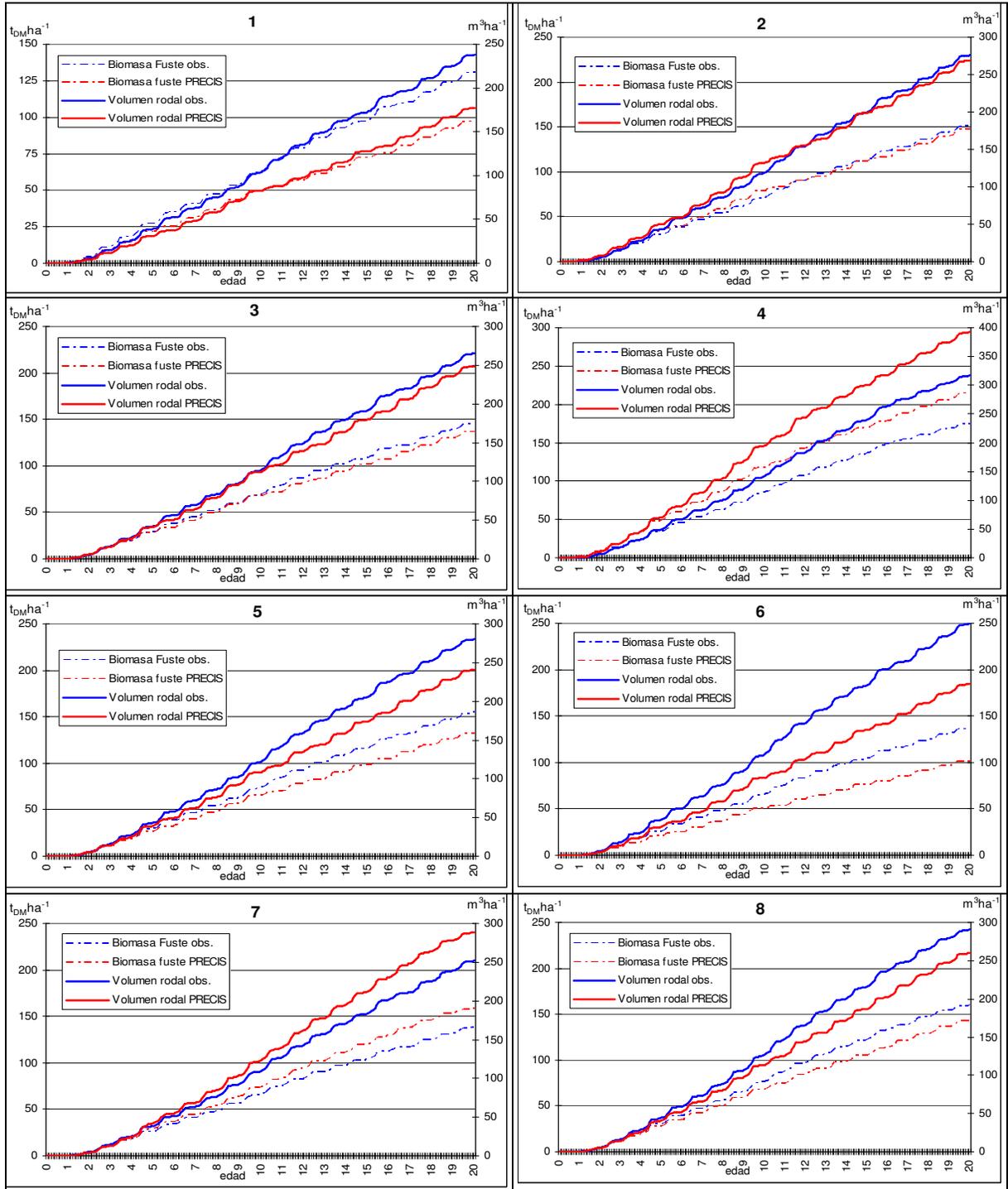
VIII.5. Radiación observada por estación

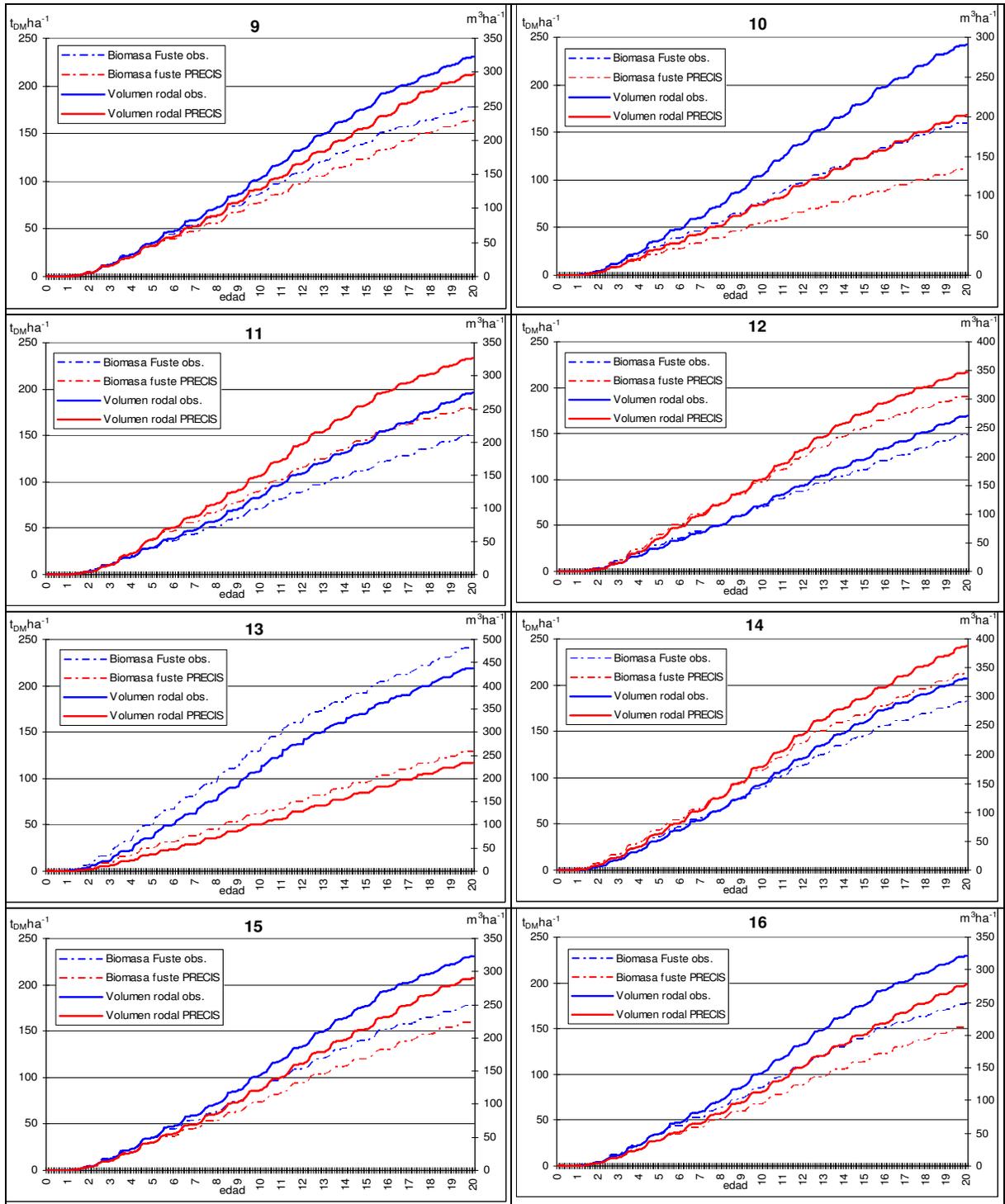
Est	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Unidad	Fuente	Ubicación
1	584	555	477	371	264	187	158	187	265	371	478	555	Ly/día	Atlas Agroclimático de Chile (Santibáñez, 1993)	Distrito 76,1
2	573	544	466	359	253	175	146	175	253	360	466	544	Ly/día		Distrito 76,3
3	568	540	462	356	250	172	144	172	250	356	462	540	Ly/día		Distrito 76,1
4	568	540	462	356	250	172	144	172	250	356	462	540	Ly/día		Distrito 76,1
5	568	540	462	356	250	172	144	172	250	356	462	540	Ly/día		Distrito 76,1
6	597	568	490	382	275	197	168	197	275	383	490	568	Ly/día		Distrito 76,5
7	609	579	498	387	276	195	165	195	276	387	498	579	Ly/día		Distrito 76,4
8	568	540	462	356	250	172	144	172	250	356	462	540	Ly/día		Distrito 76,1
9	559	531	454	350	245	169	141	169	246	350	455	531	Ly/día		Distrito 7,1
10	616	586	505	395	284	204	174	204	285	395	506	586	Ly/día		Distrito 76,6
11	609	579	498	387	276	195	165	195	276	387	498	579	Ly/día		Distrito 76,4
12	609	579	497	385	274	192	162	192	274	386	497	579	Ly/día		Distrito 97,1
13	590	561	482	375	267	189	1601	189	268	375	483	561	Ly/día		Distrito 87,1
14	571	542	462	353	244	164	135	164	244	353	462	542	Ly/día		Distrito 8,1
15	569	540	459	349	240	159	130	159	240	350	459	540	Ly/día		Distrito 8,2
16	576	546	465	355	244	164	134	164	245	355	466	546	Ly/día		Distrito 8,6
17	554	525	444	334	225	144	115	144	225	335	444	525	Ly/día		Distrito 97,2
18	554	525	444	334	225	144	115	144	225	335	444	525	Ly/día		Distrito 97,2
19	543	514	434	325	217	137	108	137	217	326	434	514	Ly/día		Distrito 89,3
20	583	553	470	357	245	162	132	162	245	358	470	553	Ly/día		Distrito 97,1
21	519	491	416	312	209	134	106	134	209	313	416	491	Ly/día		Distrito 8,4
22	544	515	435	327	218	139	110	139	219	327	436	515	Ly/día		Distrito 8,3
23	544	515	435	327	218	139	110	139	219	327	436	515	Ly/día		Distrito 8,3
24	543	514	434	325	217	137	108	137	217	326	434	514	Ly/día		Distrito 89,3
25	554	525	444	334	225	144	115	144	225	335	444	525	Ly/día		Distrito 97,2
26	554	525	444	334	225	144	115	144	225	335	444	525	Ly/día		Distrito 97,2
27	543	514	434	325	217	137	108	137	217	326	434	514	Ly/día		Distrito 89,3

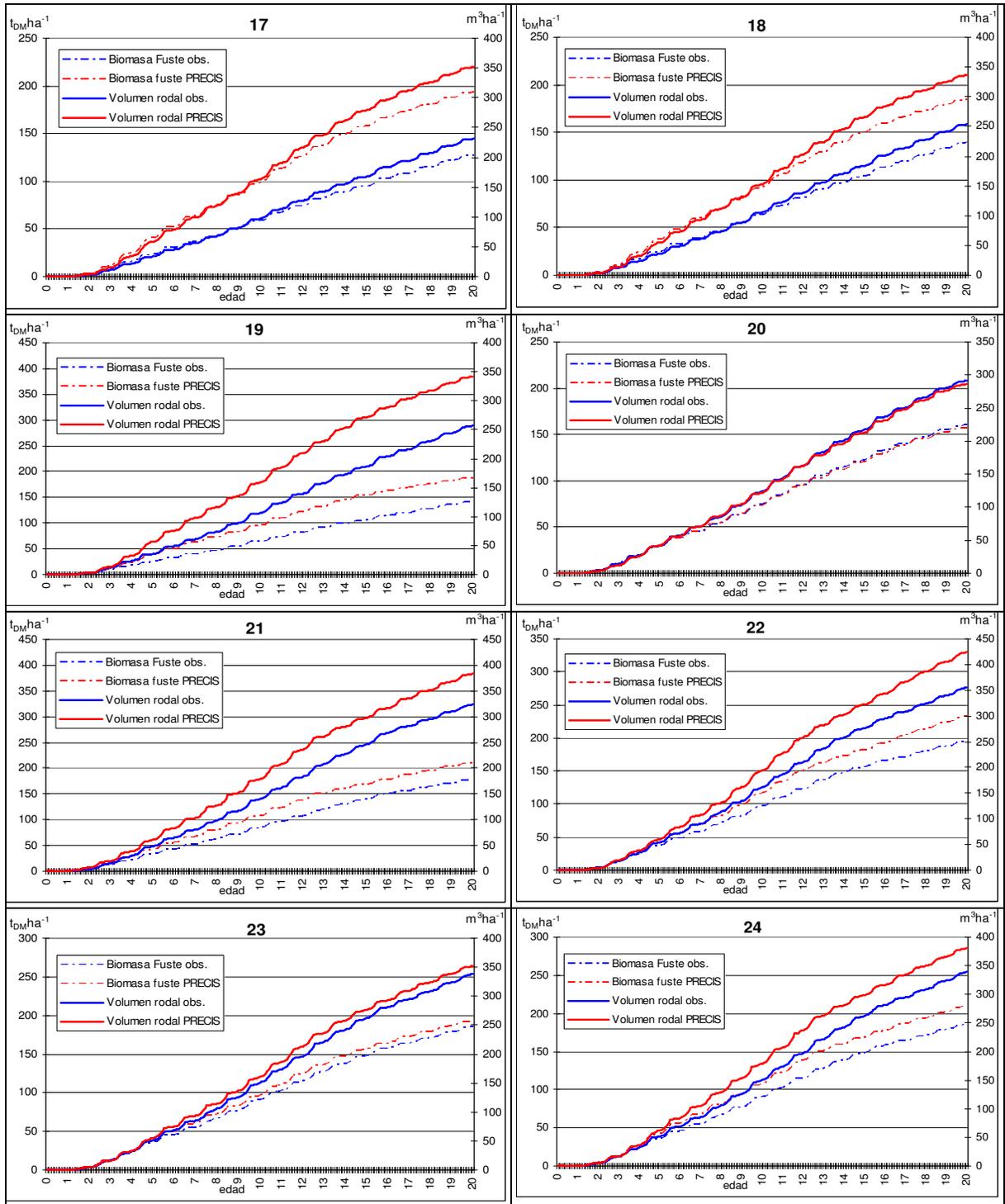
28	583	553	470	357	245	162	132	162	245	358	470	553	Ly/día		Distrito 97,1
29	518	490	414	310	206	130	102	130	206	310	414	490	Ly/día		Distrito 89,2
30	521	493	416	310	205	128	100	128	205	311	416	493	Ly/día		Distrito 9,2
31	523	494	415	307	200	121	92	121	200	308	415	494	Ly/día		Distrito 89,9
32	1034,28	916,83	470,59	548,2	397,75	327,68	354,41	471,76	646,3	834,82	987,97	1062,25	cal/cm2/día	Mapa Agroclimático de Chile (INIA, 1989)	Cod. 7,8122
33	1034,65	913,06	732,87	537,61	385,9	315,58	342,44	460,58	637,26	829,37	986,52	1063,08	cal/cm2/día		Cod. 7,244
34	1034,65	913,06	732,87	537,61	385,9	315,58	342,44	460,58	637,26	829,37	986,52	1063,08	cal/cm2/día		Cod. 7,244
35	1041,59	928,3	749,4	543,75	381,19	307,6	337,74	468,63	664,08	864,12	1010,55	1072,13	cal/cm2/día		Cod. 6,621
36	1034,25	916,44	739,8	547,11	396,52	326,42	353,17	470,6	645,37	834,25	987,82	1062,33	cal/cm2/día		Cod. 7,143
37	1033,97	911,76	730,21	533,96	381,81	311,41	338,31	456,73	634,14	827,5	986,02	1063,37	cal/cm2/día		Cod. 7,8121
38	1041,59	928,3	749,4	543,75	381,19	307,6	337,74	468,63	664,08	864,12	1010,55	1072,13	cal/cm2/día		Cod. 6,621

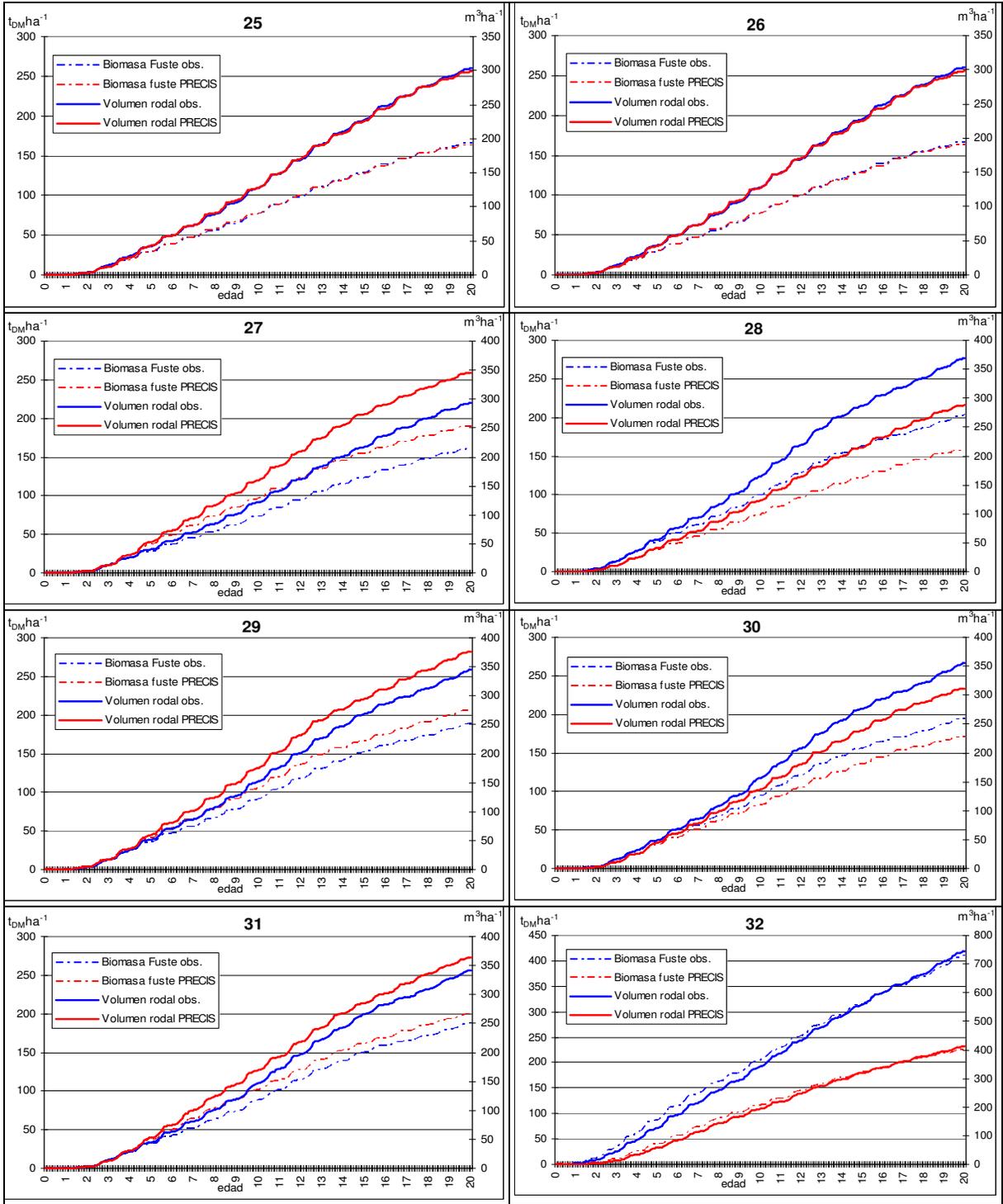
Fuente: Elaboración propia.

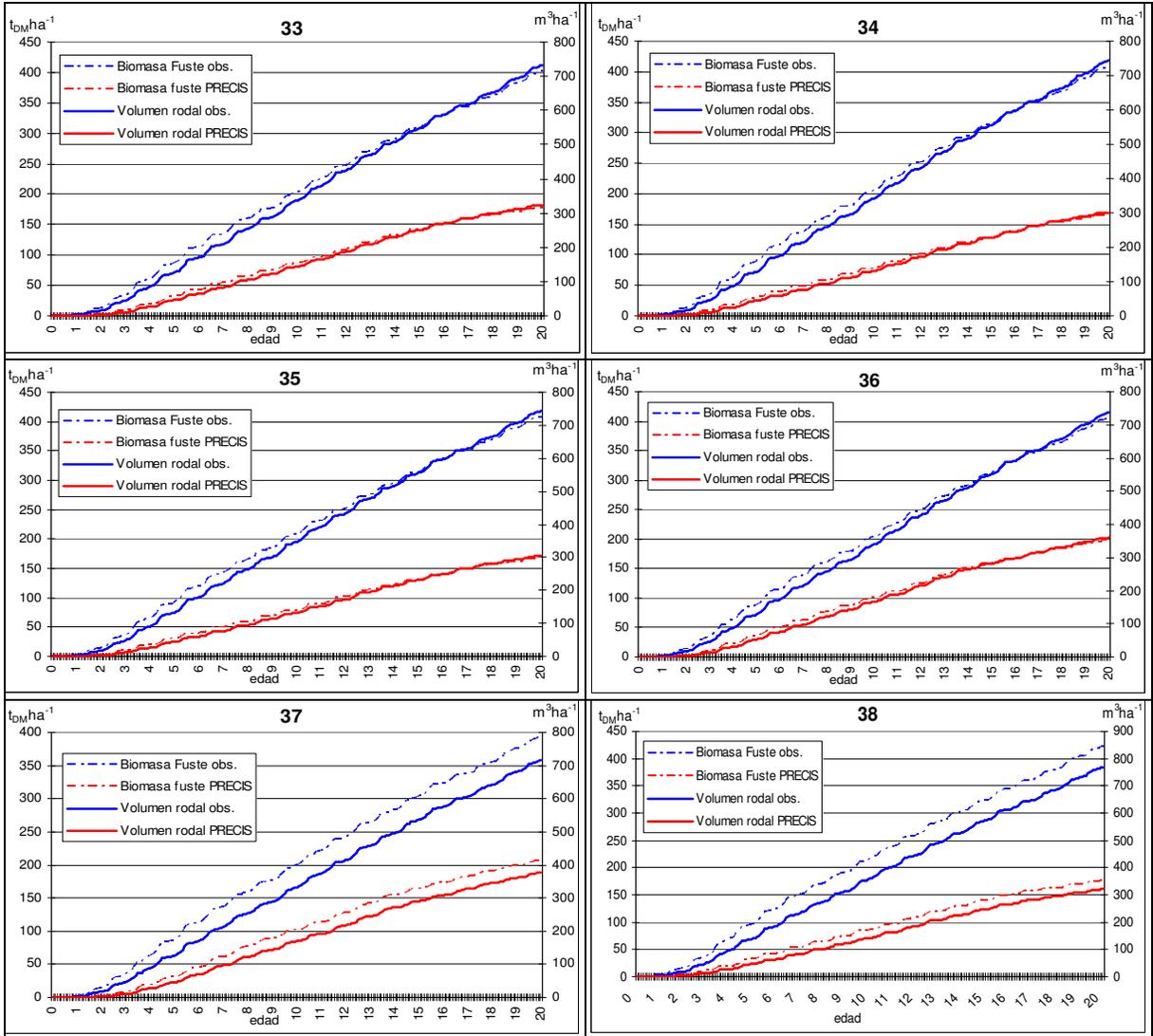
VIII.6. Evaluaciones en 3-PG de datos reales y de PRECIS para las 38 estaciones



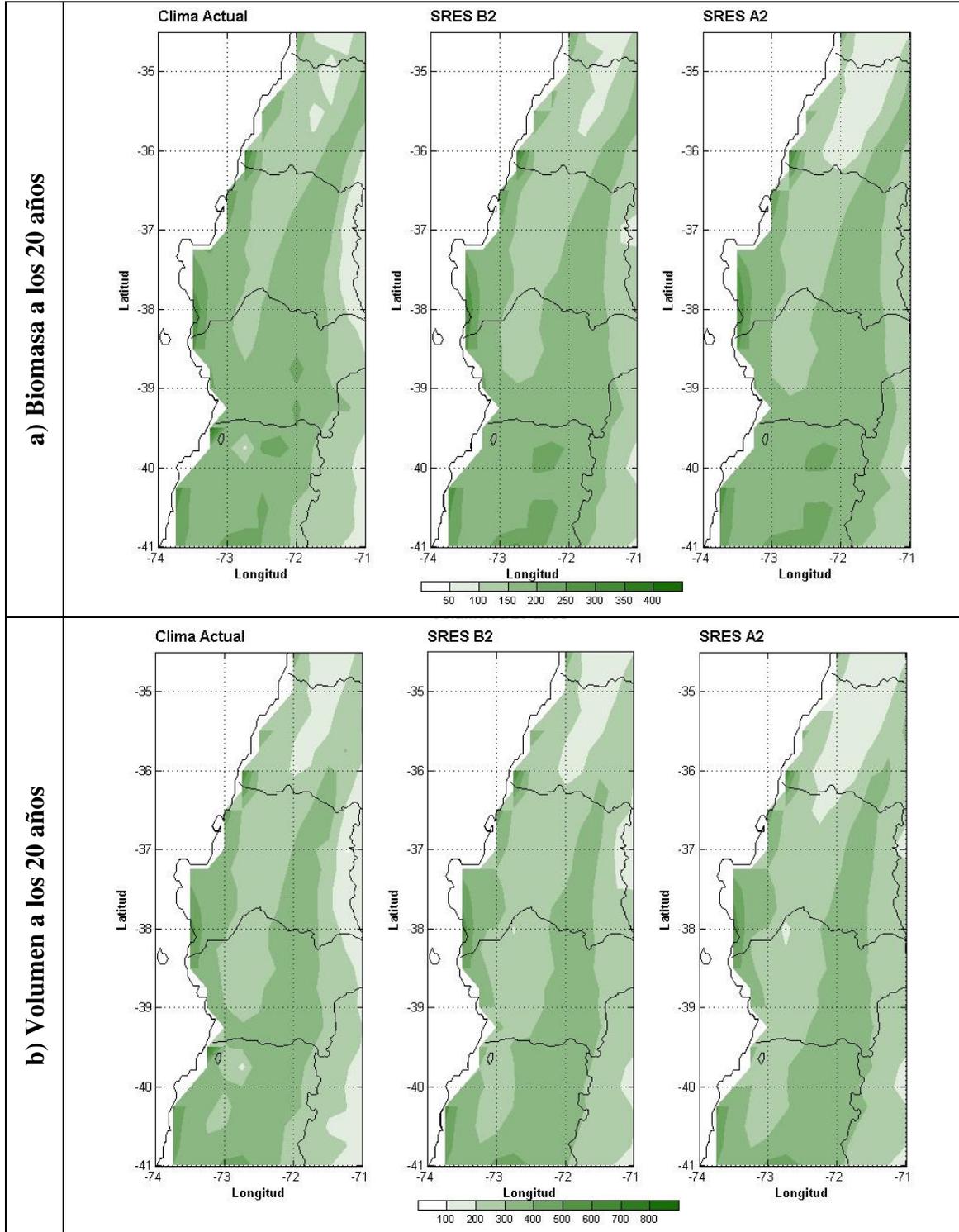








VIII.7. Mapas de volumen y biomasa a los 20 años para cada escenario climático simulado por PRECIS.



VIII.8. Distancias a la costa

		longitud												
		-74,00	-73,75	-73,50	-73,25	-73,00	-72,75	-72,50	-72,25	-72,00	-71,75	-71,50	-71,25	-71,00
Latitud	-34,50	-	-	-	-	-	-	-	-	2,58	25,59	48,43	71,37	94,25
	-34,75	-	-	-	-	-	-	-	-	7,45	30,32	52,45	75,70	98,54
	-35,00	-	-	-	-	-	-	-	-	17,16	39,86	63,11	85,59	108,40
	-35,25	-	-	-	-	-	-	-	13,75	36,35	59,14	81,80	104,69	127,08
	-35,50	-	-	-	-	-	-	2,40	24,88	47,59	69,94	92,31	114,69	137,87
	-35,75	-	-	-	-	-	-	6,15	28,73	51,25	73,75	96,70	119,51	141,60
	-36,00	-	-	-	-	-	2,59	25,09	47,61	70,26	92,71	115,45	137,82	161,01
	-36,25	-	-	-	-	-	5,54	28,05	50,49	73,00	95,30	117,91	140,27	162,80
	-36,50	-	-	-	-	-	14,10	36,47	58,72	81,58	103,80	126,44	148,79	171,04
	-36,75	-	-	-	-	13,08	35,38	57,72	79,72	102,04	124,31	146,67	169,13	191,01
	-37,00	-	-	-	-	16,85	39,08	61,23	83,35	106,62	127,89	149,81	171,64	194,47
	-37,25	-	-	14,24	35,86	56,37	79,93	102,94	124,97	146,91	168,93	191,55	213,34	236,05
	-37,50	-	-	7,91	30,09	52,21	74,48	96,52	118,65	140,93	162,75	185,11	207,31	229,27
	-37,75	-	-	11,70	33,89	55,68	78,38	100,24	121,83	145,68	166,61	188,97	211,22	234,07
	-38,00	-	-	-	20,28	42,20	64,35	86,15	108,18	129,84	152,33	174,72	196,18	219,06
	-38,25	-	-	0,21	22,05	43,79	65,38	87,49	109,23	129,76	151,12	172,53	193,67	217,11
	-38,50	-	-	1,15	22,95	44,80	66,65	88,48	110,47	132,43	153,95	175,88	197,69	219,60
	-38,75	-	-	-	16,33	38,00	59,95	81,72	103,61	125,59	147,10	170,36	191,38	213,17
	-39,00	-	-	-	5,78	27,44	49,21	70,80	92,81	114,41	135,52	157,33	180,00	201,69
	-39,25	-	-	-	-	19,58	41,24	62,85	84,52	106,24	127,82	149,94	171,75	192,80
-39,50	-	-	-	-	21,23	42,77	64,11	85,52	108,08	129,34	150,99	172,38	194,04	
-39,75	-	-	-	12,15	33,80	55,27	76,77	98,32	120,30	141,18	162,59	184,82	206,31	
-40,00	-	-	15,87	36,92	57,83	79,01	100,54	121,82	142,94	164,17	185,53	206,74	228,36	
-40,25	-	-	18,62	39,85	61,06	82,31	103,57	124,91	146,25	167,20	188,41	210,21	231,07	
-40,50	-	-	20,23	41,60	64,02	85,26	106,45	127,74	149,16	169,92	190,84	213,60	233,69	
-40,75	-	7,76	28,94	49,84	71,02	92,04	112,52	133,69	154,81	175,84	196,49	217,84	238,36	
-41,00	-	15,36	36,56	57,50	78,87	99,96	120,94	142,10	162,86	184,04	205,05	225,71	245,97	

VIII.9. Programas realizados en MatLab

VIII.9.a. Arreglo datos observaciones

```

Climatología.m
clear all
close all

ruta = '\ASUKITA\memoria\resultados\temp\';
files=dir('\ASUKITA\memoria\resultados\temp\');

kk=1;

for l=1:length(files)

    by=files(l).bytes;

    if by ~= 0

        nombre=strcat(ruta,files(l).name);

matriz=load(nombre);
x=matriz; %Se agregaron datos con valor 9999 para que cada matriz tuviera 1*360 y
x(x>1000)=NaN; %así poder unirse con la matriz de precis, además se ordeno cronológicamente.

k=1;
    for i=1:38
        Dic(k,.,kk)=nansum(x(12:12:360,i))/22; %Para climatologías, se necesita la media ...
        Nov(k,.,kk)=nansum(x(11:12:360,i))/22; %de cierto periodo de tiempo. acá tendré 12
datos.
        Oct(k,.,kk)=nansum(x(10:12:360,i))/21;
        Sep(k,.,kk)=nansum(x(9:12:360,i))/21;
        Ago(k,.,kk)=nansum(x(8:12:360,i))/21;
        Jul(k,.,kk)=nansum(x(7:12:360,i))/21;
        Jun(k,.,kk)=nansum(x(6:12:360,i))/21;
        May(k,.,kk)=nansum(x(5:12:360,i))/21;
        Abr(k,.,kk)=nansum(x(4:12:360,i))/21;
        Mar(k,.,kk)=nansum(x(3:12:360,i))/21;
        Feb(k,.,kk)=nansum(x(2:12:360,i))/21;
        Ene(k,.,kk)=nansum(x(1:12:360,i))/21;

        a(k,.,kk)=[Ene(i,.,kk);Feb(i,.,kk);Mar(i,.,kk);Abr(i,.,kk);May(i,.,kk);Jun(i,.,kk)...
                ;Jul(i,.,kk);Ago(i,.,kk);Sep(i,.,kk);Oct(i,.,kk);Nov(i,.,kk);Dic(i,.,kk)];

        estac(k,.,kk)=x(:,i); %Para percentiles e histogramas, necesito...
                %todos los datos mensuales para cada estación

```

```

        k=k+1;

    end
    kk=kk+1;
end
end

% para histograma de precipitaciones
nombre=strcat(ruta,files(3).name);

matriz=load(nombre);
z=matriz; %Se agregaron datos con valor 9999 para que cada matriz tuviera 1*360 y
z(z>1000)=NaN; %asi poder unirse con la matriz de precis.

for m=1:38
    for q=1:30 %sacar histograma con pp anual.
        sumesta(q,m)=nansum(z(12*(q-1)+1:(12*q)),m));
        prom_ppo(m,:)=nanmean(sumesta(:,m));
    end
end

%a(i,:,1)= precipitaciones
%a(i,:,2)=temperatura maxima
%a(i,:,3)=temperatura minima

```

VIII.9.b. Arreglo datos PRECIS, climatologías y percentiles.

```

Climatología_precis.m
%clear all
%close all
%run first climatologia.m

file = ('\ASUKITA\memoria\precis\tas.min.bs.mon.1960-1990.reg.nc');
files = ('\ASUKITA\memoria\precis\tas.max.bs.mon.1960-1990.reg.nc');
fail = ('\ASUKITA\memoria\precis\pr.bs.mon.1960-1990.reg.nc');

p.tas = nc_varget(file,'tmp2m.min'); %Variables Temperatura minima
p.tmx = nc_varget(files,'tmp2m.max');%Variables Temperatura maxima
p.pp = nc_varget(fail,'rainresv'); %Variable Precipitacion
p.lon = nc_varget(file,'lon'); % Longitud
p.lat = nc_varget(file,'lat'); % Latitud
p.topo= nc_varget(file,'topo'); % Topografía

est.lat = [-36.783,-39.593,-39.647,-40.191,-35.176,-35.389,-35.402,-36.264,-36.546,
-36.735,-37.055,-36.603,-37.134,-37.420,-37.462,-37.910,-38.065,-37.910,-34.801,-34.809,

```

```

-35.390,-35.401,-35.960,-35.715,-35.907,-36.249,-36.374,-36.110,-37.132,-37.987,-38.748,
-38.641,-39.311,-39.341,-39.807,-40.571,-40.661,-40.245]; % Latitudes estaciones (°S)

est.lon = [-71.675,-72.911,-72.677,-73.259,-72.083,-72.092,-72.426,-72.711,-72.756,-72.683,
-72.137,-71.562,-73.114,-73.328,-73.529,-72.348,-72.091,-72.351,-71.979,-71.503,-71.494
-71.149,-71.759,-72.30,-72.556,-72.191,-71.479,-71.402,-71.709,-73.336,-72.529,-73.300
-72.602,-72.188,-72.382,-73.415,-72.593,-72.544]; % Longitudes estaciones (°W)

est.z = [893,195,330,243,354,326,234,520,188,221,194,655,446,150,152,269,559,
278,131,551,154,762,141,394,711,279,944,565,867,103,146,140,
185,324,110,142,195,61] % Altura estaciones (m)

est.name = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,
22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38];

%interpolación
for i=1 : size(p.tas,1) %contar los 360 meses i=1:360
    int.tas(i,:) = interp2(p.lon,p.lat,(squeeze(p.tas(i,:))),est.lon,est.lat); % temp. máxima
    int.topo = interp2(p.lon,p.lat,p.topo,est.lon,est.lat); % topografía
    int.tans(i,:) = interp2(p.lon,p.lat,(squeeze(p.tmx(i,:))),est.lon,est.lat); % temp. mínima
    int.pp(i,:) = interp2(p.lon,p.lat,(squeeze(p.pp(i,:))),est.lon,est.lat); % precipitación
end

for n=1: size(int.tas,1) %Correcciones
    for m=1:38
        int.tmn(n,m)=int.tas(n,m)+((int.topo(m)-est.z(m)))*(6.5/1000)-273.15;
        int.tmx(n,m)=int.tans(n,m)+((int.topo(m)-est.z(m)))*(6.5/1000)-273.15;
        int.ppr(n,m)=int.pp(n,m)*(60*60*24*30);
    end
end

int.lat = est.lat;
int.lon = est.lon;
int.name = est.name;

for k=1:38 %suma de las precipitaciones de cada año para cada estación
    for q=1:30;
        int.pph(q,k)=sum(int.ppr(12*(q-1)+1:(12*q),k));
        prom_pp(k,:)=mean(int.pph(:,k));
    end
end

%for j=1:38
%para temperatura mínima de climatología
ene(j,:)=(sum(int.tmn(2:12:360,j))/30); %parten distinto ya que el primer
feb(j,:)=(sum(int.tmn(3:12:360,j))/30); %valor de precis es dic.
mar(j,:)=(sum(int.tmn(4:12:360,j))/30);
abr(j,:)=(sum(int.tmn(5:12:360,j))/30);
may(j,:)=(sum(int.tmn(6:12:360,j))/30);

```

```

jun(j,:)=(sum(int.tmn(7:12:360,j))/30);
jul(j,:)=(sum(int.tmn(8:12:360,j))/30);
ago(j,:)=(sum(int.tmn(9:12:360,j))/30);
sep(j,:)=(sum(int.tmn(10:12:360,j))/30);
oct(j,:)=(sum(int.tmn(11:12:360,j))/30);
nov(j,:)=(sum(int.tmn(12:12:360,j))/30);
dic(j,:)=(sum(int.tmn(1:12:360,j))/30);

b(j,:)=[ene(j),feb(j),mar(j),abr(j),may(j),jun(j),jul(j),ago(j),sep(j),oct(j),nov(j),dic(j)];

```

%para temperatura máxima de climatología

```

ENE(j,:)=(sum(int.tmx(2:12:360,j))/30);
FEB(j,:)=(sum(int.tmx(3:12:360,j))/30);
MAR(j,:)=(sum(int.tmx(4:12:360,j))/30);
ABR(j,:)=(sum(int.tmx(5:12:360,j))/30);
MAY(j,:)=(sum(int.tmx(6:12:360,j))/30);
JUN(j,:)=(sum(int.tmx(7:12:360,j))/30);
JUL(j,:)=(sum(int.tmx(8:12:360,j))/30);
AGO(j,:)=(sum(int.tmx(9:12:360,j))/30);
SEP(j,:)=(sum(int.tmx(10:12:360,j))/30);
OCT(j,:)=(sum(int.tmx(11:12:360,j))/30);
NOV(j,:)=(sum(int.tmx(12:12:360,j))/30);
DIC(j,:)=(sum(int.tmx(1:12:360,j))/30);

```

```

c(j,:)=[ENE(j),FEB(j),MAR(j),ABR(j),MAY(j),JUN(j),JUL(j),
        AGO(j),SEP(j),OCT(j),NOV(j),DIC(j)];

```

%para precipitación de climatología

```

eNe(j,:)=((sum(int.pp(2:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
fEb(j,:)=((sum(int.pp(3:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
mAr(j,:)=((sum(int.pp(4:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
aBr(j,:)=((sum(int.pp(5:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
mAy(j,:)=((sum(int.pp(6:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
jUn(j,:)=((sum(int.pp(7:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
jUl(j,:)=((sum(int.pp(8:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
aGo(j,:)=((sum(int.pp(9:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
sEp(j,:)=((sum(int.pp(10:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
oCt(j,:)=((sum(int.pp(11:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
nOv(j,:)=((sum(int.pp(12:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);
dIc(j,:)=((sum(int.pp(1:12:360,j))*(60*60*24*30))/30);

```

```

d(j,:)=[eNe(j),fEb(j),mAr(j),aBr(j),mAy(j),jUn(j),jUl(j),
        aGo(j),sEp(j),oCt(j),nOv(j),dIc(j)];

```

figure(j) %climatologías

subplot(2,2,1)

```

plot([1:12],a(j,:,2),'b+'); xlabel('mes'), ylabel('t°'), title('Temperatura Máxima')

```

```

%Temperatura máxima observaciones
    hold on
    plot([1:12],c(j,:), 'ro:') %Temperatura máxima precis
subplot(2,2,2)
    plot([1:12],a(j,:,3), 'b+:', xlabel('mes'), ylabel('t°'), title('Temperatura Mínima')
                                                %Temperatura mínima observaciones

    hold on
    plot([1:12],b(j,:), 'ro:') %Temperatura mínima precis
subplot(2,2,3)
    plot([1:12],a(j,:,1), 'b+:', xlabel('mes'), ylabel('mm'), title('Precipitación')
                                                %Precipitaciones observaciones

    hold on
    plot([1:12],d(j,:), 'ro:') %Precipitaciones precis

figure(j+100) % percentiles

subplot(2,2,1)
    plot(prctile(estac(j,109:360,2),[1:100]), 'b:', xlabel('%'), ylabel('t°'),
         title('Temperatura Maxima')
    hold on
    plot(prctile(int.tmx(26:277,j),[1:100]), 'r:')
subplot(2,2,2)
    plot(prctile(estac(j,109:360,3),[1:100]), 'b:', xlabel('%'), ylabel('t°'),
         title('Temperatura Minima')
    hold on
    plot(prctile(int.tmn(26:277,j),[1:100]), 'r:')
subplot(2,2,3)
    plot(prctile(estac(j,109:360,1),[1:100]), 'b:', xlabel('%'), ylabel('mm'), title('Precipitacion')
    hold on
    plot(prctile(int.ppr(26:277,j),[1:100]), 'r:')

%end

```

VIII.9.c. Histogramas

```

clear kk
clear k i j l m n q
%run first climatologia_precis.m

kk=1;
for j=1:10
    tmx_o=estac(j,:,2); %temperatura máxima observaciones
    dj=(1:360);
    PVo=[109, 110, 117:122, 129:134, 141:146, 153:158, 165:170, 177:182, 189:194, 201:206,
         213:218, 225:230, 237:242, 249:254, 261:266, 273:278, 285:290, 297:302, 309:314,
         321:326, 333:338, 345:350, 357:360]; %rango primavera verano observaciones

```

```

k=1;
for i=1:length(PVo)%primavera verano
    I=find(dj==PVo(i));
    tmxo_pv(k,kk)=tmx_o(I,:);
    k=k+1;
end

OIo=[111:116, 123:128, 135:140, 147:152, 159:164, 171:176, 183:188, 195:200, 207:212,
      219:224, 231:236, 243:248, 255:260, 267:272, 279:284, 291:296, 303:308, 315:320,
      327:332, 339:344, 351:356];%otoño invierno observaciones
l=1;
for i=1:length(OIo)%otoño invierno
    A=find(dj==OIo(i));
    tmxo_oi(l,kk)=tmx_o(A,:);
    l=l+1;
end
%-----
tmn_o=estac(j,:,3)';%temperatura mínima observaciones
dj=(1:360);
PVo=[109, 110, 117:122, 129:134, 141:146, 153:158, 165:170, 177:182, 189:194, 201:206,
      213:218, 225:230, 237:242, 249:254, 261:266, 273:278, 285:290, 297:302, 309:314,
      321:326, 333:338, 345:350, 357:360]; %rango primavera verano observaciones
d=1;
for i=1:length(PVo)%primavera verano
    E=find(dj==PVo(i));
    tmno_pv(d,kk)=tmn_o(E,:);
    d=d+1;
end

OIo=[111:116, 123:128, 135:140, 147:152, 159:164, 171:176, 183:188, 195:200, 207:212,
      219:224, 231:236, 243:248, 255:260, 267:272, 279:284, 291:296, 303:308, 315:320,
      327:332, 339:344, 351:356];%otoño invierno observaciones
n=1;
for i=1:length(OIo)%otoño invierno
    F=find(dj==OIo(i));
    tmno_oi(n,kk)=tmn_o(F,:);
    n=n+1;
end
%-----
tmx_p=int.tmx(:,j);%temperatura máxima precis
dj=(1:360);
PVp=[26, 27, 34:39, 46:51, 58:63, 70:75, 82:87, 94:99, 106:111, 118:123, 130:135, 142:147,
      154:159, 166:171, 178:183, 190:195, 202:207, 214:219, 226:231, 238:243, 250:255,
      262:267, 274:277];%primavera/verano precis
t=1;
for i=1:length(PVp)%primavera verano
    G=find(dj==PVp(i));
    tmxp_pv(t,kk)=tmx_p(G,:);
    t=t+1;

```

```

end

o=1;
OIp=[28:33, 40:45, 52:57, 64:69, 76:81, 88:93, 100:105, 112:117, 124:129, 136:141, 148:153,
     160:165, 172:177, 184:189, 196:201, 208:213, 220:225, 232:237, 244:249, 256:261,
     268:273];%otoño invierno precis
for i=1:length(OIp)%otoño invierno
    H=find(dj==OIp(i));
    tmxp_oi(o,kk)=tmx_p(H,:);
    o=o+1;
end
%-----
tmn_p=int.tmn(:,j);%temperatura mínima precis
dj=(1:360);
PVp=[26, 27, 34:39, 46:51, 58:63, 70:75, 82:87, 94:99, 106:111, 118:123, 130:135, 142:147,
     154:159, 166:171, 178:183, 190:195, 202:207, 214:219, 226:231, 238:243, 250:255,
     262:267, 274:277];%primavera/verano precis
u=1;
for i=1:length(PVp)%primavera verano
    V=find(dj==PVp(i));
    tmnp_pv(u,kk)=tmn_p(V,:);
    u=u+1;
end

w=1;
OIp=[28:33, 40:45, 52:57, 64:69, 76:81, 88:93, 100:105, 112:117, 124:129, 136:141, 148:153,
     160:165, 172:177, 184:189, 196:201, 208:213, 220:225, 232:237, 244:249, 256:261,
     268:273];%otoño invierno precis
for i=1:length(OIp)%otoño invierno
    H=find(dj==OIp(i));
    tmnp_oi(w,kk)=tmn_p(H,:);
    w=w+1;
end

figure(j+1000) % histogramas

cmp=colormap([0 0 1;1 0 0;1 0 1;1 1 1]);

subplot(3,2,1:2)
    pnx=[tmxo_oi(:,j) tmxp_oi(:,j) tmxo_pv(:,j) tmxp_pv(:,j)];
    edge=[5 10 15 20 25 30 35]; % rango temp maxima
    n=histc(pnx,edge);
    bar(edge,n,'histc'), title('Temperatura Maxima'), xlabel('t°),ylabel('n°meses')
subplot(3,2,3:4)
    pnn=[tmno_oi(:,j) tmnp_oi(:,j) tmno_pv(:,j) tmnp_pv(:,j)];
    edges=[-4 0 4 8 12 16 20]; % rango temp minima
    m=histc(pnn,edges);
    bar(edges,m,'histc'), title('Temperatura Minima'), xlabel('t°),ylabel('n°meses')
subplot(3,2,5:6)

```

```

pnp=[sumesta(10:30,j) int.pph(10:30,j)]; % para tener los 21 años
edg=[0 250 500 750 1000 1250 1500 2000 2500 3000 3500 4000]; % rango para precipitacion
q=histc(pnp,edg);
bar(edg,q,'histc'), title('Precipitacion'), xlabel('mm'),ylabel('n°años')

kk=kk+1;
end

%a=[1:300];
%b=[2:5:1500];
%pnx=[a b]; 1x720
%pnx=[a' b']; para que sume dimensiones 2 x 360
%edge=[50 100 150 200 250 300];
%n=histc(pnx, edge);
%bar(edge, n, 'histc'), colormap ([0 0 1;1 1 1]); edgecolor([0 0 1;0 0 1]);

```

VIII.9.d. Mapa Biomasa y volumen

```

zz1 = load('E:\ASUKITA\memoria\matlab\polbound\international_boundaries.dat');
zz2 = load('E:\ASUKITA\memoria\resultados\datos_para_mapa_listos\mapas y
programas_maisa\chile_boundaries_ed.dat');

load('E:\ASUKITA\memoria\matlab\maisa.topo.mat');

% Cargar datos
load E:\ASUKITA\memoria\resultados\datos_para_mapa_listos\precis43pg.mat
load stemBL.mat %load standvolBL.mat (para volumen)
load stemB2.mat %load standvolB2.mat (para volumen)
load stemA2.mat %load standvolA2.mat (para volumen)

% Para obtener la mascara
long=transpose(lon);
topo(topo == 108) = -10; %el 108 corresponde al mar

% Interpolacion de topo a grilla de PRECIS
topoint = interp2(x,y,topo,long,lat);

% Mascara
ind = find(topoint == -10);
b1 = squeeze(BL(241,,:)); %modificable al escenario y edad del rodal
b2 = squeeze(B2(241,,:)); %301 para 25 años; 241 para 20 años
a2 = squeeze(A2(241,,:));
b1(ind) = NaN;
b2(ind) = NaN;

```

```

a2(ind) = NaN;

%% Figura
load('E:\ASUKITA\memoria\resultados\datos_para_mapa_listos\mapas y
programas_maisa\browngreen.mat');
cmp = colormap(browngreen);
cmp2=cmp([32 36 43 48 52 56 58 61 64],:);
set(gcf,'Colormap', cmp2,'PaperUnits', 'centimeter','PaperOrientation','portrait','PaperPosition',[1
1.5 30 21])%en el papel

tick = [0 50 100 150 200 250 300 350 400 450];
lim =[0 450];

%%set(gca,'Position',[0.1 0.1 0.95 0.5])%en la figura
subplot(1,3,1)
contourf(lon,lat,b1,tick,'edgecolor','none')
hold on
set(gca,'CLim',lim)
plot(zz1(:,1),zz1(:,2),'-k')
plot(zz2(:,1),zz2(:,2),'-k')
contour(x,y,topo,[-1 1],'-k','linewidth',1); % contorno zero, para linea de costa
%[c,h] = contour(lon,lat,topoint,[100 500 1000 1500 2000],'-k'); % contornos de topografia
%clabel(c)
%drawcoast('e')
grid on
ylabel('Latitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
xlabel('Longitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
text(-74,-34.3,'Clima Actual', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')
text(-70,-34,'Biomasa a 20 años', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')

subplot(1,3,2)
contourf(lon,lat,b2,tick,'edgecolor','none')
hold on
set(gca,'CLim',lim)
plot(zz1(:,1),zz1(:,2),'-k')
plot(zz2(:,1),zz2(:,2),'-k')
contour(x,y,topo,[-1 1],'-k','linewidth',1);
%drawcoast('e')
grid on
ylabel('Latitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
xlabel('Longitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
text(-74,-34.3,'SRES B2', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')

subplot(1,3,3)
contourf(lon,lat,a2,tick,'edgecolor','none')
hold on
set(gca,'CLim',lim)
plot(zz1(:,1),zz1(:,2),'-k')
plot(zz2(:,1),zz2(:,2),'-k')

```

```

contour(x,y,topo,[-1 1],'-k','linewidth',1);
%drawcoast('e')
grid on
ylabel('Latitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
xlabel('Longitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
text(-74,-34.3,'SRES A2', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')

% colorbar
for i = 1:9
    cax(i+1)=axes('position',[0.37+i*0.03,0.04,0.03,0.015]);
    set(cax(i+1),'color',cmp2(i,:));
    set(cax(i+1),'xtick',[],'ytick',[]);
    box on
end

for i = 2:8
    set(cax(i+1),'xlim',[tick(i),tick(i+1)],'xtick',[tick(i),tick(i+1)],'xaxislocation','bottom','fontsize',7);
end

%%set(gcf,'inverthardcopy','off')
%%print -djpeg90 biomasa_BL-B2-A2_20y.jpg

```

VIII.9.e. Mapa diferencias porcentuales

```

zz1 = load('E:\ASUKITA\memoria\matlab\polbound\international_boundaries.dat');
zz2 = load('E:\ASUKITA\memoria\resultados\datos_para_mapa_listos\mapas y
programas_maisa\chile_boundaries_ed.dat');

load('E:\ASUKITA\memoria\matlab\maisa.topo.mat');

% Cargar datos
load precis43pg.mat
load standvolBL.mat
load standvolB2.mat
load standvolA2.mat

% Para obtener la mascara
long=transpose(lon);
topo(topo == 108) = -10; %el 108 corresponde al mar

% Interpolacion de topo a grilla de PRECIS
topoint = interp2(x,y,topo,long,lat);

% Mascara
ind = find(topoint == -10);

```

```

bl = squeeze(BL(301,,:)); %modificable al escenario y edad del rodal
b2 = squeeze(B2(301,,:)); %301 para 25 años; 241 para 20 años
a2 = squeeze(A2(301,,:));
bl(ind) = NaN;
b2(ind) = NaN;
a2(ind) = NaN;
difb2 = b2 - bl;
difa2 = a2 - bl;

%% Figura
load('E:\ASUKITA\memoria\resultados\datos_para_mapa_listos\mapas
programas_maisa\browngreen.mat');
cmp = colormap(browngreen);
cmp2=cmp([2 2 8 8 12 12 18 18 24 32 32 38 44 44 50 50 57 57 64 64],:);
set(gcf,'Colormap', cmp2,'PaperUnits', 'centimeter','PaperOrientation','portrait','PaperPosition',[0.5
1 30 21])%en el papel

tick = [-100 -80 -60 -40 -20 -10 10 20 40 60 80 100];
lim =[-100 100];

%%set(gca,'Position',[0.1 0.1 0.95 0.5])%en la figura
subplot(1,2,1)
contour(lon,lat,difa2,tick,'edgecolor','none') %modificable al escenario
hold on
set(gca,'CLim',lim)
plot(zz1(:,1),zz1(:,2),'-b')
plot(zz2(:,1),zz2(:,2),'-b')
[c,h] = contour(lon,lat,topoint,[100 500 1000 1500 2000],'-k'); % contornos de topografia
contour(x,y,topo,[-1 1],'-k','linewidth',1.5); % contorno zero para linea de costa
%drawcoast('e')
grid on
ylabel('Latitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
xlabel('Longitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
text(-74,-34.3,'A2- Clima Actual', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')
text(-72,-34,'Diferencia en Volumen a 25 anos', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')

subplot(1,2,2)
contour(lon,lat,difb2,tick,'edgecolor','none') %modificable al escenario
hold on
set(gca,'CLim',lim)
plot(zz1(:,1),zz1(:,2),'-b')
plot(zz2(:,1),zz2(:,2),'-b')
[c,h] = contour(lon,lat,topoint,[100 500 1000 1500 2000],'-k'); % contornos de topografia
contour(x,y,topo,[-1 1],'-k','linewidth',1.5); % contorno zero para linea de costa
%drawcoast('e')
grid on
ylabel('Latitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
xlabel('Longitud','fontsize',10,'fontweight','bold','linewidth',2)
text(-74,-34.3,'B2-Clima actual', 'fontsize', 12,'fontweight', 'bold')

```

```
% colorbar
for i = 1:4
    cax(i+1)=axes('position',[0.37+i*0.03,0.04,0.03,0.015]);
    set(cax(i+1),'color',cmp2(2*i,:));
    set(cax(i+1),'xtick',[],'ytick',[]);
    box on
end

for i = 5:6
    cax(i+1)=axes('position',[0.37+i*0.03,0.04,0.03,0.015]);
    set(cax(i+1),'color',cmp2(i+4,:));
    set(cax(i+1),'xtick',[],'ytick',[]);
    box on
end

for i = 7:11
    cax(i+1)=axes('position',[0.37+i*0.03,0.04,0.03,0.015]);
    set(cax(i+1),'color',cmp2(2*i-2,:));
    set(cax(i+1),'xtick',[],'ytick',[]);
    box on
end

for i = 2:10
    set(cax(i+1),'xlim',[tick(i),tick(i+1)],'xtick',[tick(i),tick(i+1)],'xaxislocation','bottom','fontsize',7);
end

%set(gcf,'inverthardcopy','off')
%%print -djpeg90 diff_vol_25y.jpg
```

IX. ANEXOS

IX.1. Parámetros modelo 3-PG

Meaning/comments	Name	Units	P. radiata
Biomass partitioning and turnover			(BFG)
Allometric relationships & partitioning			
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	pFS2	-	0,8
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	pFS20	-	0,4
Constant in the stem mass v. diam. relationship	StemConst	-	0,0243
Power in the stem mass v. diam. relationship	StemPower	-	2,72
Maximum fraction of NPP to roots	pRx	-	0,6
Minimum fraction of NPP to roots	pRn	-	0,25
Litterfall & root turnover			
Maximum litterfall rate	gammaFx	1/month	0,03
Litterfall rate at t = 0	gammaF0	1/month	0,001
Age at which litterfall rate has median value	tgammaF	months	36
Average monthly root turnover rate	Rttover	1/month	0,015
NPP & conductance modifiers			
Temperature modifier (fT)			
Minimum temperature for growth	Tmin	deg. C	0
Optimum temperature for growth	Topt	deg. C	20
Maximum temperature for growth	Tmax	deg. C	32
Frost modifier (fFRost)			
Days production lost per frost day	kF	days	1
Soil water modifier (fSW)			
Moisture ratio deficit for $f_q = 0.5$	SWconst	-	0,7
Power of moisture ratio deficit	SWpower	-	9
Fertility effects			
Value of 'm' when FR = 0	m0	-	0
Value of 'fNutr' when FR = 0	fN0	-	0,6
Power of (1-FR) in 'fNutr'	fNn	-	1
Age modifier (fAge)			
Maximum stand age used in age modifier	MaxAge	years	50
Power of relative age in function for fAge	nAge	-	4
Relative age to give fAge = 0.5	rAge	-	0,5
Stem mortality & self-thinning			
Mortality rate for large t	gammaNx	%/year	0
Seedling mortality rate (t = 0)	gammaN0	%/year	0

(continúa)

IX.1. (continuación) Parámetros modelo 3-PG

Meaning/comments	Name	Units	P. radiata
Age at which mortality rate has median value	tgammaN	years	2
Shape of mortality response	ngammaN	-	1
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	wSx1000	kg/tree	160
Power in self-thinning rule	thinPower	-	1,5
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tree	mF	-	0
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree	mR	-	0,2
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree	mS	-	0,2
Canopy structure and processes			
Specific leaf area			
Specific leaf area at age 0	SLA0	m ² /kg	5
Specific leaf area for mature leaves	SLA1	m ² /kg	5
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	tSLA	years	2
Light interception			
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k	-	0,5
Age at canopy cover	fullCanAge	years	3
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	MaxIntcptn	-	0,15
LAI for maximum rainfall interception	LAImaxIntcptn	-	5
Production and respiration			
Canopy quantum efficiency	alpha	molC/molPAR	0,05
Ratio NPP/GPP	Y	-	0,47
Conductance			
Maximum canopy conductance	MaxCond	m/s	0,02
LAI for maximum canopy conductance	LAIgcx	-	3,33
Defines stomatal response to VPD	CoeffCond	1/mBar	0,05
Canopy boundary layer conductance	BLcond	m/s	0,2
Wood and stand properties			
Branch and bark fraction (fracBB)			
Branch and bark fraction at age 0	fracBB0	-	0,5
Branch and bark fraction for mature stands	fracBB1	-	0,1
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	tBB	years	5
Basic Density			
Minimum basic density - for young trees	rhoMin	t/m ³	0,480
Maximum basic density - for older trees	rhoMax	t/m ³	0,480

(continúa)

IX.1. (continuación) Parámetros modelo 3-PG

Meaning/comments	Name	Units	P. radiata
Age at which $\rho = (\rho_{\text{Min}} + \rho_{\text{Max}})/2$	tRho	years	4
Stem height			
Constant in the stem height relationship	aH	-	0
Power of DBH in the stem height relationship	nHB	-	0
Power of stocking in the stem height relationship	nHN	-	0
Stem volume			
Constant in the stem volume relationship	aV	-	0
Power of DBH in the stem volume relationship	nVB	-	0
Power of stocking in the stem volume relationship	nVN	-	0
Conversion factors			
Intercept of net v. solar radiation relationship	Qa	W/m ²	-90
Slope of net v. solar radiation relationship	Qb	-	0,8
Molecular weight of dry matter	gDM_mol	gDM/mol	24
Conversion of solar radiation to PAR	molPAR_MJ	mol/MJ	2,3

IX.2. Factores, significados y obligatoriedad del modelo 3-PG

Meaning of the 3PGpjs keywords		
Keyword	Comments on context and meaning	Mandatory or optional
<i>Identification of run type</i>		
Run type	Assigns nature of run to be performed based on following run-type keywords:	M
SingleSite	Identifies a single-site run	
SiteSeries	Identifies a series of sheets to run	
Sensitivity	Identifies a sensitivity analysis run	
MultiSite	Identifies a multi-site run	
<i>Single-site site data and output controls</i>		
Title	Assigns text to identify <i>single-site</i> run output block	O
Site	Assigns name of site for a single-site run	O
Species	Assigns name of species	O
Latitude	Site latitude (-ve for S hemisphere)	M
Fertility rating	Fertility rating, 0-1	M
Soil class	Soil classification (1-4, or S, SL, CL, C; 0 for no soil water limits; ? for default)	M
Maximum ASW	Maximum and minimum available soil water (mm)	M
Minimum ASW		M
Year planted	Calendar year and month in which stand was planted	O
Month planted		M
End age	Stand age at which run ends (years)	M
Output ages	Identifies output ages in <i>y&m</i> format	O
#Output	Identifies 1 st row for <i>single-site</i> run output block	M
<i>Single-site stand initialisation data</i>		
Seedling mass	Seedling biomass (gm seedling ⁻¹)	O
Stand mass	Initial total stand biomass (t ha ⁻¹) (only if seedling mass not given)	O
Initial WF	Initial foliage, root and stem biomass (t ha ⁻¹), i.e. at <i>initial year, initial month</i> (only if seedling mass and stand mass are not given)	O
Initial WR		O
Initial WS		O
Initial age	Initial stand age (years and months) (only if stand mass is given)	O

(continúa)

IX.2. (continuación) Factores, significados y obligatoriedad del modelo 3-PG

Meaning of the 3PGpjs keywords		
Keyword	Comments on context and meaning	Mandatory or optional
<i>Identification of run type</i>		
Initial year	Calendar year and month at which initialisation data is given (only if seedling mass and stand mass are not given)	O
Initial month		O
Initial stocking	Initial stocking (trees ha ⁻¹)	M
Initial ASW	Initial available soil water (mm)	M
<i>Single-site silvicultural "events"</i>		
Fertility	Identifies table of fertility ratings (0-1)	O
MinASW	Identifies table of values of imposed MinASW (mm)	O
Irrigation	Identifies table of applied irrigation rates (MI ha ⁻¹ yr ⁻¹)	O
Thinning	Identifies table of thinning events	O
Defoliation	Identifies table of defoliation events	O
Vary block	Identifies series of tables of age-dependent changes to parameters or site factors	O
<i>Sensitivity analysis and site-series runs</i>		
Sites	Names of single-site sheets to be run must be below Sites	M
<i>Multi-site run</i>		
Climate data	Assigns name of climate input data sheet	M
Species	Assigns name of species	O
Seedling mass	Assigns common seedling biomass	O
Stand mass	Assigns common total initial stand biomass (only is seedling mass not given)	O
Initial age	Assigns common initial stand age (only is stand mass is given)	O
Month planted	Sets month in which stand was planted	O
Stand age	Assigns maximum stand age for multi-site runs	O
Sites	Names of climate data sets sites to be used must be below Sites	M

(continúa)

IX.2. (continuación) Factores, significados y obligatoriedad del modelo 3-PG

Meaning of the 3PGpjs keywords		
Keyword	Comments on context and meaning	Mandatory or optional
<i>Identification of run type</i>		
<i>Climate input data</i>		
Climate data	On <i>climate data sheet</i> :	M
	Keywords to right of Climate data identify input variables on this sheet or table. Variables recognised are:	
	Tmax, Tmin, Tav, VPD, Rain, Solar Rad or Radtn, Pan evap or Evap, rain days , and Frost days	
	On <i>multi-site sheet</i> : names climate data input sheet	M
	On <i>single-site sheet</i> : If cell to right of Climate data is a climate variable (as above), get climate data from this sheet; otherwise names climate data sheet (Met station then required)	
Met station	Names climate data set when climate data for a <i>single-site</i> read from climate data input sheet	O
Database format	Required on <i>climate data sheet</i> to identify database format:	M
Table format	Table format: variables in columns, months in rows	O
Row format	Single row format: one row per year	O
<i>Run-time options</i>		
Parameters	Locates parameter change block for sheet-specific parameter changes	O
WF fraction	Fractions of initial stand biomass in foliage, roots and stems	O
WR fraction		O
WS fraction		O
Interpolate lookups	Yes ⇒ apply linear interpolation between tabulated ages for silvicultural events	O
Output data	Assigns list of output variables for run	O
Output frequency	n = none, r = end of rotation, a = annual, m = monthly	O
Clear output	Yes ⇒ clear output region before running 3-PG	O
Details sheet	Name of output sheet for details of single-site runs (missing means no details produced)	O

