

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



DOCTORADO EN INGENIERÍA

Evaluación del impacto de la expansión agrícola en el hidroclima del Gran Chaco

M. Agostina Bracalenti

FICH

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS

INTEC

INSTITUTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA

CEVARCAM

CENTRO DE ESTUDIOS DE VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

Tesis de Doctorado **2024**

Doctorado en Ingeniería
Mención en Recursos Hídricos

Título de la obra:

**Evaluación del impacto de la expansión agrícola en el
hidroclima del Gran Chaco**

Autor:

M. Agostina Bracalenti

Lugar:

Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Expansión agrícola, cambios de uso del suelo, hidroclima, efectos
remotos, Gran Chaco



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química
Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA EN EL HIDROCLIMA DEL GRAN CHACO

M. Agostina Bracalenti

Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado
como parte de los requisitos para la obtención
del grado de
DOCTOR EN INGENIERIA
Mención Recursos Hídricos
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2024

Secretaría de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje “El Pozo”,
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química
Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA EN EL HIDROCLIMA DEL GRAN CHACO

M. Agostina Bracalenti

Lugar de Trabajo:

CEVARCAM
Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral

Director:

Ernesto H. Berbery

Earth System Science Interdisciplinary
Center/Cooperative Institute for
Satellite and Earth System Studies
University of Maryland

Co-director:

Omar V. Müller

CEVARCAM - FICH -UNL
CONICET

Jurado Evaluador:

Dr. José Volante
Dra. Victoria Marchesini
Dra. Moira Doyle

INTA (Jujuy)
Agriculture & Agri-Food Canada
CIMA, UBA-Conicet

2024

(1994-
2024)

30 años de la
Consagración Constitucional
de la Autonomía y Autarquía
Universitaria en Argentina.



ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, a los veintitrés días del mes de agosto del año dos mil veinticuatro, se reúnen en forma online sincrónica los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Doctorado en Ingeniería, Mención "Recursos Hídricos", titulada "*Evaluación del impacto de la expansión agrícola en el hidroclima del Gran Chaco*", desarrollada por la Ing. María Agustina BRACALENTI, DNI N° 35.446.350, bajo la dirección del Dr. Ernesto Hugo Berbery y la codirección del Dr. Omar Müller. Ellos son: la Dra. Moira Doyle, la Dra. Victoria Marchesini y el Dr. José Volante.-----

La Presentación oral y defensa de la Tesis se efectúa bajo la modalidad virtual según lo establecido por Resolución CS N° 382/21. -----

Luego de escuchar la Defensa Pública y de evaluar la Tesis, el Jurado considera:

Que la tesis aborda un tema central respecto de la relación del clima sobre los paisajes y regiones de El Chaco sudamericano, y por lo tanto resulta de particular importancia para el avance del conocimiento.

La versión final de la tesis está bien escrita y organizada, y contiene ideas originales y una metodología acorde. La tesista incorporó las observaciones y sugerencias del jurado, no obstante, consideramos que en la discusión de la tesis se podría haber profundizado la comparación con estudios anteriores y la discusión de las incertezas del modelo. Asimismo, una mayor reflexión de las implicancias del trabajo sobre políticas públicas ambientales locales y regionales. La presentación ha sido clara y detallada, sin embargo, algunas de las preguntas del jurado no fueron respondidas con profundidad.



Dr. JOSÉ LUIS MACOR
SECRETARIO DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas

Dependencia

Dirección postal

Código postal, Ciudad, Argentina

Teléfono

Correo electrónico

(1994-
2024)

30 años de la
Consagración Constitucional
de la Autonomía y Autarquía
Universitaria en Argentina.



Consideramos que la tesis hace un aporte fundamental y muy pertinente al conocimiento de la región de El Gran Chaco. En este sentido, esta tesis es un gran aporte a los escenarios climáticos de la región, abriendo una línea de investigación pertinente y necesaria.

Por lo tanto, el jurado aprueba la tesis con calificación 9 (nueve) Distinguido.

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente. -----

Dr. José Volante

Dra. Victoria Marchesini

Dra. Moira Doyle



Dr. JOSÉ LUIS MACOR
SECRETARIO DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas

Dependencia

Dirección postal

Código postal, Ciudad, Argentina

Teléfono

Correo electrónico

(1994-
2024)

30 años de la
Consagración Constitucional
de la Autonomía y Autarquía
Universitaria en Argentina.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 23 de agosto de 2024.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Doctorado en Ingeniería titulada *"Evaluación del impacto de la expansión agrícola en el hidroclima del Gran Chaco"*, desarrollada por la Ing. María Agostina BRACALENTI, en el marco de la Mención "Recursos Hídricos", certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

La aprobación final de esta disertación estará condicionada a la presentación de dos copias encuadradas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico del Doctorado en Ingeniería.

Dr. José Volante

Dra. Victoria Marchesini

Dra. Moira Doyle

Santa Fe, 23 de agosto de 2024.

Certifico haber leído la Tesis, preparada bajo mi dirección en el marco de la Mención "Recursos Hídricos" y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

.....
Dr. Omar Müller
Codirector de Tesis

.....
Dr. Ernesto Berbery
Director de Tesis


Dr. JOSÉ LUIS MACOR
SECRETARIO DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas

Dependencia

Dirección postal

Código postal, Ciudad, Argentina

Teléfono

Correo electrónico

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Esta disertación ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Doctora en Ingeniería ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en Repositorio Institucional de Acceso Abierto -RIAA- de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disponible a sus lectores bajo las condiciones estipuladas.

Citaciones breves de esta disertación son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para una citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concedidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mab', with a long horizontal stroke extending to the right.

María Agostina Bracalenti

Agradecimientos

El trabajo de tesis se desarrolló en el Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL). Para su elaboración, se recibió financiación del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET), a través de una Beca Interna de Posgrado y de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Litoral.

Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Ernesto Hugo Berbery, mi director, y al Dr. Omar Müller, mi codirector, por permitirme iniciarme en la investigación, por compartir conmigo sus experiencias y por su apoyo a lo largo del doctorado. Además, les agradezco por permitirme enriquecer este trabajo de tesis y las publicaciones derivadas con sus conocimientos, a través de sus sugerencias, correcciones y consejos.

También quiero agradecer a la FICH y al Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), por permitirme desarrollar mis carreras de grado y posgrado en un ambiente familiar y ameno. Una especial mención a todos mis compañeros del CEVARCAM, en particular a Miguel, Leandro, Carlos, María del Valle y Gabriela, por brindarme su confianza y por su predisposición constante.

Por último, mi agradecimiento más especial para mi familia, por acompañarme y entenderme en este camino, brindándome su apoyo en mis decisiones y alentándome constantemente. A Franco por su paciencia infinita y su constante ayuda y optimismo. A todos mis amigos, por sus buenas energías.

Índice

Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	x
Resumen	xi
Abstract.....	xv
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Descripción de los capítulos	4
Capítulo 2: El modelo climático regional.....	6
2.1 Introducción al capítulo	6
2.2 Descripción del modelo WRF.....	6
2.3 Ecuaciones de gobierno	9
2.4 Parametrización del modelo climático.....	10
2.5 Modelo de suelo Noah-MP	12
2.5.1 Ecuaciones del modelo Noah-MP	15
2.5.2 Representación de la cobertura del suelo en Noah-MP	19
2.6 Productos MODIS para modelado climático	22
2.6.1 Calidad del producto MODIS en la región de estudio	23
2.7 Conclusiones del capítulo	25
Capítulo 3: Simulación climática de alta resolución del Gran Chaco	27
3.1 Introducción al capítulo	27
3.2 Características geográficas del Gran Chaco	27
3.3 Configuración de la simulación del modelo climático	31
3.4 Diseño experimental	32
3.5 Evaluación del modelo.....	36
3.5.1 Datos observacionales	36
3.5.2 Precipitación	37
3.5.3 Humedad de suelo	39
3.5.4 Temperatura.....	42

3.6	Conclusiones del capítulo	43
Capítulo 4: Escenarios de cambios de uso del suelo en el Gran Chaco		45
4.1	Introducción al capítulo	45
4.2	La cobertura de suelo y su evolución en el Chaco Seco	45
4.3	Escenarios de cobertura de suelo	49
4.3.1	Escenario OBS_LULCC: LULCCs observados entre 2001 a 2015	49
4.3.2	Escenario AG_INT: Expansión intensiva de tierras agrícolas	51
4.4	Conclusiones del capítulo	53
Capítulo 5: Efectos de los LULCCs en el hidroclima regional		54
5.1	Introducción al capítulo	54
5.2	Escenario OBS_LULCC	55
5.2.1	Cambios en las propiedades de la cobertura del suelo	55
5.2.2	Efectos sobre el balance energético	56
5.2.3	Efectos en el ciclo del agua	57
5.3	Escenario AG_INT	59
5.3.1	Cambios en las propiedades de la cobertura del suelo	59
5.3.2	Efectos sobre el balance energético	59
5.3.3	Efectos en el ciclo del agua	62
5.4	Análisis basado en procesos	63
5.5	Conclusiones del capítulo	66
Capítulo 6: Discusión y conclusiones.....		67
APÉNDICE A		72
APÉNDICE B.....		77
APÉNDICE C.....		78
REFERENCIAS		79

Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema del flujo del sistema de modelado WRF utilizado en esta investigación basado en el diagrama de flujo de la “ARW Users Guide V3.9”.....	8
Figura 2.2 Diagrama esquemático del balance energético y procesos representados en Noah-MP versión 5.0. (He y otros, 2023).	13
Figura 2.3 Diagrama esquemático del balance hídrico y procesos representados en Noah-MP versión 5.0. (He y otros, 2023).	14
Figura 2.4 Diagrama esquemático del esquema de subgrilla “semitile”. (Izquierda) Flujos de onda larga neta (La), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor del suelo (G), se calculan por separado para los mosaicos de suelo desnudo (subíndice “b”) y con vegetación (subíndice “v”) que siguen el enfoque de “mosaico”, mientras que los flujos de radiación de onda corta (Derecha) (Sav y Sag) se calculan en toda la celda de la cuadrícula considerando las probabilidades de brecha. Fuente: Niu y otros, 2011.....	15
Figura 2.5 Diagrama esquemático del suelo y un acuífero libre como se representa en el modelo. Los índices para las capas de suelo desde arriba son 1, 2, 3 y 4. Las variables se describen en detalle en el texto. Fuente: adaptado de Niu y otros, 2011.....	17
Figura 2.6 Representación convencional de la cobertura de suelo en Noah-MP para una resolución de 10 minutos de arco: a) clasificación USGS y b) clasificación IGBP. Las leyendas sólo muestran las categorías presentes en la región.	21
Figura 2.7 Porcentaje de confianza para los mapas MODIS con clasificación IGBP para los años (a) 2001 y (b) 2015. Los límites del Chaco Seco y Húmedo se muestran en rojo y azul respectivamente.	23
Figura 2.8 Distribución de frecuencias de confianza de las clasificaciones IGBP en (a) el dominio, (b) Chaco Seco y (c) Chaco Húmedo.....	24
Figura 3.1 Región de estudio y topografía. Las líneas de colores resaltan las subregiones del Gran Chaco: Chaco Seco (rojo) y Chaco Húmedo (verde).	29
Figura 3.2 Temperatura media anual para el periodo 1990-2020. Fuente de datos: CRU..	30

Figura 3.3 Precipitación media anual para el periodo 1990-2020. Fuente de datos: CRU.	30
Figura 3.4 Diseño experimental.....	33
Figura 3.5 Mapa de cobertura de suelo del ensamble (a) CONTROL (b) PASADO y (c) FUTURO.	34
Figura 3.6 Ejemplo del proceso de dilatación aplicado a un área de cultivos (a) Área ocupada originalmente por cultivos (b) Área ocupada por cultivos después de aplicar dilatación agregando una línea; (c) Área ocupada por cultivos después de aplicar dilatación agregando dos líneas.	34
Figura 3.7 Promedio temporal de (a) la precipitación observada (promedio entre WFDEI, CRU y CPC), (b) la precipitación del ensamble CONTROL y (c) sus diferencias. (d) Serie temporal de precipitaciones promediadas en la región del Gran Chaco.....	39
Figura 3.8 Promedio temporal de la humedad del suelo cerca de la superficie para (a) el producto SMOPS, (b) el ensamble CONTROL, (c) sus diferencias, y promedio temporal de la humedad del suelo en la zona de las raíces para (d) el producto HSAF, (e) el ensamble CONTROL, y (f) sus diferencias. (g) Series temporales de humedades del suelo observadas y simuladas promediadas sobre el Gran Chaco.	41
Figura 3.9 Promedio temporal de (a) la temperatura observada a 2 m, (b) la temperatura del ensamble CONTROL a 2 m y (c) sus diferencias. (d) Serie temporal de temperatura promediada sobre el Gran Chaco.....	42
Figura 4.1 Evolución temporal de la cobertura del suelo en el Chaco Seco. Para simplificar, las categorías de cobertura terrestre se agregan en menos clases (ver texto).	47
Figura 4.2 Cuantificación (en km ²) de LUCCs en el Chaco Seco de 2001 a 2015. El color de la celda es proporcional a su valor.....	47
Figura 4.3 Clasificación de los LULCCs.	48
Figura 4.4 Porcentajes del tipo de cobertura de suelo en el dominio del escenario OBS_LULCC para los ensambles PASADO y CONTROL.	50
Figura 4.5 Diferencias entre el mapa de cobertura de suelo del ensamble PASADO con el mapa de cobertura de suelo del ensamble CONTROL.....	50

Figura 4.6 Porcentajes del tipo de cobertura de suelo en Chaco Seco del escenario AG_INT para los ensambles CONTROL y FUTURO.	52
Figura 4.7 Diferencias entre el mapa de cobertura de suelo del ensamble CONTROL con el mapa de cobertura de suelo del ensamble FUTURO.	52
Figura 5.1 Diferencias en las propiedades biofísicas para el escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) LAI, (b) albedo y (c) resistencia estomática. Se utilizó opacidad en todos los paneles para resaltar la región de interés.	55
Figura 5.2 Diferencias en los componentes del balance energético para el verano del escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) radiación de onda corta neta, (b) radiación de onda larga neta, (c) radiación neta, (d) calor latente, (e) calor sensible, y (f) temperatura a 2 m. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo (local) y sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Seco (no local).	57
Figura 5.3 Diferencias en los componentes del balance hídrico para el verano del escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) precipitación, (b) humedad del suelo, (c) evapotranspiración y (d) escorrentía. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas de la grilla con cambios en la cobertura del suelo (local) y sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Seco (no local).	58
Figura 5.4 Diferencias en las propiedades biofísicas para el escenario AG_INT (FUTURO-CONTROL): (a) LAI, (b) albedo y (c) resistencia estomática. Se utilizó opacidad en todos los paneles para resaltar la región de interés.	59
Figura 5.5 Diferencias en los componentes del balance energético para el verano del escenario AG_INT (FUTURO-CONTROL): (a) radiación de onda corta neta, (b) radiación de onda larga neta, (c) radiación neta, (d) calor latente, (e) calor sensible, y (f) temperatura a 2 m. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo en Chaco Seco (Local) y sobre celdas sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Húmedo (Rem).	61

Figura 5.6 Diferencias en los componentes del balance hídrico para el verano del escenario OBS_LULCC (FUTURO-CONTROL): (a) precipitación, (b) humedad del suelo, (c) evapotranspiración y (d) esorrentía. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo en Chaco Seco (Local) y sobre celdas sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Húmedo (Rem). 63

Figura 5.7 Diagrama esquemático de la posible vía de retroalimentación suelo-atmósfera causada por la expansión agrícola. Las flechas hacia arriba representan aumentos, mientras que las flechas hacia abajo representan disminuciones. 65

Índice de tablas

Tabla 2.1 - Propiedades biofísicas utilizadas por el modelo Noah-MP.....	22
Tabla 3.1 - Resumen de la configuración de WRF.....	32
Tabla 3.2 - Parametrización seleccionada de NOAH-MP.....	32

Evaluación del impacto de la expansión agrícola en el hidroclima del Gran Chaco

M. Agostina Bracalenti

Director: Ernesto Hugo Berbery

Co-Director: Omar V. Müller

Resumen

La deforestación en el sur de Sudamérica es un problema ambiental apremiante que ha persistido durante décadas, convirtiendo la región en una de las zonas más afectadas a nivel mundial. Los principales impulsores de esta deforestación son la expansión de la frontera agrícola, la cría de ganado y la tala ilegal. En particular, el Gran Chaco, una de las regiones más grandes de Sudamérica, ha sufrido niveles alarmantes de deforestación en los últimos años. Esta región es conocida por su destacada diversidad biológica, con una amplia gama de especies vegetales y animales. El Gran Chaco se divide en dos ecorregiones dominantes: el Chaco Húmedo y el Chaco Seco. De estas, el Chaco Seco es la ecorregión que ha experimentado la tasa de deforestación más significativa, lo que ha resultado en graves consecuencias ambientales.

Los cambios en el uso y cobertura del suelo (LULCCs, por sus siglas en inglés) impactan tanto las condiciones del suelo como de la atmósfera que lo rodea al influir en las interacciones suelo- atmósfera. Este fenómeno es particularmente evidente en el sur de Sudamérica, donde existe un fuerte acoplamiento entre el suelo y la atmósfera que afectan las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Cuando la vegetación natural es reemplazada por pasturas, cultivos u otros tipos de usos del suelo, se producen cambios en las propiedades biofísicas relacionadas con la vegetación, como el albedo, la resistencia estomática y la rugosidad de la superficie. Estas alteraciones, a su vez, afectan el funcionamiento del ecosistema y los flujos de agua y energía en la superficie, lo que modifica

el transporte de humedad y calor en la atmósfera. Como resultado, los LULCCs inevitablemente provocan cambios en el estado del clima local, pero también pueden afectar las condiciones hidroclimáticas de regiones cercanas o distantes, por ejemplo a través de cambios en el caudal de los ríos y la dinámica atmosférica.

Las profundas alteraciones en los patrones de uso del suelo han motivado esta investigación, cuyo objetivo general es explorar los LULCCs más prevalentes en el Chaco Seco desde 2001 hasta 2015 y sus impactos en el clima regional. Además, este estudio busca comprender las posibles consecuencias en el Gran Chaco de una continuidad en el avance intensivo de la frontera agrícola dentro del Chaco Seco. Para abordar las metas planteadas, se utilizó un modelo climático regional (RCM, del inglés Regional Climate Model). Los RCMs resultan la mejor herramienta para este tipo de investigación, ya que simulan las interacciones suelo-atmósfera, permitiendo investigar la respuesta atmosférica a los LULCCs. Utilizando un RCM, se realizaron experimentos de sensibilidad modificando el mapa de cobertura de suelo para simular diversos escenarios de LULCCs.

Para tener en cuenta los cambios en la cobertura del suelo en las simulaciones climáticas, se incorporaron mapas de cobertura del suelo del satélite Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) en el modelo de suelo (LSM, por su sigla en inglés) acoplado al modelo climático. Estos mapas de alta resolución, están disponibles desde el 2001. La primera actividad de esta investigación fue analizar el proceso de cambios de cobertura desde el 2001 hasta el 2015 a partir de los mapas de MODIS. El producto MODIS, además de la información de cobertura, brinda información sobre la incerteza/confiabilidad de los datos. Para la mayor parte del dominio, los valores de confianza son en general, superiores al 75 %. Sin embargo, la región del Chaco Seco mostró valores de confianza ligeramente más bajos (superiores al 71 %). Es importante destacar que la calidad del producto MODIS muestra una mejora a lo largo del tiempo, en particular, del período de trabajo (2001-2015). Los mapas de MODIS indican que los tipos de cobertura predominantes en el Chaco Seco incluyen sabana, sabana leñosa, bosque, pasturas, matorrales y cultivos. En tan solo quince años, entre el año 2001 a 2015, los cambios en la cobertura del suelo afectaron al 18% de todo el Chaco Seco. No obstante, las observaciones indican que las coberturas asociadas a la agricultura desceleraron su avance a partir del 2007, probablemente debido a la implementación de la Ley Argentina N° 26.331 para la Protección de Bosques Nativos. Por otro lado, el análisis de los cambios indica que la mayoría de los cambios observados en la cobertura del suelo entre 2001 y 2015 podrían estar relacionados con procesos de

deforestación, mientras que el resto corresponde a cambios clasificados como "otros", que no necesariamente están vinculados a procesos de deforestación (por ejemplo, de pasturas a cultivos), y cambios denominados "ilógicos", que son inconcebibles en el mundo real y pueden atribuirse a errores en el proceso de clasificación aplicado por MODIS (por ejemplo, el cambio de sabana leñosa a bosque caducifolio).

Luego, se realizaron tres conjuntos (ensambles) de simulaciones desde enero de 2014 hasta junio de 2016 utilizando el modelo climático regional Weather Research and Forecasting (WRF) que utiliza como LSM (del inglés, Land Surface Model) el modelo Noah Multi-Physics (Noah-MP) con el fin de investigar los efectos de los LULCCs en el Chaco Seco. En el primer ensamble se utilizó el mapa de cobertura de suelo MODIS correspondiente a 2015 (de aquí en adelante ensamble CONTROL), el segundo utilizó el mapa de 2001 (de aquí en adelante ensamble PASADO), y el tercero empleó un mapa sintético generado mediante la expansión intensiva de áreas de cultivos y pasturas observadas en el mapa del 2015 (de aquí en adelante ensamble FUTURO).

Previo a la evaluación comparativa de los ensambles, se validó la capacidad de simulación de WRF comparando el ensamble CONTROL con un variado conjunto de observaciones grilladas. Esta evaluación demostró que el modelo WRF tuvo un buen desempeño para la región de interés. En particular, la precipitación simulada coincide estrechamente con las observaciones en el Gran Chaco, aunque se observan pequeños sesgos negativos en el Chaco Húmedo. La humedad del suelo en la superficie y en la zona de raíces también muestra una buena concordancia con las estimaciones satelitales, aunque se observan algunos sesgos secos en el Chaco Húmedo en consistencia con el déficit de precipitación que WRF simula en esta parte del Gran Chaco. Por último, la temperatura a 2m de altura del modelo muestra una alta correlación con las observaciones en todo el Gran Chaco.

La comparación entre ensambles se focaliza en los meses de verano (DEF), período en el cual el ciclo hidrológico es más activo y las interacciones suelo-atmósfera son más evidentes, dando lugar a cambios más notorios, dada la prevalencia de dichas interacciones en esta estación. En particular, la comparación entre el ensamble CONTROL y PASADO indica que los LULCCs producidos entre el 2001 y el 2015 producen una distribución heterogénea de cambios positivos y negativos en los flujos de radiación en superficie. No obstante, los lugares donde se produjo deforestación muestran una alteración significativa de la radiación neta, el flujo de calor sensible y, en menor medida, el flujo de calor latente. Por su parte, los

cambios en el calor sensible influyen en la temperatura, causando un calentamiento en las áreas deforestadas y un enfriamiento en las áreas con otros LULCCs. Estos cambios alteran el ciclo del agua, forzando condiciones generalmente más secas en el Chaco Seco. La precipitación mostró cambios localmente significativos, con disminuciones e incrementos observados en diferentes áreas. La humedad del suelo siguió el patrón de la precipitación, mostrando cambios locales netos negativos. En síntesis, los LULCCs ocurridos en los primeros quince años de este siglo condujeron a veranos más secos y calientes en el Chaco Seco.

La comparación entre el ensamble CONTROL y FUTURO muestra que el avance intensivo de la frontera agrícola sobre la vegetación nativa produce una disminución general del Índice de Área Foliar (LAI, por su sigla en inglés) y un aumento en el albedo. Esto, a su vez, tiene efectos significativos en el balance de energía, reduciendo aún más la radiación neta (debido al aumento de la radiación saliente de onda corta) y debilitando los flujos en la superficie, lo que resulta en condiciones más secas, menor precipitación, humedad del suelo, evapotranspiración y escorrentía. La intensiva expansión agrícola en el Chaco Seco, no solo tiene un impacto local sino también en la región aledaña del Chaco Húmedo, donde se observa una extensión de las condiciones secas, pero con anomalías de menor intensidad.

En resumen, los resultados sugieren que la deforestación continua y la expansión agrícola en la región del Chaco Seco están alterando el hidroclima regional. Estos cambios afectan tanto las áreas que presentan cambios de uso de suelo dentro del Chaco Seco, como las zonas que no modificaron su cobertura, tanto dentro del Chaco Seco, como en el Chaco Húmedo. Los cambios en las variables hidroclimáticas conducen, en términos generales, a una reducción de la precipitación, con suelos más secos y condiciones más cálidas durante los meses de veranos. Estos hallazgos enfatizan la falta de sostenibilidad de las prácticas actuales de uso del suelo en el Chaco Seco y resaltan la necesidad de una gestión sostenible del uso del suelo para preservar la integridad ecológica e hidrológica de esta región.

Assessment of the Agricultural Expansion Impacts on the Gran Chaco Hydroclimate

M. Agostina Bracalenti

Advisor: Ernesto Hugo Berbery

Co-Advisor: Omar V. Müller

Abstract

Deforestation in South America is a pressing environmental concern that has persisted for decades, making it one of the most affected regions of the world. The primary drivers of this deforestation are the expansion of agriculture, livestock farming, and illegal logging. One of South America's largest regions, the Gran Chaco, has been witnessing alarming levels of deforestation in recent years. This region is renowned for its remarkable biological diversity, with a wide range of plant and animal species. The Gran Chaco can be divided into two dominant ecoregions: the Humid Chaco and the Dry Chaco. Of these, the Dry Chaco has experienced the most significant deforestation, resulting in severe environmental consequences.

Damages to the environment are not the only outcomes of deforestation. Land Use and Land Cover Changes (LULCCs) impact both soil conditions and the overlying atmosphere by influencing land-atmosphere interactions. This phenomenon is particularly pronounced in southern South America, where strong connections exist between different components of the water cycle through land-atmosphere coupling. When natural vegetation is replaced by pastures, crops, or other types of land use, it leads to changes in biophysical properties related to vegetation, such as albedo, stomatal resistance, and surface roughness. These alterations, in turn, affect ecosystem functioning and surface energy and water fluxes, which consequently bring about modifications in atmospheric fluxes, such as moisture transport.

As a result, LULCCs inevitably lead to changes in the local climate state and can also affect neighboring or distant regions due to shifts in river flow and atmospheric dynamics.

The profound alterations in land use patterns have motivated research to explore the most prevalent Land Use and Land Cover Changes (LULCCs) in the Dry Chaco from 2001 to 2015 and their impacts on the regional climate. The study also examines potential consequences of continued intensive agricultural expansion, encompassing crop and grassland cultivation, in the Dry Chaco. To address the goals of this study, a regional climate model (RCM) was employed. RCMs enable the investigation of the atmospheric response to LULCCs by considering the interplay between land surface and the atmosphere, where they interact through surface fluxes influenced by land cover types. Sensitivity experiments were conducted by modifying the land cover map to simulate various LULCC scenarios. Proper use of RCMs requires a proper spatial resolution, accurate initial and forcing data, and understanding the uncertainties associated with parameterizations of subgrid-scale processes, among others.

To account for land cover changes in the climatic simulations, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land cover maps were incorporated into the Land Surface Model (LSM) coupled with the RCM. These maps, available in geographic lat/lon projection, have been available since 2001 at a suitable spatial resolution for this investigation. The quality of the MODIS product in the study region (also provided in the datasets) was generally high, with confidence values greater than 75% for most of the domain. However, the Dry Chaco region exhibited lower confidence values, though they were still above 71%. Notably, the quality of the MODIS product improved with time, particularly between 2001 and 2015. The MODIS maps revealed that the predominant land cover categories in the Dry Chaco included savanna, woody savanna, forest, grassland, shrubland, and cropland. Over the 2001-2015 period, land cover changes affected 18% of the entire Dry Chaco, with an increase in agricultural coverage that decelerated after 2007, likely due to the implementation of Argentine Law No. 26,331 for the Protection of Native Forests. Thus, most of the observed land cover changes between 2001 and 2015 could be associated with deforestation processes, while the remainder corresponds to changes labeled as "other," which are not linked to deforestation processes (e.g., from pasture to cropland), and changes termed "illogical," which are inconceivable in the real world and may be attributed to errors in the algorithms used to create the maps (e.g., woody savanna to deciduous forests).

Three sets of simulations using the WRF model coupled with Noah-MP LSM were carried out from January 2014 to June 2016 to investigate the effects of LULCCs within the Dry Chaco. The first set used the MODIS land cover map for 2015 (CONTROL), the second set used the map for 2001 (PAST), and the third set employed a modified 2015 map reflecting an expansion of crop and pasture areas (FUTURE). The evaluation of the CONTROL simulation demonstrated that the WRF model performed well, with simulated precipitation closely matching observations in the Gran Chaco. However, there were minor negative biases in the Humid Chaco. Near-surface and root-zone soil moisture also showed good agreement with remotely sensed data in the Gran Chaco, although some drier biases were observed in the Humid Chaco. The model's near-surface temperature had a strong correlation with observations in the Gran Chaco.

The comparison between ensembles focuses on the summer months (DEF, in spanish), during which the hydrological cycle is more active and land-atmosphere interactions are more evident, leading to more noticeable changes due to the prevalence of these interactions in this season. The model simulations indicated that the 2001-2015 heterogeneous LULCCs, with the associated changes in biophysical properties, led to uneven distribution of positive and negative changes in radiation fluxes. This notably affected net radiation, sensible heat flux, and to a lesser extent, latent heat flux. Changes in sensible heat influenced near-surface temperature, causing warming in deforested areas and cooling in areas with other LULCCs. These changes also affected the water cycle, resulting in overall drier conditions in the Dry Chaco. Precipitation exhibited significant changes, with both decreases and increases observed in different areas. Soil moisture followed the pattern of precipitation, displaying net local negative changes. These changes ultimately led to drier summers and increased vulnerability to extreme events in the arid Dry Chaco.

The study further explored the potential consequences of future agricultural expansion in the Dry Chaco, implying a general decrease in Leaf Area Index (LAI) and an increase in albedo at the local level. This expansion would have significant local effects on the energy budget, further reducing net radiation and a weakening of the surface fluxes, which could result in drier conditions, reduced precipitation, soil moisture, evapotranspiration, and runoff. The extensive expansion of agriculture also may affect the neighboring Humid Chaco, extending drier conditions into that region, albeit to a lesser extent.

In summary, the results suggest that ongoing deforestation and agricultural expansion in the Dry Chaco region are altering the regional hydroclimate. These changes impact local, non-local, and remote regions, leading to reduced precipitation and drier, warmer soils during austral summers. While there are uncertainties in the simulations, the findings emphasize the potential unsustainability of current land-use practices in the Dry Chaco, and highlight the need for sustainable land management to preserve the ecological and hydrological integrity of this region.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

La intensiva expansión de la frontera agrícola en los países del sur de Sudamérica (Brasil, Paraguay, Argentina y Uruguay) sufrida en las últimas décadas, se ha visto favorecida por factores naturales, tecnológicos, económicos y socio-culturales. Esta expansión es el resultado de un aumento significativo en los cambios de uso y cobertura del suelo (LULCCs, por sus siglas en inglés), en su mayoría de origen antropogénico (Richards y otros, 2012; De Sy y otros 2015, Stanimirova y otros 2022). El aumento en la precipitación media anual en regiones áridas (Barros y otros 2014, González y otros, 2012, Ferrero y otros 2019), combinado con avances biotecnológicos (Ribichich y otros 2020; Bulacio y otros 2023), fortaleció la adaptabilidad de los cultivos a condiciones climáticas adversas y mejoró la disponibilidad de tierras productivas. Además, la disponibilidad de tierras y mano de obra barata, la falta de regulaciones ambientales o su insuficiente aplicación, y la creciente demanda de alimentos en los nuevos mercados internacionales en las últimas décadas contribuyeron a que la expansión agrícola avanzara sobre la vegetación nativa (Paruelo y otros, 2005; Volante y otros, 2016).

El Gran Chaco, compuesto por el Chaco Seco en el oeste y el Chaco Húmedo en el este, es la mayor extensión continua de bosque seco que queda en América del Sur (Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa, 2010). Esta ecorregión de bosque seco combina todos los factores previos que aumentan la productividad agrícola, lo que lleva a un proceso intensivo de deforestación, predominantemente en la subregión del Chaco Seco (Fehlenberg y otros, 2017; Mosciaro y otros, 2022). Actualmente, solo el 9 % del Gran Chaco está protegido (Nori, 2016), lo que lo expone a la mayor tasa de pérdida de bosque seco en el mundo y posiciona a la región como uno de los principales puntos críticos de deforestación a nivel global (Hansen y otros, 2013). El Gran Chaco experimentó una deforestación de 78.000 km² entre 2001 y 2012, con tasas de deforestación variables, desde aproximadamente 2.900 km² por año durante 2001-2002 hasta aproximadamente 9.200 km² por año durante 2007-2008 (Fehlenberg y otros, 2017). En particular, las tasas de deforestación del bosque seco en la

parte argentina del Gran Chaco en la década de 2000 llegaron a ser hasta tres veces más altas que en la década de 1980 (Piquer-Rodríguez y otros, 2015).

Los LULCCs afectan el estado del suelo y la atmósfera baja a través de la influencia de las condiciones del suelo en las interacciones suelo-atmósfera (Dirmeyer y otros, 2000). Esto es particularmente evidente en el sur de Sudamérica, donde el acoplamiento suelo-atmósfera muestra fuertes relaciones entre los componentes del ciclo del agua (Collini y otros, 2008, Spennemann y Saulo, 2015; Ruscica y otros, 2016; Martínez y otros, 2016; Müller y otros, 2021a). La sustitución de la vegetación natural por pasturas, cultivos u otros tipos de uso del suelo, modifica las propiedades biofísicas relacionadas con la vegetación (albedo, resistencia estomática, rugosidad de la superficie, entre otros), alterando el funcionamiento del ecosistema y los flujos superficiales (Lee y Berbery, 2012; Müller y otros, 2014; Baldi y otros, 2015). Por ejemplo, cuando los cultivos reemplazan a los bosques, la absorción de agua subterránea y la transpiración se reducen debido a la falta de raíces profundas en los cultivos. Este mecanismo aumenta el drenaje profundo, satura la zona vadosa y en algunos casos, la freática aflora en superficie y, por lo tanto, incrementa la probabilidad de ocurrencia de inundaciones o anegamientos (Miguez-Macho y otros, 2007a; Jobbagy y otros, 2008; Martínez y otros, 2016).

En resumen, los cambios en las condiciones del suelo afectan los flujos de energía y agua en la superficie, lo que a su vez modifica los flujos atmosféricos (por ejemplo, el transporte de humedad) (Lee y Berbery, 2012; Mahmood y otros, 2014). Por lo tanto, los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal inevitablemente alteran el estado del clima local, pero también pueden afectar áreas adyacentes o remotas a través de cambios en el caudal de los ríos y la dinámica atmosférica (Mahmood y otros, 2010).

Una forma adecuada de investigar exhaustivamente el impacto de los LULCCs en el clima regional es mediante el uso de simulaciones de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés). Si bien existen recientes avances en modelización atmosférica mediante el uso de big data e inteligencia artificial (IA) (ej., Dueben y Bauer 2018; Molina y otros 2023; y referencias incluidas en ellos), la utilidad de esas técnicas se limita a tareas específicas (ej. selección de la parametrización Gettelman y otros 2021). Además, no son las herramientas adecuadas para estudios sobre procesos físicos, debido a su naturaleza estadística/estocástica. Por el contrario los modelos climáticos están completamente basados en leyes físicas y dinámicas, que permiten una evaluación basada en procesos, crucial para

entender y predecir el comportamiento del clima de manera integral. Los modelos constan de dos componentes principales, el suelo y la atmósfera, que interactúan en cada paso de tiempo a través de los flujos en superficie, lo que permite la retroalimentación entre la atmósfera y el suelo, descubriendo así la respuesta atmosférica a los LULCC.

En los RCMs, el tipo de cobertura o uso de suelo en cada punto, y sus correspondientes propiedades biofísicas asociadas, son preestablecidas en el modelo de suelo (LSM, por su sigla en inglés), que es el componente de suelo de los RCMs. Esta característica impide que el LSM simule los cambios en el uso del suelo y la cobertura del suelo en curso o dinámicamente (Maertens y otros, 2021). Sin embargo, es posible realizar experimentos de sensibilidad actualizando el mapa de cobertura del suelo para simular el impacto de los LULCC observados en el hidroclima regional (por ejemplo, Lal y otros 2021), o modificando artificialmente la cobertura del suelo para simular posibles escenarios de LULCC y sus impactos potenciales (por ejemplo, Lee y Berbery 2012, Georgescu y otros 2013, Flanagan y otros 2021).

Estudios previos han abordado en parte el impacto de la deforestación utilizando modelos climáticos (Lee, 2010; Lee y Berbery, 2012; Lee y otros, 2013a,b; Müller y otros 2014, Müller, 2015; Müller y otros 2016). En estas investigaciones se identifica que los cambios de cobertura en el sudeste de Sudamérica tienen un efecto sobre el funcionamiento ecosistémico que modifica las condiciones en superficie. No obstante, estos trabajos tienen un alcance temporal limitado, a la vez que consideran cambios extremos de cobertura.

Esta tesis busca avanzar sobre aspectos no resueltos en las investigaciones mencionadas. En particular, esta investigación busca abordar los siguientes interrogantes: ¿Cómo alteran los LULCC en el Chaco Seco los procesos de superficie a nivel local?, y ¿cuáles son los efectos locales y no locales de los LULCC en el Gran Chaco? Para responder a estas preguntas, se adopta una metodología integral de tres pasos. Primero, se evalúan los LULCC dominantes en el Chaco Seco durante el siglo actual utilizando información satelital de última generación (el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS). Segundo, se analizan los efectos locales de los LULCC actuales en el Chaco Seco mediante la evaluación de simulaciones realizadas para el mismo período, pero utilizando mapas de cobertura del suelo de diferentes años obtenidos con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Tercero, se investigan los efectos remotos de los LULCC en el Chaco Húmedo analizando simulaciones del modelo WRF que asumen una expansión progresiva de la frontera agrícola

en el Chaco Seco. De esta manera, este estudio considera tanto expansiones observadas como realistas de los LULCC, ofreciendo una comprensión matizada de los impactos reales y potenciales en el clima regional. Al considerar escenarios más realistas, es posible hipotetizar cómo la expansión agrícola en una región influye en el hidroclima de otra, aspecto crucial para una planificación efectiva del ordenamiento territorial, un tema propenso a desarrollar conflictos socio-ecológicos. El enfoque propuesto para explorar y descubrir los procesos físicos que explican los efectos remotos de los LULCCs es un área relativamente inexplorado en la literatura existente.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es investigar el impacto hidroclimático local y remoto de los cambios en el uso del suelo en el Chaco Seco mediante simulaciones con modelos climáticos acoplados, buscando comprender los efectos de la expansión agrícola sobre el clima regional del Gran Chaco y proveer información que contribuya a la toma de decisiones sobre ordenamiento territorial.

Los objetivos específicos que contribuyen a alcanzar el objetivo general de esta tesis son:

- Evaluar los LULCCs dominantes en el Chaco Seco durante el siglo actual utilizando información satelital de última generación.
- Analizar los efectos hidroclimáticos locales y no locales de los LULCCs dentro del Chaco Seco mediante la evaluación de simulaciones de RCM para un período común.
- Investigar los efectos hidroclimáticos remotos de los LULCCs en el Chaco Húmedo, mediante el análisis de simulaciones de RCM que asumen una expansión progresiva e intensiva de la frontera agrícola dentro del Chaco Seco.

1.3 Descripción de los capítulos

Esta tesis está organizada en seis capítulos. El Capítulo 1 introduce el problema asociado a los LULCCs en Sudamérica, particularmente en la región del Gran Chaco y se especifican los objetivos de esta investigación. El Capítulo 2 describe el RCM utilizado en este estudio,

incluyendo las ecuaciones de gobierno, las parametrizaciones, y fundamentalmente, la representación actual de la vegetación en la componente de suelo del RCM. Además, se presenta la información de cobertura vegetal obtenida por teledetección y cómo la misma se adapta al LSM. El Capítulo 3 caracteriza la región de interés, detalla la configuración del RCM, explica el diseño experimental y evalúa el rendimiento de las simulaciones de control. El Capítulo 4 analiza los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal experimentados en el Chaco Seco y describe los escenarios de cobertura de suelo propuestos. El Capítulo 5 presenta el análisis de las respuestas del modelo a diferentes escenarios de LULCCs. Finalmente, la discusión y las conclusiones se presentan en el Capítulo 6.

Capítulo 2: El modelo climático regional

2.1 Introducción al capítulo

La herramienta principal para abordar los objetivos planteados es el modelo climático WRF. A lo largo del presente capítulo se detallan las principales características conceptuales del mismo especificando las ecuaciones de gobierno y describiendo las categorías de parametrizaciones físicas disponibles más relevantes para esta investigación. Además, se justifica la elección del modelo de suelo acoplado y se explican las principales ecuaciones utilizadas por el mismo relacionadas con la termodinámica, la hidrología, la dinámica de la vegetación y se especifican las opciones de representación de la cobertura de suelo disponibles. Finalmente se analiza la calidad del producto satelital seleccionado para representar la cobertura terrestre para la región de estudio.

2.2 Descripción del modelo WRF

WRF es un modelo climático regional que comenzó a desarrollarse a fines de la década de 1990 como un esfuerzo colaborativo entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (representada por los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Earth System Research Laboratory), la U.S. Air Force, el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA). WRF fue diseñado para satisfacer las necesidades tanto de la investigación atmosférica como de la predicción del tiempo. El modelo es utilizado en una amplia gama de aplicaciones meteorológicas y climáticas en escalas espaciales que van desde decenas de metros hasta miles de kilómetros. Estas aplicaciones incluyen la predicción numérica en tiempo real, estudios de asimilación de datos y desarrollo, investigación en parametrizaciones físicas, simulaciones de clima regional, modelado de calidad del aire, acoplamiento suelo-atmósfera y atmósfera-océano y simulaciones idealizadas. Para obtener más información sobre el WRF, consultar los trabajos de Michalakes y otros (2004), Skamarock y otros (2008), o visitar su sitio web (www.wrf-model.org).

A diferencia de otros modelos, WRF se desarrolla como un modelo de código abierto, con la contribución de una amplia comunidad de expertos que aportan a cada uno de sus componentes específicos. No obstante, su distribución se centraliza en el NCAR, evitando los riesgos del desarrollo paralelo y garantizando que todas las partes del modelo estén adecuadamente enlazadas. Además, el NCAR ofrece documentación actualizada, talleres regulares, tutoriales y soporte en el tema. Debido a esto, cuenta con una gran comunidad de usuarios registrados en todo el mundo que lo utilizan con diversos propósitos, ya sea operativos, de investigación o docencia.

Desde un punto de vista técnico, el modelo WRF cuenta con un marco integral que abarca una serie de componentes esenciales. Estos componentes incluyen resolutores dinámicos, paquetes de física que interactúan con los resolutores, programas de inicialización, WRF-Var y WRF-Chem. Los resolutores dinámicos se encargan de definir parámetros de difusión, atenuación (damping) y advección. Los paquetes de física realizan el preprocesamiento físico del modelo y el postprocesamiento físico de las tendencias. Durante el preprocesamiento físico, se llenan matrices con variables requeridas por la parte física del modelo (temperatura, presión y otras variables de estado). Luego, el paquete de física calcula las tendencias para las componentes de la velocidad, la temperatura potencial y los campos de humedad. Posteriormente, durante el post-procesamiento físico, que depende del resolutor dinámico, se reconfigurarán las tendencias calculadas según sea necesario, se integran con métricas de coordenadas y se transforman en variables o unidades adecuadas para el resolutor dinámico. Dentro de las variantes ofrecidas por WRF, se tiene el WRF-Var que se utiliza como un sistema de asimilación de datos y el WRF-Chem, que simula los procesos químicos en la atmósfera. No obstante, WRF-Var y WRF-Chem no son utilizados en esta investigación.

Existen dos opciones para el resolutor dinámico en el modelo WRF: el Advanced Research WRF (ARW) y el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). Estos resolutores establecen dos modelos distintos, conocidos como WRF-ARW y WRF-NMM. Ambos difieren en el resolutor dinámico, pero comparten los demás componentes. En esta investigación, se utiliza la versión 3.9 del WRF-ARW (en adelante, referido simplemente como WRF). La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo del sistema de modelado para la versión 3.9 del WRF. Las componentes en color destacan las utilizadas en esta investigación, mientras que las casillas grises representan opciones disponibles en el sistema de modelado, pero que no se utilizaron para la investigación actual.

Como se muestra en el diagrama, el sistema de modelado WRF consta de dos programas principales:

- Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS, por su sigla en inglés): Sus funciones incluyen: (1) definir los dominios de simulación; (2) interpolar datos terrestres (como topografía, uso y tipo de suelo) al dominio de simulación; y (3) interpolar datos meteorológicos (forzantes) al dominio de simulación.
- Resolutor ARW: Este es el componente clave del sistema de modelado, que se compone de varios programas de inicialización para simulaciones idealizadas y con datos reales, y el programa de integración numérica. Las características clave del modelo WRF incluyen herramientas de postprocesamiento y visualización: Se admiten varios programas, incluido ARW-post, que es un programa de conversión para paquetes gráficos específicos para información climática como GrADS.

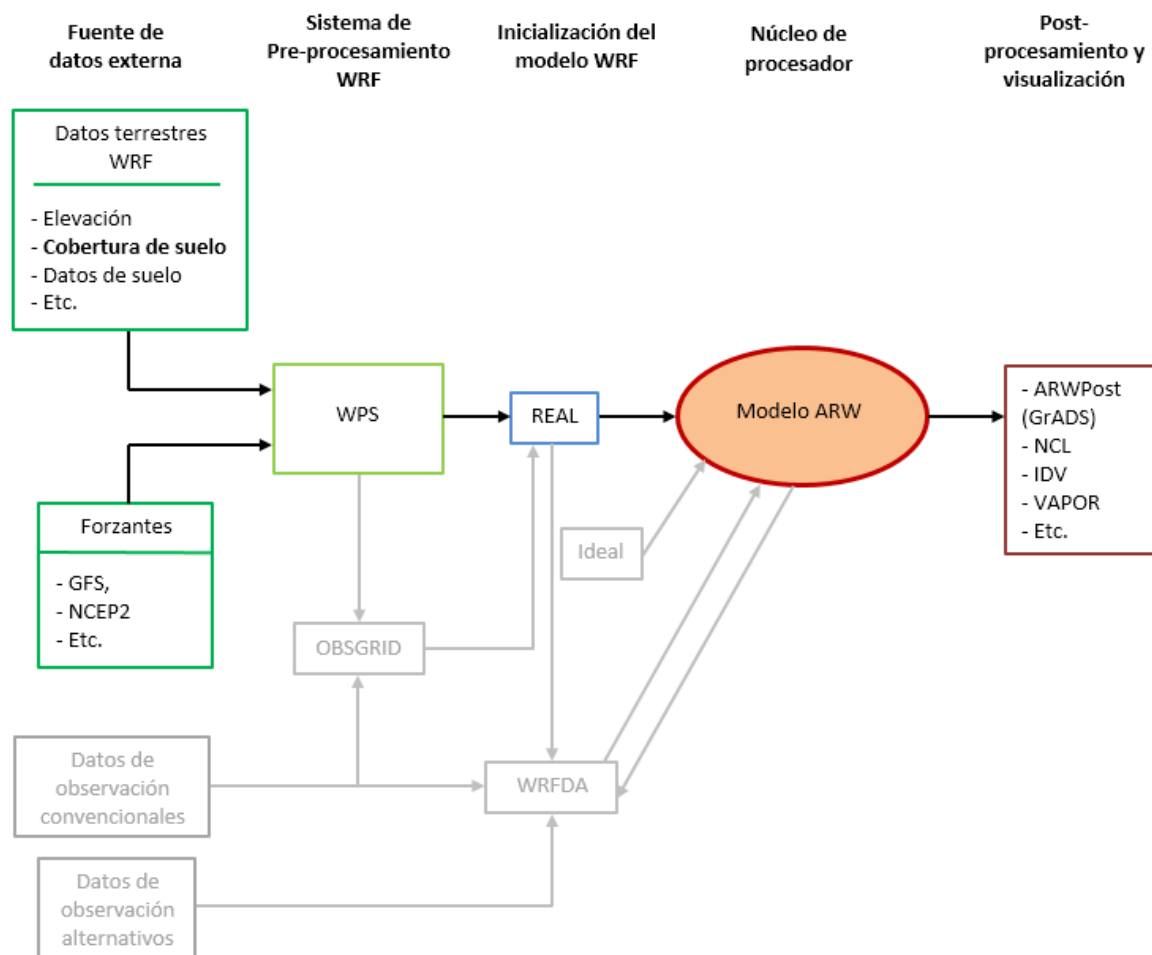


Figura 2.1 Diagrama de flujo del modelo WRF utilizado en esta investigación. La figura se basa en el diagrama de flujo general presentada en la “ARW Users Guide V3.9”.

2.3 Ecuaciones de gobierno

Los movimientos atmosféricos están gobernados por tres principios físicos fundamentales: la conservación de la masa, la conservación del momento y la conservación de la energía (Holton y otros, 2004). De esta manera, las ecuaciones básicas que gobiernan la atmósfera se pueden formular como un sistema de siete ecuaciones diferenciales no lineales con siete incógnitas: las tres componentes de la velocidad (u, v, w), la presión p , la temperatura T , la humedad específica q y la densidad ρ . Para resolver este sistema, es necesario especificar las condiciones de borde que describen las interacciones entre la atmósfera y los demás componentes del sistema climático (Goosse y otros, 2010). Las ecuaciones que expresan el sistema en su forma más general son:

- Conservación de momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}\rho - \vec{g} + \vec{F}_{fric} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} \quad 2.1$$

donde $\vec{g}$ es el vector de gravedad, $\vec{F}_{fric}$ es la fuerza debida a la fricción, $\vec{\Omega}$ es el vector de velocidad angular de la Tierra (el último término es la fuerza de Coriolis), y $\frac{d}{dt}$ es la derivada total, incluyendo el término de transporte:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \quad 2.2$$

- Conservación de masa o ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \quad 2.3$$

- Conservación de la masa del vapor de agua:

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} q) + \rho(E - C) \quad 2.4$$

donde E y C son evaporación y condensación respectivamente.

- Conservación de energía:

$$Q = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad 2.5$$

donde Q es la tasa de calentamiento por unidad de masa y C_p es el calor específico.

- La ecuación de estado:

$$p = \rho R_g T \quad 2.6$$

Este sistema de ecuaciones puede presentar diversas formas, pero siempre consta de siete ecuaciones con siete variables. Las ecuaciones más generales se presentaron aquí, pero el informe técnico del resolutor dinámico ARW del WRF (Skamarock y otros, 2008) expresa el sistema de ecuaciones se establece en forma de flujo, es decir, utilizando una coordenada vertical de masa que sigue la elevación del terreno, siguiendo la filosofía de Ooyama (1990).

2.4 Parametrización del modelo climático

El modelo WRF tiene varias categorías de parametrizaciones relacionadas con la física, cada una de las cuales ofrece una variedad de opciones que van desde simples y eficientes hasta sofisticadas y computacionalmente costosas. Entre las categorías de parametrizaciones físicas, las más relevantes para esta investigación son:

- Modelo de suelo: Los LSM utilizan información atmosférica del esquema de capa superficial, forzamiento radiativo del esquema de radiación, y forzamiento de precipitación de los esquemas de microfísica y convección, junto con información interna sobre las variables de estado del suelo y las propiedades de la superficie terrestre, para proporcionar flujos de calor y humedad sobre puntos terrestres y puntos de hielo marino. Estos flujos proporcionan una condición de borde para el transporte vertical estimado en los esquemas de capa límite planetaria. Los modelos de suelo tienen diversos grados de sofisticación, es decir, desde modelos que discretizan el suelo en pocas capas, hasta LSM capaces de simular transportes de calor y agua en múltiples capas del suelo y vegetación dinámica. El objetivo principal del LSM es actualizar el estado de las variables suelo (ej. perfil de temperatura y humedad). Vale destacar que no hay interacción horizontal entre puntos vecinos en

el LSM, por lo que se puede considerar como un modelo de columna unidimensional para cada punto del dominio. El tipo de cobertura cumple un rol fundamental en los LSM, ya que las propiedades biofísicas como la profundidad de las raíces, índice de área foliar (LAI, por su sigla en inglés), albedo, emisividad, tienen un impacto directo en el cálculo de los flujos de humedad y energía en el suelo.

- **Radiación Atmosférica:** Los esquemas de radiación proporcionan el calentamiento atmosférico debido a la divergencia de flujo radiativo y la radiación entrante de onda larga y onda corta para el balance de energía en el suelo. La radiación de onda corta tiene como única fuente al Sol, pero los procesos incluyen absorción, reflexión y dispersión en la atmósfera y en la superficie. El flujo saliente es la reflexión causada por el albedo de la superficie. La radiación de onda larga incluye la radiación térmica absorbida y emitida por gases y superficies. El flujo radiativo de onda larga ascendente está determinado por la emisividad de la superficie, que depende del tipo de cobertura del suelo, así como de la temperatura de la superficie del suelo. Así, la radiación atmosférica está estrechamente relacionada con el tipo de cobertura, ya que este determina los valores de albedo y emisividad utilizados en el balance de energía en superficie.
- **Capa Superficial:** Los esquemas de capa superficial calculan velocidades de fricción y coeficientes de intercambio que permiten el cálculo de flujos de calor y humedad en la superficie a través de los LSM, así como la tensión superficial en el esquema de capa límite planetaria (PBL, por su sigla en inglés). Una vez más, estos esquemas utilizan propiedades físicas asociadas con cada tipo de cobertura, como parámetros utilizados en la función de estrés del dosel por radiación, parámetros de la función de déficit de presión de vapor, la máxima y mínima rugosidad a lo largo del año, entre otros.
- **Capa Límite Planetaria:** La PBL es responsable de los flujos verticales a nivel subcelda (subgrid) debido a los flujos turbulentos en la columna atmosférica. Cuando se activa un esquema de PBL, la difusión vertical explícita se desactiva y el esquema de PBL se encarga de este proceso. Los flujos en la superficie son proporcionados por la capa superficial. Los esquemas de PBL determinan los perfiles de flujos dentro de la capa límite, y, por lo tanto, proporcionan tendencias atmosféricas de temperatura, humedad y momento horizontal en toda la columna atmosférica. Para

determinar correctamente estos perfiles de flujos, las propiedades biofísicas asociadas a la vegetación son esenciales.

Aunque estas parametrizaciones físicas del modelo se presentan de manera individual, es evidente que existen numerosas interacciones entre ellas a través de las variables de estado del modelo (temperatura potencial, humedad, viento, etc.) y sus tendencias, así como también a través de los flujos en la superficie (radiación de onda corta/onda larga, flujos de calor/humedad, etc.). Es importante destacar que las características biofísicas de la cobertura del suelo están directa o indirectamente implicadas en todas las parametrizaciones mencionadas anteriormente. Esta información sobre la vegetación afecta directamente a la capa superficial, donde las velocidades de fricción fluctúan en función de la rugosidad de la superficie, y a la radiación atmosférica, que se ve influenciada por la emisividad y el albedo. Además, los flujos de calor y humedad en la superficie también dependen de estas propiedades, estableciendo así una relación indirecta entre la PBL y la parametrización de convección de cúmulos que determina la precipitación. En la sección 3.3 se proporciona una lista completa de las parametrizaciones seleccionadas en esta investigación. En la siguiente sección se profundiza sobre el funcionamiento general del LSM seleccionado.

2.5 Modelo de suelo Noah-MP

Entre los LSMs disponibles en el modelo WRF, para este trabajo se ha seleccionado Noah-MP. Este LSM es un modelo de complejidad intermedia a alta (dependiendo de las categorías de parametrizaciones relacionadas con la física que se seleccionen) y está acoplado al modelo atmosférico del WRF. Noah-MP ofrece una relación costo/beneficio (costo computacional/calidad de simulación) que lo posiciona como la óptima elección para simular el clima de una región bajo diferentes escenarios de uso del suelo. Noah-MP es una versión mejorada del LSM Noah (Chen y otros, 1996; Chen and Dudhia, 2001), donde se incorporan múltiples opciones para la parametrización de procesos físicos. Noah-MP fue desarrollado por Niu y otros (2011) y Yang y otros (2011).

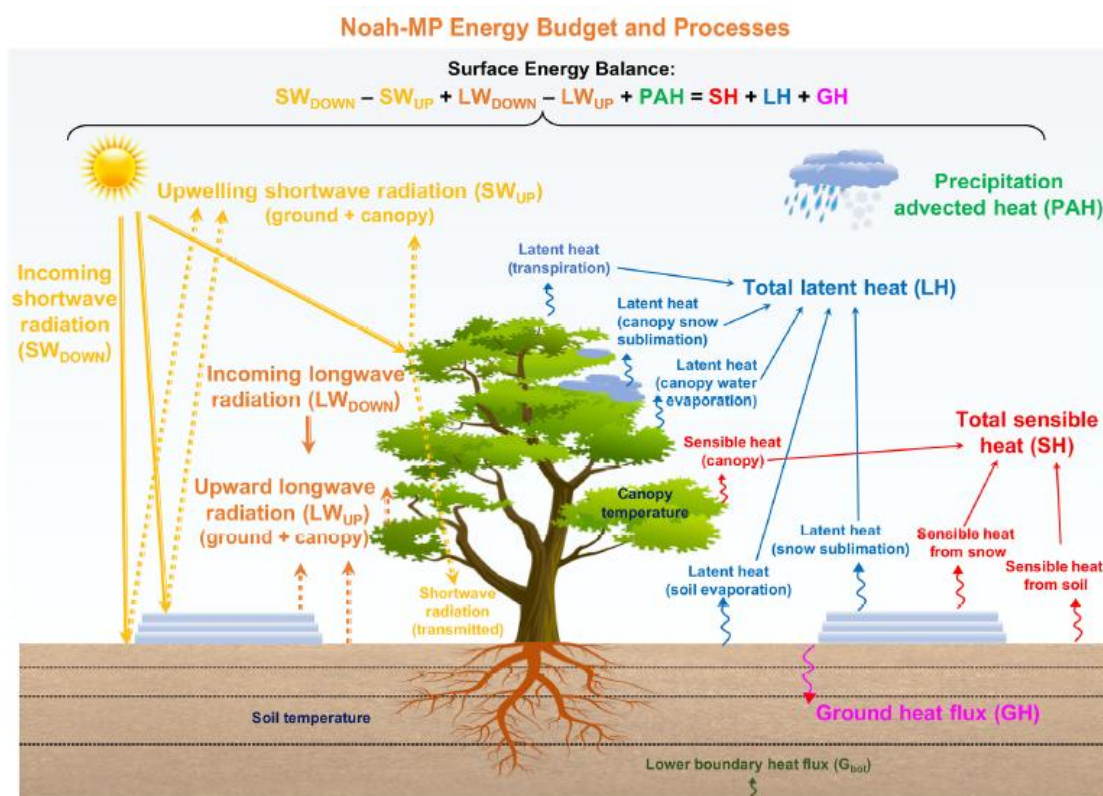


Figura 2.2 Diagrama esquemático del balance de energía y procesos relacionados en Noah-MP versión 5.0. (He y otros, 2023).

Noah-MP cuenta con cuatro capas de suelo con un espesor de arriba hacia abajo de 10, 30, 60 y 100 cm (un total de 2 metros de profundidad). El LSM incluye representación de la zona de raíces, categorías de vegetación, textura del suelo, entre otros. Simula la humedad del suelo, la temperatura del suelo, la temperatura superficial, el contenido de agua en el canopeo y los términos del flujo de agua y energía de sus correspondientes balances en superficie.

En Noah-MP, se disponen de diferentes opciones de esquemas para varios procesos físicos que son clave en la interacción suelo-atmósfera. Estos procesos son: vegetación dinámica; resistencia estomática; factor de humedad del suelo que controla la resistencia estomática, factor b; escorrentía y aguas subterráneas; coeficiente de intercambio en la superficie para el calor, C_H ; entre otros. El Apéndice A describe brevemente estas diferentes opciones disponibles en Noah-MP. Para obtener más detalles sobre las parametrizaciones físicas del modelo consultar la documentación provista en Niu y otros (2011).

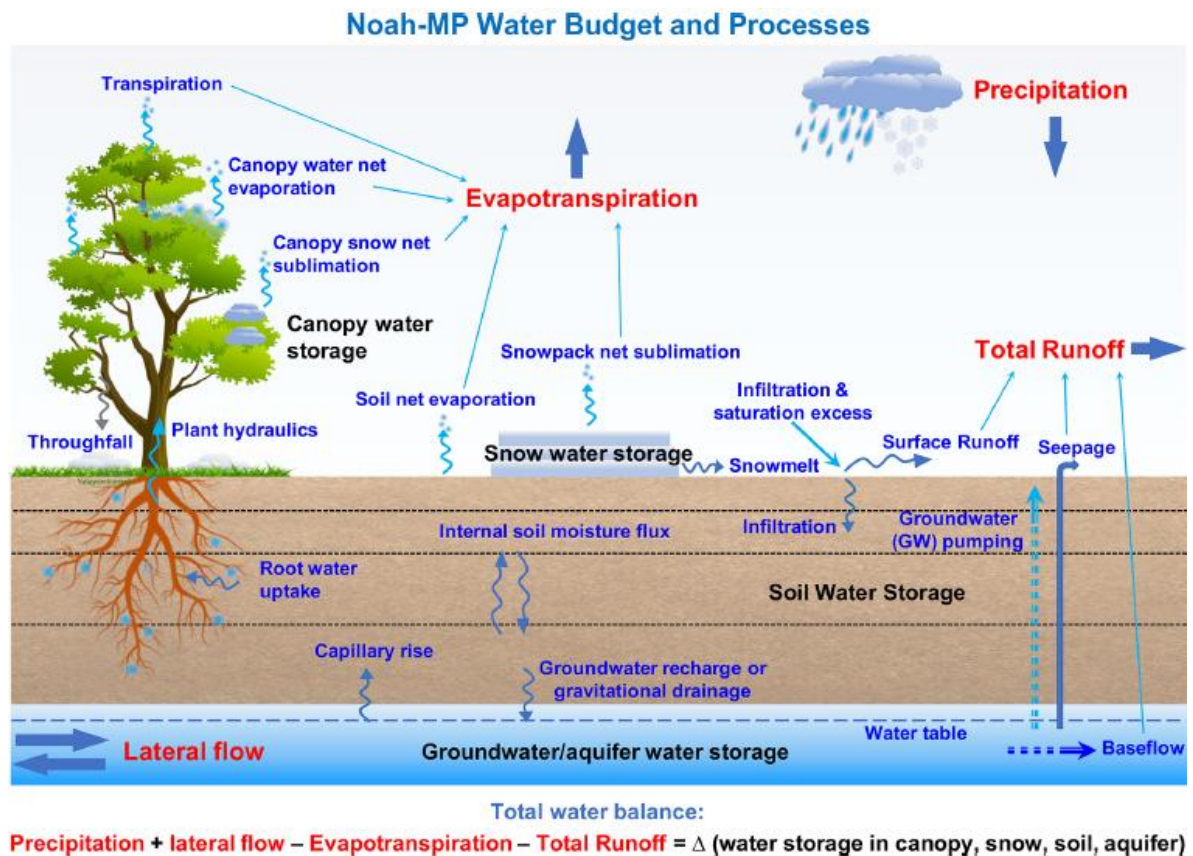


Figura 2.3 Diagrama esquemático del balance hídrico y procesos asociados en Noah-MP versión 5.0. (He y otros, 2023).

Si bien es sabido que la profundidad de la napa freática y zona de raíces en partes del Gran Chaco es mucho mayor a los 2m que suman las cuatro capas con las que cuenta Noah-MP, es preciso tener en cuenta que los modelos de suelo diseñados para simular a mucha profundidad están pensados para aplicaciones hidrológicas y, al menos hasta ahora, no están diseñados para ser acoplados a modelos atmosféricos y formar parte de un modelo climático. Los LSMs típicamente utilizados en modelos climáticos regionales y globales son una representación simplificada de la realidad, y una de esas simplificaciones viene dada por la capacidad de representar los procesos como infiltración, percolación, ascenso capilar, entre otros, sólo en los primeros metros de profundidad del suelo (típicamente 2 a 3m según el modelo). Por otro lado, se debe tener en cuenta que un determinado LSM simule a mayor profundidad no necesariamente implica simulaciones más realistas, dado que hay muchas otras características que influyen en la capacidad de simulación, como por ejemplo la representación de la vegetación, la representación del tipo de suelo y sus propiedades, la complejidad de los procesos simulados, etc.

En el caso particular de Noah-MP por debajo de los 2m de profundidad se simula un acuífero donde el nivel freático asciende o desciende dependiendo de la recarga desde la columna de suelo (más detalles en la sección 2.5.1). Este modelo de suelo se destaca, entre las opciones disponibles en WRF, por su combinación óptima entre capacidad de simulación y su base física, motivando su elección para ser utilizado operacionalmente en los modelos de pronóstico regional de la NOAA (del inglés, National Oceanic and Atmospheric Administration), además de su uso para investigación en variadas publicaciones.

2.5.1 Ecuaciones del modelo Noah-MP

Las ecuaciones del modelo se pueden agrupar en: termodinámica, hidrología, dinámica de la vegetación, nieve y hielo marino. Aquí se focalizará sobre las tres primeras, que resultan relevantes para esta investigación.

La *termodinámica del modelo* determina el balance de energía en la superficie al separar la capa del dosel de la superficie del suelo, y mediante el uso de un esquema de mosaicos (semitile) a escala de subgrilla para representar la heterogeneidad de la superficie (Figura 2.4). Dentro de este esquema, se calcula la transferencia de radiación de onda corta en toda la celda, considerando las probabilidades de brechas espaciales sin vegetación (Figura 2.4 derecha). Por otro lado, la radiación de onda larga, el calor latente, el calor sensible y los flujos de calor del suelo, se calculan de manera independiente en dos áreas distintas: con vegetación (F_{veg}) y con suelo desnudo ($1 - F_{veg}$) (ver Figura 2.4 izquierda).

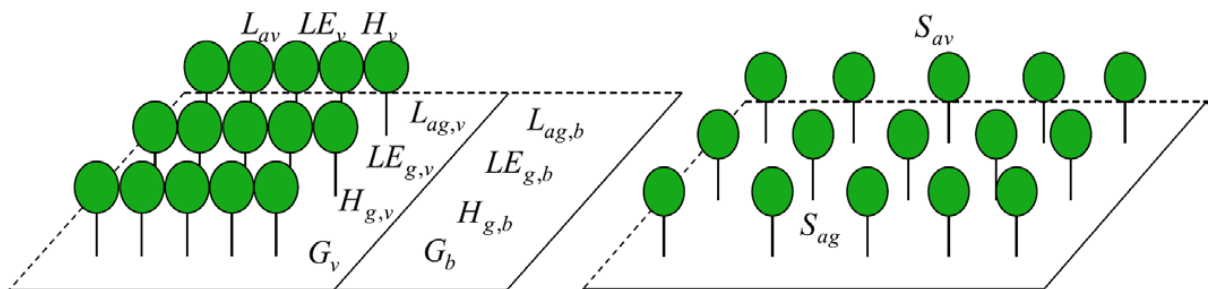


Figura 2.4 Diagrama esquemático del esquema de subgrilla. (Izquierda) Flujos de onda larga neta (L_a), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor del suelo (G), se calculan por separado para los mosaicos de suelo desnudo (subíndice “b”) y con vegetación (subíndice “v”), mientras que los flujos de radiación de onda corta (Derecha) (S_{av} y S_{ag}) se calculan en toda la celda de la cuadrícula considerando las probabilidades de brecha espacial.

Fuente: Niu y otros, 2011.

La radiación solar absorbida por el canopeo a lo largo de una celda de grilla (S_{av}) calienta el canopeo del área vegetada (F_{veg}). Posteriormente, el canopeo emite radiación de onda larga a la atmósfera y realiza intercambios de calor latente (LE_v) y calor sensible (H_v) con el aire del canopeo a una temperatura (T_v) satisfaciendo el siguiente balance de energía:

$$S_{av} = F_{veg} \cdot (L_{av}(T_v) + LE_v(T_v) + H_v(T_v)) \quad 2.7$$

donde L_{av} es la radiación de onda larga neta (positiva hacia arriba) absorbida por el dosel de vegetación, y LE_v incluye los flujos de calor latente provenientes de la transpiración a través de los estomas y la evaporación del agua interceptada por el canopeo.

La radiación solar absorbida por el suelo en la celda (S_{ag}) se distribuye entre el suelo vegetado con una cantidad de $S_{ag} \cdot F_{veg}$ y el suelo desnudo con una cantidad de $S_{ag} \cdot (1 - F_{veg})$. El suelo vegetado emite radiación de onda larga hacia el dosel y participa en el intercambio de flujos de calor latente ($LE_{g,v}$) y calor sensible ($H_{g,v}$) con el aire del canopeo. A su vez intercambia calor del suelo con la capa superior del suelo (G_v) a una temperatura ($T_{g,v}$), cerrando el balance de energía:

$$F_{veg} \cdot S_{av} = F_{veg} \cdot (L_{ag,v}(T_{g,v}) + LE_{g,v}(T_{g,v}) + H_{g,v}(T_{g,v}) + G_v(T_{g,v})) \quad 2.8$$

donde $L_{ag,v}$ es la radiación de onda larga neta (positiva hacia arriba) absorbida por el suelo vegetado. De manera análoga, la fracción de suelo desnudo, $1 - F_{veg}$, emite radiación de onda larga hacia la atmósfera y realiza intercambios de calor latente ($LE_{g,b}$) y calor sensible ($H_{g,b}$) con la atmósfera a una temperatura $T_{g,b}$ que satisface el equilibrio de energía:

$$(1 - F_{veg}) \cdot S_{ag} = (1 - F_{veg}) \cdot (L_{ag,b}(T_{g,b}) + LE_{g,b}(T_{g,b}) + H_{g,b}(T_{g,b}) + G_b(T_{g,b})) \quad 2.9$$

donde $L_{ag,b}$ es la radiación de onda larga neta (positiva hacia arriba) absorbida por la fracción de suelo desnudo, y G_b es el flujo de calor del suelo en la fracción de suelo desnudo.

Los flujos de radiación de onda larga neta (L_a), calor latente (LE), calor sensible (H) y calor del suelo (G) de una celda de la grilla del modelo son, respectivamente,

$$\begin{aligned}
L_a &= (1 - F_{veg}) \cdot L_{ag,b} + F_{veg} \cdot (L_{av} + L_{ag,v}) \\
LE &= (1 - F_{veg}) \cdot LE_{g,b} + F_{veg} \cdot (LE_v + LE_{g,v}) \\
H &= (1 - F_{veg}) \cdot H_{g,b} + F_{veg} \cdot (H_v + H_{g,v}) \\
G &= (1 - F_{veg}) \cdot G_b + F_{veg} \cdot G_v
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Finalmente, la ecuación del balance de energía en la superficie sobre una celda de la grilla es:

$$S_{av} + S_{ag} = L_a + LE + H + G \tag{2.11}$$

La *hidrología del modelo* incluye un acuífero no confinado por debajo de los 2 metros de profundidad de la columna de suelo, con el objetivo de tener en cuenta la interacción del agua entre el suelo y el acuífero (Figura 2.5).

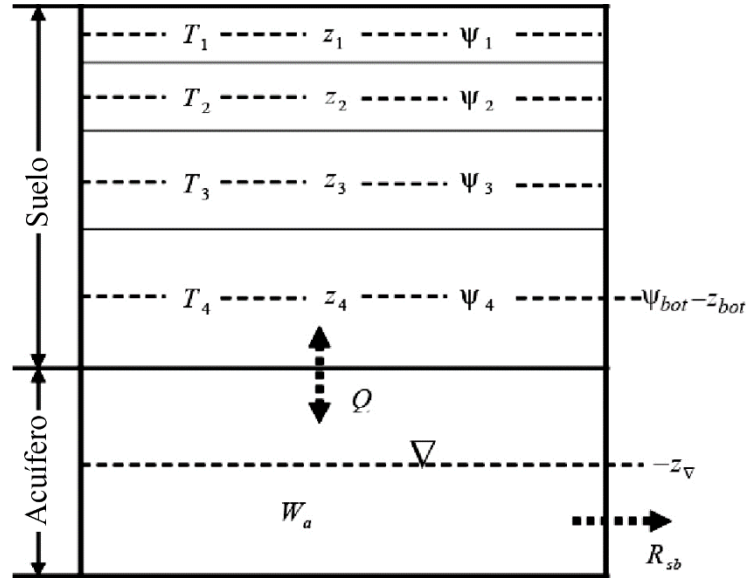


Figura 2.5 Diagrama esquemático de la representación de las capas de suelo y acuífero en Noah-MP. Los índices para las capas de suelo desde arriba son 1, 2, 3 y 4. Las variables se describen en detalle en el texto. Fuente: adaptado de Niu y otros, 2011.

De acuerdo con Niu y otros (2007), el cambio en el almacenamiento de agua en el acuífero con el tiempo se determina por la diferencia entre la tasa de recarga, Q , y la tasa de descarga (flujo base o escorrentía subterránea), R_{sb} . La parametrización de Q sigue la ley de Darcy y se considera positiva cuando el agua entra en el acuífero:

$$Q = -K_{bot} \frac{-z\nabla - (f_{mic} \psi_{bot} - z_{bot})}{z\nabla - z_{bot}} \quad 2.12$$

donde $z\nabla$ es la profundidad del nivel freático; ψ_{bot} y K_{bot} son el potencial matricial y la conductividad hidráulica de la capa de suelo inferior, respectivamente; z_{bot} (1.5 m en Noah) es el punto medio de la capa de suelo inferior y f_{mic} es la fracción de contenido de microporos en la capa inferior del suelo, que limita el flujo hacia arriba (dependiendo del nivel de estructura del suelo).

Luego, se emplea un modelo de escorrentía basado en TOPMODEL (Niu y otros, 2005) para calcular la escorrentía superficial y subterránea, que se parametrizan como funciones exponenciales de la profundidad del nivel freático. La escorrentía superficial es el agua (suma de la lluvia, el rocío y el deshielo) que incide en el área fraccional saturada de una celda (F_{sat}), que se parametriza de la siguiente manera:

$$F_{sat} = (1 - F_{frz}) F_{m\acute{a}x} e^{-0.5 f (z\nabla - z_{bot})} + F_{frz} \quad 2.13$$

donde $F_{m\acute{a}x}$ es la suma de áreas bajas fraccionales donde la superficie de la tierra está inundada de agua cuando la profundidad media del nivel freático de la celda de la cuadrícula es cero, F_{frz} es un área fraccional impermeable como función del contenido de hielo en la capa de suelo superficial (Niu y Yang, 2006), y f es el factor de decaimiento de la escorrentía.

La tasa de descarga subterránea (flujo base) se estima de la siguiente manera:

$$R_{sb} = R_{sb,m\acute{a}x} e^{-\Lambda - f(z\nabla - z_{bot})} \quad 2.14$$

donde $R_{sb,m\acute{a}x}$ es la máxima escorrentía subterránea cuando la profundidad del nivel freático es cero y Λ es el índice de humedad medio de la celda.

La *dinámica de la vegetación* incluye el modelo de hoja dinámica de Dickinson y otros, (1998) que describe el almacenamiento de carbono para varios componentes de la vegetación (hoja, madera y raíz) y los depósitos de carbono del suelo (rápido y lento), y una ecuación de balance de carbono del tallo para simular plantas donde el tallo predomina en su estructura (por ejemplo, maíz) (Yang y Niu, 2003). Este modelo tiene en cuenta procesos que incluyen

la asimilación de carbono a través de la fotosíntesis, la asignación del carbono asimilado a varios sumideros (hoja, tronco/tallo, madera, raíz y suelo), y la respiración de cada uno de estos depósitos. La masa de carbono de la hoja, C_{leaf} ($g\ m^{-2}$) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C_{leaf}}{\partial t} = F_{leaf} A - (S_{cd} + T_{leaf} + R_{leaf}) C_{leaf} \quad 2.15$$

donde A es la tasa total de asimilación de carbono de las hojas iluminadas por el sol y sombreadas ($g\ m^{-2}\ s^{-1}$), F_{leaf} es la fracción del carbono asimilado asignado a las hojas y se parametriza como una función del índice de área foliar (LAI):

$$F_{leaf} = e^{(0.01\ LAI\ (1 - e^{(\chi\ LAI)}))} \quad 2.16$$

donde χ es un parámetro dependiente del tipo de vegetación (Gulden y otros, 2007). Durante las primeras etapas de la temporada de crecimiento, cuando el LAI es bajo, esta formulación conduce a una proporción más alta del carbono asimilado asignado a las hojas en comparación con el enfoque empleado por Dickinson y otros (1998). S_{cd} es la tasa de mortalidad debido al frío y al estrés por sequía, y T_{leaf} es la tasa de recambio de hojas debido a la senescencia, herbivoría o pérdida mecánica (ver Dickinson y otros, 1998). R_{leaf} es la tasa de respiración de las hojas, que incluye la respiración de mantenimiento y de crecimiento (Bonan, 1996). El LAI se convierte en un parámetro dependiente del tipo de vegetación y la fracción de vegetación verde (F_{veg}), a partir del C_{leaf} utilizando el área foliar específica ($m^2\ g^{-1}$). Así F_{veg} se define como:

$$F_{veg} = 1 - e^{(-0.52\ LAI)} \quad 2.17$$

2.5.2 Representación de la cobertura del suelo en Noah-MP

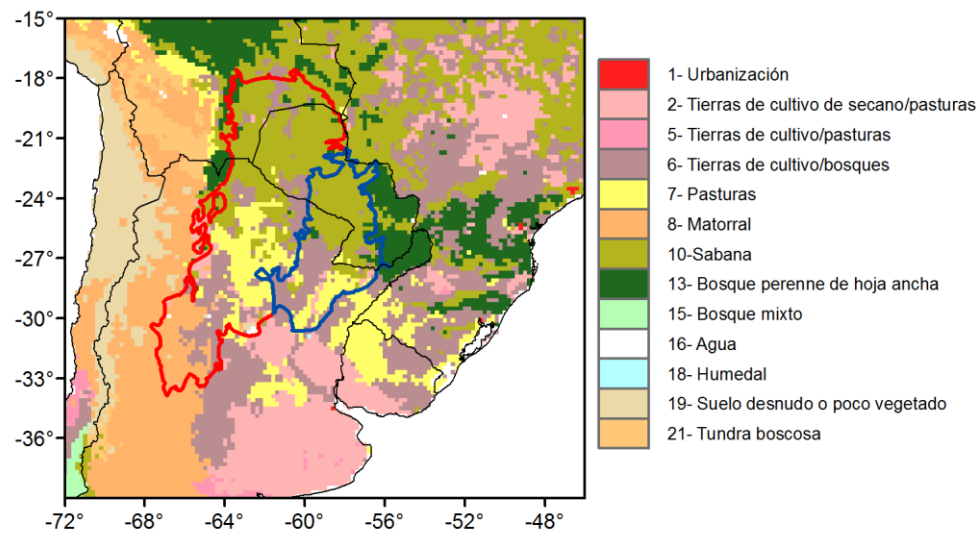
El LSM Noah-MP asigna un tipo de cobertura terrestre dominante a cada punto de grilla del dominio, y esta asignación permanece constante a lo largo del tiempo (Li y otros, 2013). A su vez, cada tipo de cobertura del suelo tiene asociado un conjunto de 15 propiedades biofísicas. Estas propiedades pueden ser valores fijos en el tiempo o pueden variar estacional o dinámicamente (cuando se activa el esquema de vegetación dinámica). Utilizar o no

propiedades biofísicas fijas o dinámicas depende de los objetivos específicos de la investigación y del nivel de detalle necesario para una aplicación de modelado particular. Para esta investigación, se seleccionó la opción dinámica. Esto significa que el modelo simula cambios en las propiedades de la vegetación a medida que evolucionan naturalmente con el tiempo, debido a cambios estacionales y ciclos de crecimiento de la vegetación. Estas propiedades dinámicas permiten que el modelo capture la estacionalidad de la vegetación y su impacto en las interacciones suelo-atmósfera.

Por defecto, el modelo utiliza un mapa de tipo de cobertura que utiliza la clasificación definida por el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP, Belward 1996) de 20 categorías de cobertura. Este mapa se deriva de las imágenes satelitales de 1 km de resolución recopiladas por MODIS entre noviembre de 2000 y octubre de 2001 (Friedl y otros, 2002). Alternativamente, Noah-MP ofrece otro mapa de cobertura cuyos usos de suelo siguen la clasificación definida por United States Geological Survey (USGS). Esta clasificación consta de 24 categorías basadas en imágenes del NOAA's Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) de la NOAA recopiladas entre abril de 1992 y marzo de 1993, con una resolución de 1 km (Eidenshink y Faundeen, 1994).

En ambos casos (IGBP y USGS), los datos de cobertura están disponibles a varias resoluciones espaciales: 30 segundos, 2, 5 y 10 minutos. La Figura 2.6 proporciona un ejemplo ilustrativo de las categorías de cobertura de suelo de USGS (Figura 2.6a) y las categorías de cobertura suelo de IGBP (Figura 2.6b) para una resolución de 10 minutos para la región de estudio. Aunque las clasificaciones utilizan diferentes categorías, los mapas muestran una distribución general similar de los usos del suelo en el dominio de simulación. Las diferencias principales se observan dentro del Gran Chaco, donde en ambas clasificaciones predomina la vegetación nativa pero de diferente tipo. La categoría más frecuente en USGS es sabana (45%), mientras que en IGBP es bosque caducifolio de hoja ancha (33%). Mas allá de esas diferencias, en ambas clasificaciones predomina la vegetación nativa compuesta por bosques y sabanas, luego las tierras destinadas a la agricultura y, por último, los matorrales.

(a) Mapa del tipo de cobertura de suelo del USGS



(b) Mapa del tipo de cobertura de suelo del IGBP

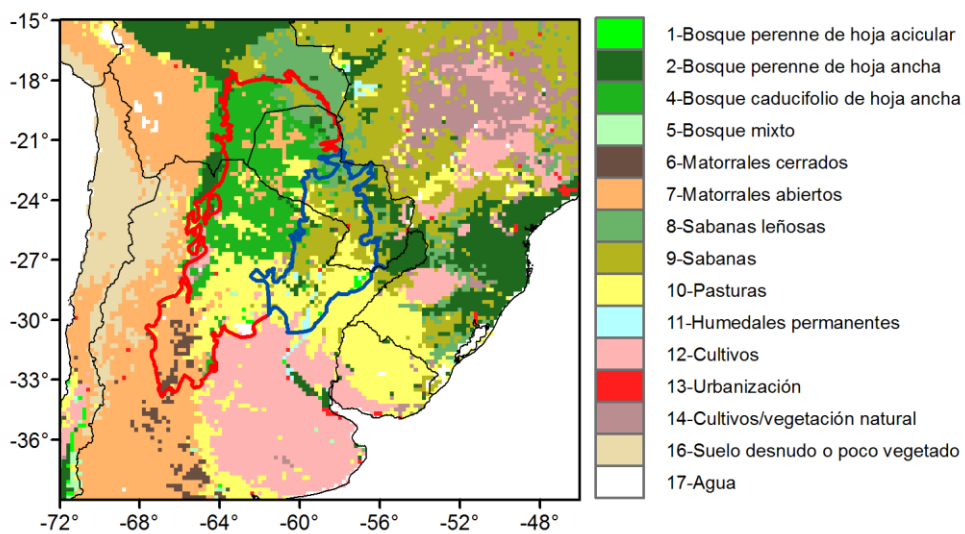


Figura 2.6 Representación de la cobertura de suelo en Noah-MP para una resolución de 10 minutos según: a) la clasificación USGS y b) la clasificación IGBP. Las leyendas sólo muestran las categorías presentes en la región.

En cada mapa, las celdas del mismo color corresponden a la misma categoría dominante de cobertura de suelo. El Apéndice B proporciona una tabla con las descripciones de cada una de las categorías de cobertura de suelo del IGBP (Sulla-Menashe, 2018). Estos píxeles comparten el mismo conjunto de propiedades en cualquier simulación. Esto significa que las propiedades no solo son constantes en el tiempo, sino también coherentes en el espacio, ya que diferentes lugares en todo el mundo que comparten la misma categoría (color) tienen las mismas propiedades. Las 15 propiedades asociadas con cada categoría se presentan en la Tabla 2.1, mientras que el Apéndice C proporciona la tabla que define los valores de las propiedades asociadas a cada una de estas categorías de cobertura de suelo.

Tabla 2.1 - Propiedades biofísicas utilizadas por el modelo Noah-MP.

Propiedad	Notación del modelo	Unidades
Fracción de vegetación verde	shdfac	
Profundidad radicular (índice de capa de suelo)	nroot	
Resistencia estomática	rs	s.m ⁻¹
Parámetro utilizado en la función de estrés por radiación	rgl	
Parámetro utilizado en la función de déficit de presión de vapor	hs	
Profundidad umbral de nieve equivalente en agua	snup	m
Límite superior de albedo máximo sobre nieve profunda	maxalb	%
Índice de área foliar mínimo a lo largo del año	laimin	
Índice de área foliar máximo a lo largo del año	laimax	
Emisividad de fondo mínima a lo largo del año	emissmin	
Emisividad de fondo máxima a lo largo del año	emissmax	
Albedo mínimo a lo largo del año	albedomin	
Albedo máximo a lo largo del año	albedomax	
Altura de rugosidad mínima a lo largo del año	z0min	m
Altura de rugosidad máxima a lo largo del año	z0max	m

2.6 Productos MODIS para modelado climático

Los intercambios de energía, agua y momento entre el suelo y la atmósfera dependen de las propiedades biofísicas de la vegetación. En consecuencia, los cambios en la cobertura del suelo también afectarán a estos intercambios, lo que tendrá efectos en las condiciones climáticas. La incorporación de información realista sobre la cobertura del suelo en los LSM es relativamente reciente, pero particularmente relevante para la región sur de Sudamérica, donde en los últimos años se ha producido una extensa sustitución de la vegetación nativa por cultivos (Volante y otros, 2012). Para incorporar los cambios en la cobertura de suelo en las simulaciones climáticas de este estudio, se adaptan mapas de uso del suelo para los años 2001 y 2015 para su utilización en Noah-MP. Los mapas se derivan del producto Terra y Aqua combinados MODIS Land Cover Climate Modeling Grid (CMG) (MCD12C1), que es una versión espacialmente agregada y reproyectada del producto de datos MCD12Q1 Version 6. Los mapas globales de la cobertura del suelo del IGBP están disponibles con una resolución espacial de 0.05° en proyección geográfica lat/long, también en formato de archivo HDF4 (3600 filas x 7200 columnas), en intervalos de tiempo anuales para 2001-2020. También se proporciona información agregada sobre la evaluación de la calidad para el esquema del IGBP. Para obtener más información sobre el grillado de MODIS visitar el sitio web: modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html.

2.6.1 Calidad del producto MODIS en la región de estudio

El producto MCD12C1 de MODIS brinda información sobre la confiabilidad de los mapas con clasificación IGBP. La calidad de los mapas se evalúa en el dominio de simulación, con foco en las áreas más relevantes para esta investigación: el Chaco Seco y el Chaco Húmedo (ver Figura 2.7). Ver las secciones 3.1 y 3.2 para obtener más detalles sobre la región de estudio y el dominio de simulación, respectivamente.

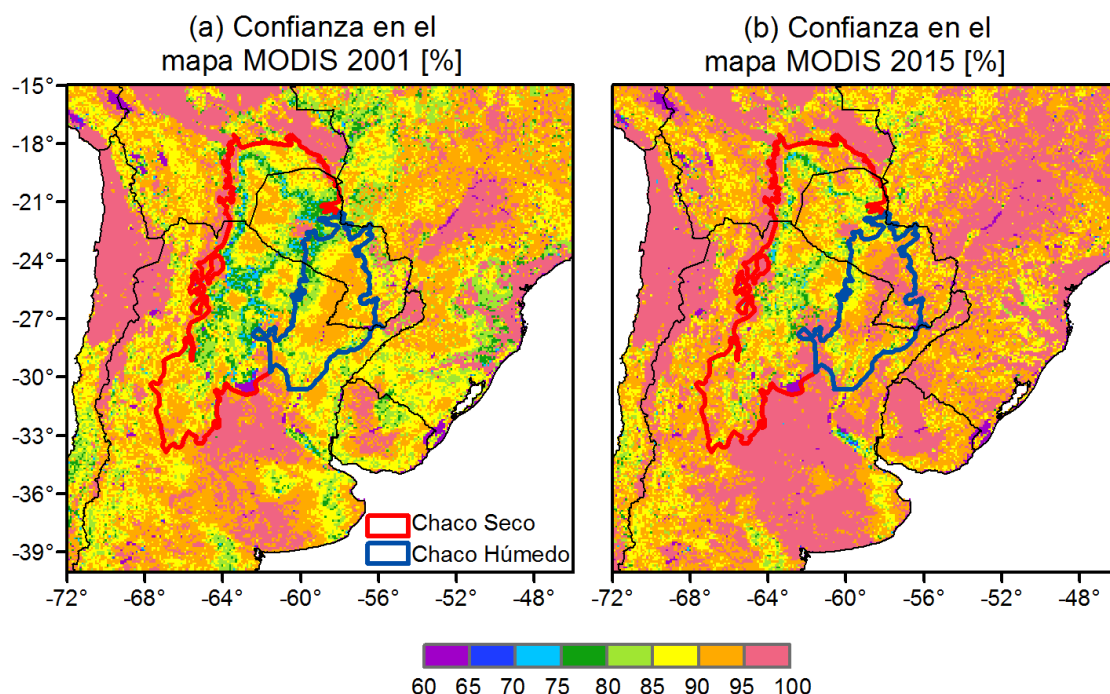
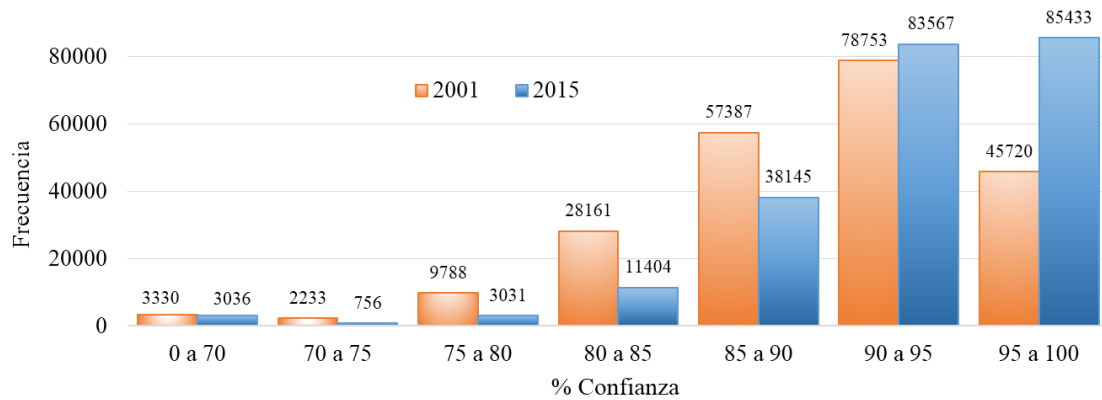


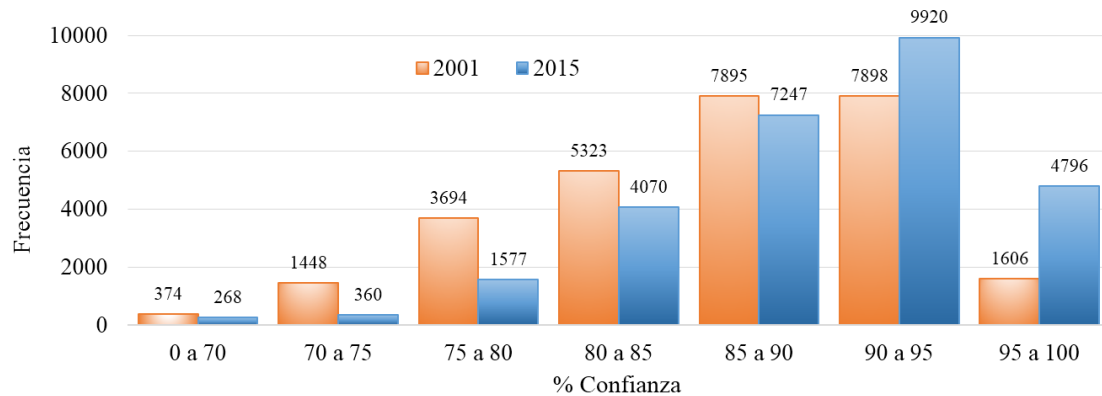
Figura 2.7 Porcentaje de confianza para los mapas MODIS con clasificación IGBP para los años (a) 2001 y (b) 2015. Los límites del Chaco Seco y Húmedo se muestran en rojo y azul respectivamente.

Como se puede ver en la Figura 2.7, la confianza del mapa del IGBP denota una mejora de 2001 a 2015, especialmente en la franja este del dominio. Otro cambio significativo se observa en el Chaco Seco, la región del dominio con menor nivel de confianza, pero que muestra una mejora notable con el tiempo. Las Figuras 2.8a-c muestran las mejoras de MODIS de 2001 a 2015 en el dominio, el Chaco Seco y el Chaco Húmedo respectivamente. Las tres áreas presentan un gran aumento en el número de puntos con una confianza superior al 95 %. Por su parte, el Chaco Seco muestra valores de confianza que se concentran entre el 70 % al 95 % en 2015 (Figura 2.8b).

(a) Distribución de frecuencia del porcentaje de confianza de la clase IGBP en el dominio



(b) Distribución de frecuencia del porcentaje de confianza de la clase IGBP en el Chaco Seco



(c) Distribución de frecuencia del porcentaje de confianza de la clase IGBP en el Chaco Húmedo

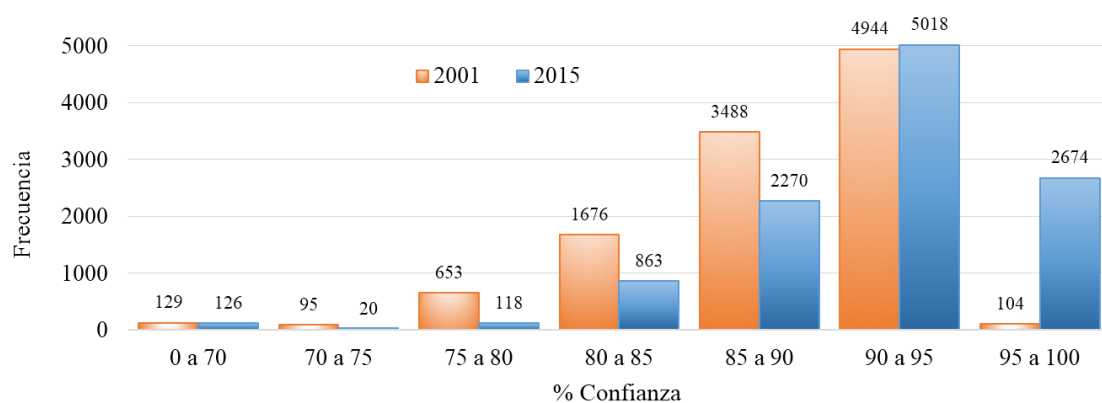


Figura 2.8 Distribución de frecuencias de nivel de confianza de las clasificaciones IGBP en (a) el dominio, (b) Chaco Seco y (c) Chaco Húmedo.

2.7 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describió detalladamente el modelo climático regional WRF, destacando su desarrollado colaborativo y de código abierto, su flexibilidad y su capacidad para abordar una amplia gama de problemas meteorológicos y climáticos. A continuación se resumen los puntos claves que lo destacan como herramienta ideal para abordar los objetivos planteados.

Uno de los aspectos clave es la integración del modelo de suelo Noah-MP con WRF, seleccionada por su relación costo computacional/calidad de simulación que la posiciona como la óptima elección. Noah-MP permite una representación detallada de la interacción suelo-atmósfera mediante varias opciones de parametrización física, incluyendo la vegetación dinámica, lo que resulta esencial para simular de manera realista las condiciones climáticas regionales bajo diferentes escenarios de uso del suelo. Por otro lado, una limitación del modelo Noah-MP es su capacidad para representar raíces más profundas, ya que alcanza una profundidad de hasta 2 metros, restringiendo la capacidad de representar las interacciones hidrológicas en zonas con raíces más profundas, como se presentan en el área de estudio. Si bien se reconoce esta simplificación y sus posibles implicancias, la escasa profundidad es una característica común en los modelos de suelo acoplados a modelos atmosféricos, de modo tal que la elección de otro LSM no implica, a priori, una ventaja en este sentido. A su vez, la integración entre WRF y Noah-MP, ampliamente evaluada por la comunidad científica, asegura que las simulaciones climáticas capturen adecuadamente las variaciones en los flujos de energía, agua y momento entre el suelo y la atmósfera derivadas de cambios de cobertura.

Para la representación de la cobertura del suelo, se ha optado por utilizar los mapas de uso de suelo derivados del producto MODIS MCD12C1 para los años 2001 y 2015 con categorías basadas en la clasificación del IGBP. Estos mapas son los más avanzados del estado del arte, proporcionan una alta resolución espacial, adecuada para los objetivos de estudio, y, además, su calidad y confiabilidad ha mejorado significativamente a lo largo del tiempo. En particular, se ha observado una notable mejora en la confianza de los datos para las áreas del Chaco Seco y Chaco Húmedo, alcanzando niveles de confianza superiores al 95% en 2015 en muchas partes del dominio de simulación.

Esta combinación del modelo WRF con Noah-MP y el uso de datos de alta calidad de MODIS asegura una simulación climática robusta y precisa, capaz de capturar las complejas

interacciones entre la vegetación y el clima regional. Esta base técnica y metodológica es fundamental para el análisis de los resultados y la interpretación de los impactos del cambio de uso del suelo en el clima de la región estudiada.

Capítulo 3: Simulación climática de alta resolución del Gran Chaco

3.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se describen las principales características geográficas de la zona de estudio, con foco en la parte climática. Posteriormente, se explica la configuración del modelo, detallando el período simulado, la resolución, el dominio abarcado y se justifican las parametrizaciones físicas adoptadas. Además, se describe el diseño experimental, el cual incluye tres conjuntos de simulaciones realizados para el mismo período pero que difieren en el mapa de uso de suelo utilizado. Finalmente, se realiza una validación de WRF comparando el rendimiento del ensamble de control con conjuntos de datos observacionales de las variables comúnmente utilizadas en la evaluación de modelos climáticos: precipitación, humedad del suelo y temperatura. La validación incluye un análisis de la variabilidad intra-modelo.

3.2 Características geográficas del Gran Chaco

El Gran Chaco es una región natural de aproximadamente 1.100.000 km² que se extiende desde el norte de Argentina hasta el sureste de Bolivia y el noroeste de Paraguay (Figura 3.1). En Sudamérica, es el segundo bosque más grande después del Amazonas y el tramo continuo más grande de bosque seco que aún perdura (Bucher y Huszar, 1999; Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa, 2010). El Gran Chaco se caracteriza por una topografía plana con elevaciones que varían entre 100 y 500 m (Figura 3.1). La región forma parte del cinturón subtropical, con un gradiente térmico latitudinal de sur a norte. La temperatura media anual en el Gran Chaco oscila entre 19 °C y 24 °C (Garreaud y otros, 2009; Almazroui y otros, 2021) (ver Figura 3.2). La región muestra un marcado gradiente longitudinal en la precipitación, con patrones claramente diferentes entre el Chaco Seco y el Chaco Húmedo. El Chaco Seco está dominado por un clima semiárido con precipitaciones anuales que oscilan entre 400 y 1000 mm, mientras que el Chaco Húmedo presenta un clima subtropical húmedo con precipitaciones anuales de alrededor de 1000 a 1700 mm (ver Figura 3.3). Vale

destacar que estos valores de precipitación de los últimos 30 años han sido menores en el pasado. Varios estudios (González y otros, 2012; Barros y otros, 2014; Ferrero y otros, 2019) han reportado un corrimiento de las isohietas hacia el oeste del Gran Chaco desde la década del '70. Es decir, el corrimiento implica un aumento generalizado de las precipitaciones medias anuales que responde a la variabilidad climática de gran escala, en particular a la circulación atmosférica resultante de la variabilidad de temperaturas del Océano Atlántico Subtropical. Sin embargo, esta tendencia creciente se estabiliza y revierte en la primera década de este siglo, debido a cambios en la variabilidad de baja frecuencia de las temperaturas del Pacífico (Agosta y Compagnucci, 2012; Lovino y otros, 2018).

Desde el punto de vista de la circulación de la atmósfera, la distribución espacial de la lluvia en la región está fuertemente influenciada por la interacción del desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical y la barrera orográfica de los Andes, lo que intensifica la ocurrencia de precipitación convectiva a sotavento en las laderas orientales de los Andes (Boers y otros 2014). En particular la convección resultante de la interacción entre la orografía de los Andes y la circulación genera precipitaciones al ascender aire húmedo por las laderas andinas, mientras que los frentes fríos pueden provocar lluvias intensas y descensos abruptos de temperatura en la región (Garreaud y Aceituno, 2001). Por otro lado, la región del Gran Chaco muestra una leve sensibilidad a fenómenos de gran escala importantes para otras áreas de Sudamérica como la Oscilación Madden-Julian (MJO, por su sigla en inglés) y la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO, por su sigla en inglés). Según Grimm (2019), los modos de MJO intensifican las anomalías de precipitación en el centro-este y sureste de América del Sur durante el verano, mientras que en el Gran Chaco las anomalías son “no significativas”. En cuanto a ENSO, el período de simulación (ver sección 3.4) incluye un evento de El Niño entre septiembre de 2014 y marzo de 2016. No obstante, Cai y otros (2020) muestran que el Gran Chaco es insensible a las fases de ENSO. Inclusive Vera y Osman (2018) reportan que el impacto del evento El Niño 2015 fue atenuado por el Modo Anular del Sur (SAM), reforzando la noción que el fenómeno no tuvo impacto alguno en la región de interés.

El Gran Chaco es uno de los *hotspots* de deforestación más dramáticos a nivel global, con la tasa más alta de pérdida de bosques secos en el mundo en el período 2000-2012 (Hansen y otros, 2013), principalmente debido a la expansión de la producción de soja y la ganadería (Fehlenberg y otros, 2017). Durante el siglo XX, el Chaco Húmedo ha sido transformado de manera intensiva para la agricultura, mientras que el Chaco Seco ha permanecido en gran

parte cubierto de bosques, ya que los métodos agrícolas dependían de la lluvia, lo que lo hacía poco rentable a pesar presentar un terreno llano favorable para las prácticas agrícolas (Bucher y Huszar, 1999). Este comportamiento histórico ha cambiado en las últimas décadas debido al desplazamiento hacia el oeste de los isohietas en el Gran Chaco y la disponibilidad de semillas resistentes a climas adversos (Dros y otros, 2004; Boletta y otros, 2006; Zak y otros, 2008).

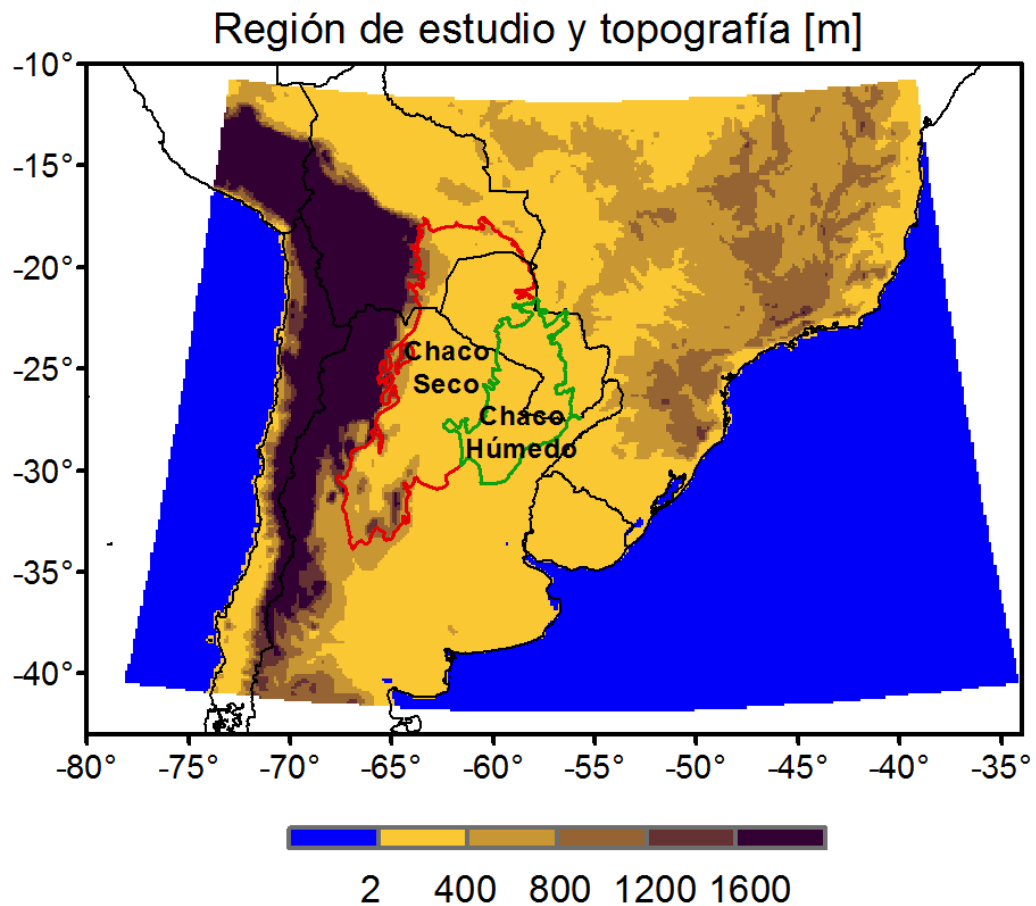


Figura 3.1 Región de estudio y topografía. Las líneas de colores resaltan las subregiones del Gran Chaco: Chaco Seco (rojo) y Chaco Húmedo (verde).

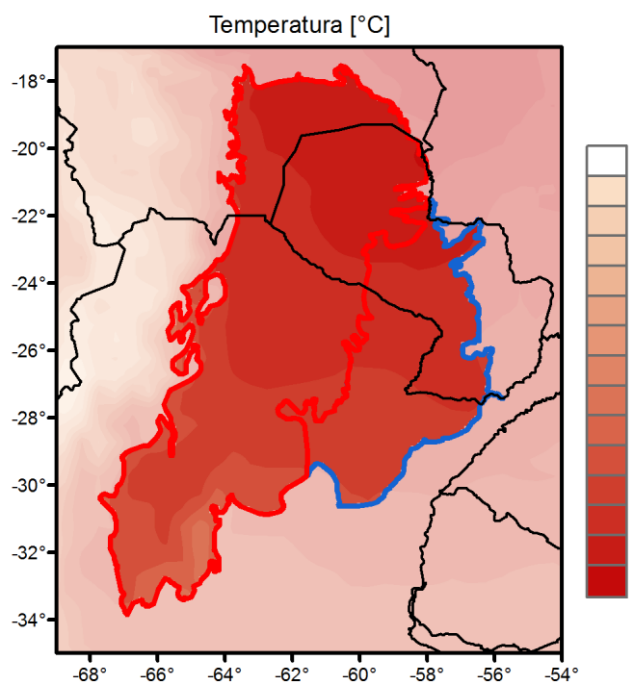


Figura 3.2 Temperatura media anual para el periodo 1990-2020. Fuente de datos: CRU.

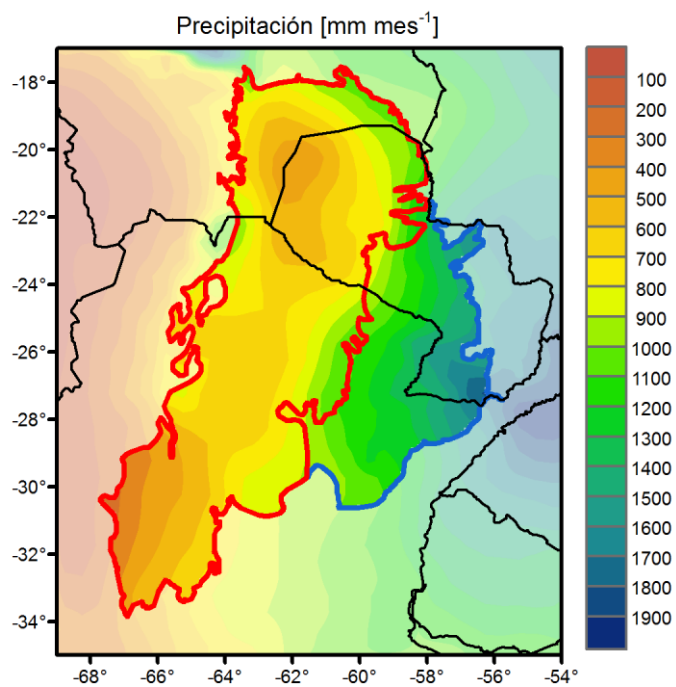


Figura 3.3 Precipitación media anual para el periodo 1990-2020. Fuente de datos: CRU.

3.3 Configuración de la simulación del modelo climático

Las simulaciones numéricas se realizan con el modelo WRF con el resolutor dinámico ARW en su versión 3.9 (Skamarock y otros, 2008), acoplado con el LSM Noah-MP, como se anticipó en el Capítulo 2. El período de simulación comienza el 1 de enero de 2014 y se extiende hasta el 30 de junio de 2016, pero los primeros meses de verano se reservan para la fase de estabilización (spin-up) y, por lo tanto, se descartan en el análisis de los resultados. WRF se ejecuta con una resolución de 12 km y 38 niveles verticales, en un dominio que cubre la parte sur de Sudamérica, incluyendo el Gran Chaco (como se observa en la Figura 3.1). Se implementó una zona de relajación lateral que abarca diez puntos de la cuadrícula, y se omitió intencionalmente el forzamiento espectral dentro del dominio para permitir que la atmósfera tenga más libertad para responder al forzamiento superficial (Pohl y Crétat, 2014).

La configuración del modelo se resume en la Tabla 3.1. Las parametrizaciones físicas siguen la selección de esquemas y opciones sugeridas por Lee (2010) y Lee y Berbery (2012), quienes desarrollaron un conjunto completo de diez simulaciones WRF combinando diferentes esquemas de capa superficial, esquemas de capa límite atmosférica, esquemas de parametrización de cúmulos y esquemas microfísicos para identificar la configuración que mostró la mayor habilidad para el sur de América del Sur. Esta configuración óptima fue posteriormente empleada en Müller y otros (2014) para evaluar las sequías y en Müller y otros (2016) para evaluar el rendimiento del modelo en pronósticos a corto plazo. En ambos casos, las parametrizaciones seleccionadas resultaron adecuadas para representar el hidroclima en América del Sur. El modelo es forzado por condiciones iniciales y de borde obtenidas del Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) del NCEP (Saha y otros, 2014).

El LSM acoplado Noah-MP (Niu y otros, 2011) resuelve los balances de energía y agua en la superficie que vinculan las condiciones de la superficie con la atmósfera. Las opciones seleccionadas para la parametrización de procesos físicos con sus características adicionales se enumeran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1 - Resumen de la configuración de WRF.

Parámetro	Descripción
Región	Sur de Sudamérica
Resolución	12 km
Tamaño de grilla	320 x 283 puntos de grilla
Nº de niveles verticales	38
Período	Enero 2014 – Junio 2016
Paso de tiempo de integración	60 s
Solucionador dinámico	ARW
Condiciones de borde	CFSv2 (Saha y otros, 2014)
Microfísica	Eta (Ferrier) (Rogers y otros, 2001)
Convección de cúmulos	Esquema Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994, 2000)
Capa superficial	Esquema MM5 Monin-Obukhov (Jiménez y otros, 2012)
Modelo de superficie terrestre	Noah-MP (Niu y otros, 2011)
Capa límite planetaria	Sin capa límite
Radiación de onda corta	Esquema Dudhia (Dudhia, 1989)
Radiación de onda larga	Modelo de transferencia radiativa rápida (Mlawer y otros, 1997)

Tabla 3.2 - Parametrización seleccionada de NOAH-MP

Parametrización	Opción seleccionada
Clasificación de la cobertura terrestre	MODIS - IGBP 20 Categorías
Resistencia estomática	Ball–Berry (Ball y otros, 1987)
Cálculo del coeficiente de arrastre de la capa superficial	Monin–Obukhov (Brutsaert, 1982)
Factor de humedad del suelo para la resistencia estomática	Noah type (Chen y Dudhia, 2001)
Escorrentía y aguas subterráneas	TOPMODEL con agua subterránea (Niu y otros, 2007)
Agua líquida sobreenfriada	Depresión del pto de cong. estándar (Niu y Yang 2006)
Permeabilidad del suelo	Efecto lineal, más permeable (Niu y Yang 2006)
Transferencia radiativa	Modificado de dos corrientes
Albedo de la superficie del suelo	CLASS (Esq. sup. terrestre canadiense) (Verseghy, 1991)
División de precipitaciones entre nieve y lluvia	Jordan (Jordan, 1991)
Condición de borde inferior de temperatura del suelo	TBOT a 8 m del archivo de entrada
Esquema de tiempo de temperatura de nieve/suelo	Semi implícito

3.4 Diseño experimental

Se realizan experimentos de sensibilidad para determinar cómo el cambio de uso y cobertura del suelo en el Chaco Seco puede influir en el hidroclima regional. La Figura 3.4 resume el diseño experimental, que incluye tres conjuntos de simulaciones (ensambles) realizados para el mismo período (enero de 2014 a junio de 2016), utilizando diferentes mapas de uso del

suelo. Cada ensamble tiene cuatro miembros con parametrizaciones idénticas, siendo la única diferencia (entre los miembros) las condiciones iniciales que tienen una diferencia de 24 horas, siguiendo el método de pronóstico promedio desfasado propuesto por Hoffman y Kalnay (1983).

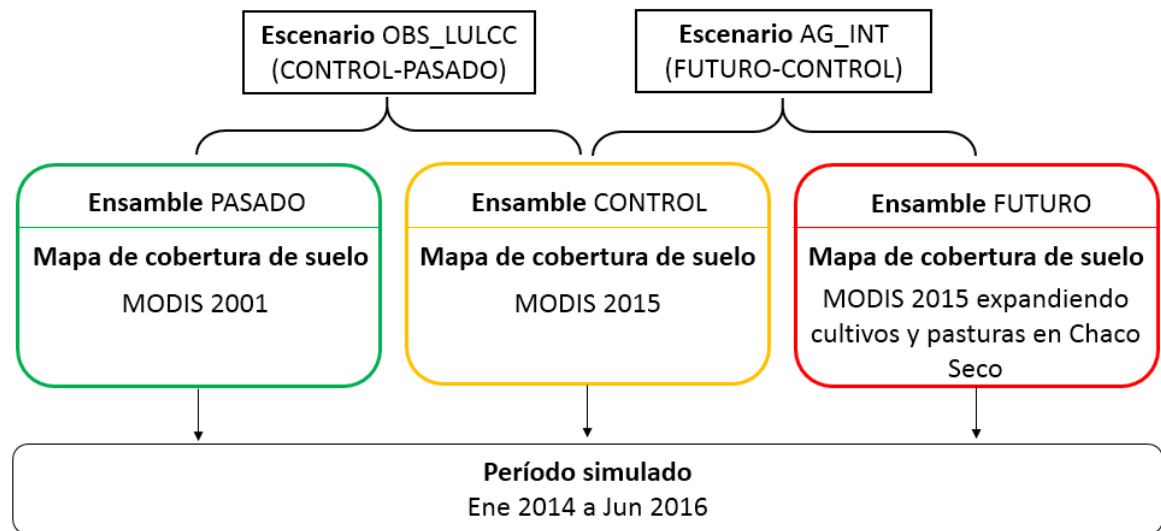


Figura 3.4 Diseño experimental.

El ensamble CONTROL utiliza el mapa de uso de suelo MODIS correspondiente al 2015 (Figura 3.5a). El ensamble PASADO utiliza el mapa de uso de suelo MODIS para el año 2001 (Figura 3.5b). El ensamble FUTURO asume una expansión agrícola intensiva dentro del Chaco Seco (Figura 3.5c), imitando lo que se podría esperar en el futuro si las tendencias actuales de expansión persisten en un escenario global bajo. Este escenario considera una fuerte apertura del mercado global con baja regulación estatal de los LULCCs, donde las condiciones favorecen una gran expansión agrícola (Mosciaro y otros 2022) en el tiempo. El mapa de uso de suelo FUTURO es una versión modificada del mapa de uso de suelo del 2015 en el cual todas las áreas de cultivos/pastos se expanden mediante un proceso de dilatación (Gonzalez y Woods, 1993). La dilatación es un método morfológico comúnmente utilizado en el procesamiento digital de imágenes para expandir áreas objetivo mediante la adición de píxeles circundantes a los límites y rellenando espacios vacíos (ver ejemplo ilustrativo en la Figura 3.6). En este estudio, primero se aplica la dilatación a la categoría de cultivos añadiendo diez líneas, y posteriormente, se aplica la dilatación a los píxeles de pastos añadiendo cinco líneas. En el mapa resultante de cobertura terrestre, los cultivos cubren el 29.4% mientras que los pastos cubren el 19.1% del área del Chaco Seco, lo que significa que las áreas ocupadas por cultivos y pastizales se han expandido 5 y 2.5 veces, respectivamente. Basado en la tasa de cambio del escenario global-bajo propuesto por

Mosciaro y otros (2022), que es de aproximadamente 7800 km² por año, el horizonte temporal de nuestro escenario FUTURO es 2065.

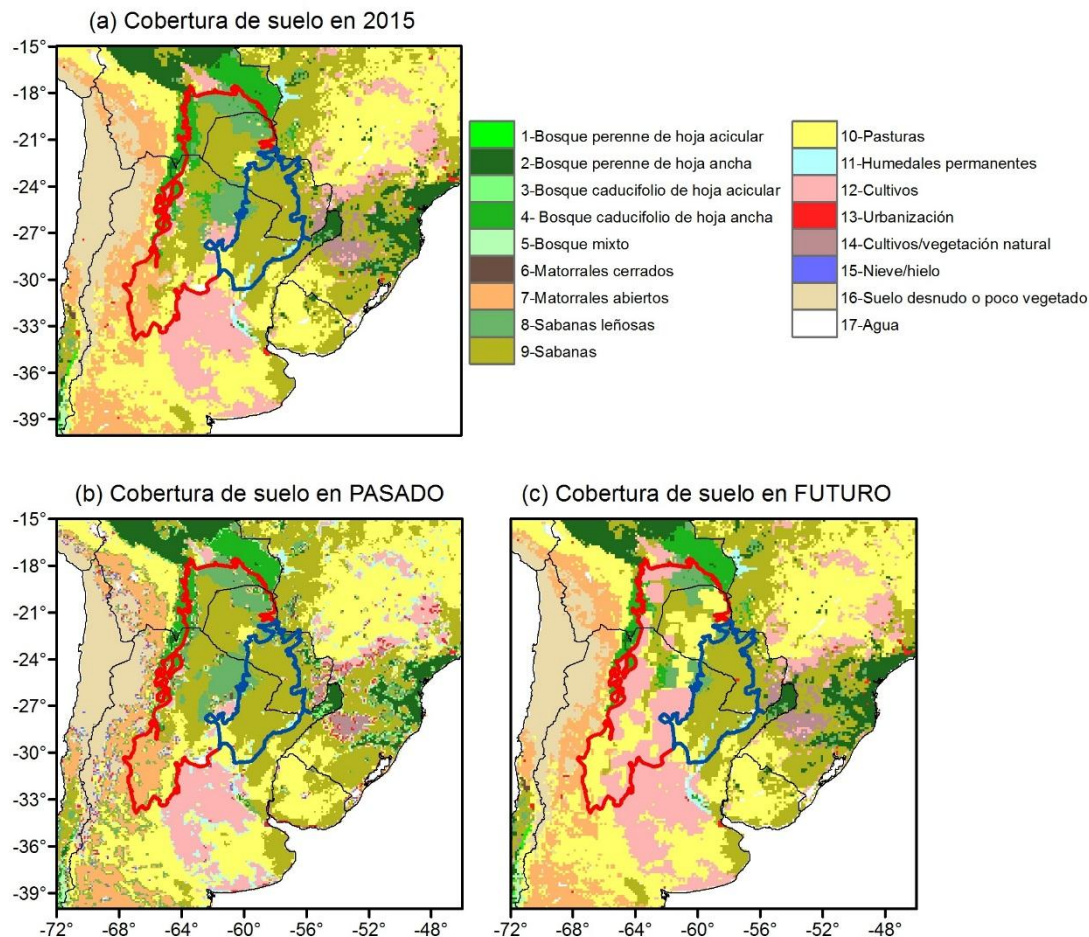


Figura 3.5 Mapa de cobertura de suelo del ensamble (a) CONTROL (b) PASADO y (c) FUTURO.

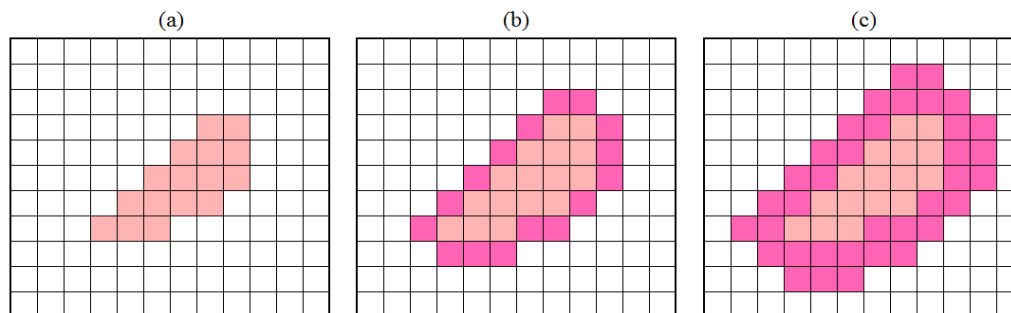


Figura 3.6 Ejemplo ilustrativo del proceso de dilatación aplicado a un área de cultivos: (a) área ocupada originalmente por cultivos, (b) área ocupada por cultivos después de aplicar dilatación agregando una línea; y (c) área ocupada por cultivos después de aplicar dilatación agregando dos líneas.

Las diferencias entre los ensambles CONTROL y PASADO se denominarán escenario de 'cambios observados en el uso del suelo' (de aquí en adelante OBS_LULCC). Este escenario se utiliza para evaluar el impacto de los cambios en el uso del suelo que ocurrieron desde 2001, en el clima del Chaco Seco durante el período de simulación. OBS_LULCC aborda la pregunta: ¿Cuál es el impacto que tuvo la expansión agrícola registrada desde el 2001, en las condiciones climáticas del período 2014 – 2016?

Las diferencias entre los ensambles FUTURO y CONTROL se denominan escenario de 'intensificación agrícola' (de aquí en adelante AG_INT). Este escenario se utiliza para evaluar la respuesta del clima de 2014 a 2016 si hubiera habido una expansión agrícola significativa en el Chaco Seco. El escenario AG_INT aborda la pregunta: ¿Cómo habría sido la respuesta del clima entre 2014 a 2016, si el Chaco Seco hubiera experimentado una expansión aún más intensa que la observado? Es bien sabido que los cambios en el uso del suelo han sido extensos en el sur de Sudamérica fuera del Gran Chaco, por lo que otros factores pueden entrar en juego y afectar el clima del Gran Chaco (Salazar y otros, 2015), sin embargo, estos otros factores no forman parte de la presente investigación.

Hay dos aspectos importantes relacionados con el período de simulación de 30 meses (2.5 años). En primer lugar, la validación del conjunto de CONTROL implica una comparación de variables simuladas y observadas para todo el período. Sin embargo, la evaluación de los cambios se centra específicamente en la temporada de verano austral (DJF), que abarca los veranos 2014/2015 y 2015/2016, cuando la vegetación está altamente activa y las interacciones tierra-atmósfera se intensifican en la ecorregión del Gran Chaco (Müller y otros., 2021a). Los primeros 11 meses se excluyen del análisis para evitar problemas de arranque y asegurar la estabilización de todas las variables. En segundo lugar, la insensibilidad de la región a fenómenos de gran escala (explicado en la sección 3.2) sugiere que las diferencias resultantes entre los conjuntos se atribuyen directamente a los cambios propuestos en la cobertura terrestre.

3.5 Evaluación del modelo

3.5.1 Datos observacionales

Antes de evaluar los escenarios, se compara el rendimiento del ensamble CONTROL del modelo WRF con conjuntos de datos observacionales, con el objetivo de evaluar los sesgos del modelo en la región de interés. Para ello, se compara la precipitación, la humedad del suelo y la temperatura a 2 m simuladas, con conjuntos de datos grillados basados en observaciones, ya sea de fuentes satelitales como observaciones in-situ. La elección de estas variables sirve a un propósito deliberado. La temperatura y la precipitación, al ser variables verdaderamente independientes con una incertidumbre relativamente baja debido a múltiples fuentes de monitoreo, son comúnmente utilizadas en la validación de modelos climáticos (por ejemplo, Sánchez y otros, 2015; Ortega y otros, 2021; Lovino y otros, 2021, entre otros). La humedad del suelo se incluye en la evaluación debido a su papel crucial en la dinámica de la cobertura terrestre y en las interacciones tierra-atmósfera, aunque reconocemos la incertidumbre en sus estimaciones basadas en señales obtenidas por satélite.

Tres conjuntos de datos de precipitación diferentes son empleados para la evaluación. En primer lugar, el conjunto del Climate Prediction Center (CPC) Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation del NCEP (Chen y otros, 2008; Xie y otros, 2010). Este consta de observaciones diarias de pluviómetros interpoladas en una cuadrícula de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. El segundo conjunto de datos, también con una resolución de cuadrícula de 0.5° , es la precipitación mensual provista por el Climate Research Unit (CRU). El conjunto de datos CRU TS v. 4.03 se basa en el análisis de más de 4000 estaciones meteorológicas (Harris y otros, 2020). Por último, se utiliza la precipitación trihoraria del WAter and global CHange (WATCH) Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data (WFDEI) (Weedon y otros, 2014). Cabe destacar que los tres conjuntos de datos usan observaciones in-situ para generar y/o validar sus estimaciones. Es probable que se superpongan en muchas de sus fuentes. No obstante, los productos difieren en la metodología utilizada para generar sus estimaciones finales, por ejemplo, mientras CRU se basa en interpolación de observaciones in-situ, WFDEI complementa las observaciones in-situ con observaciones remotas.

La humedad del suelo se evalúa en dos capas del modelo: 0-10 cm y 0-100 cm. La capa superior (10 cm) se compara con el Soil Moisture Operational Products System (SMOPS; Liu y otros, 2016). Este producto combina las observaciones de humedad del suelo de

múltiples sensores satelitales, produciendo mapas globales de contenido volumétrico cerca de la superficie (los primeros 1-5 cm) a intervalos diarios y con una resolución de 0.25° (Liu y otros, 2016). La humedad del suelo observada y simulada cerca de la superficie se compara en términos de contenido volumétrico de agua (m^3m^{-3}) para minimizar el impacto de las diferencias de espesor. La humedad del suelo en la zona de raíces (100 cm), crucial para el crecimiento de la vegetación, se evalúa con el producto operativo H14-SM-DAS-2 desarrollado en el EUMETSAT Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management (HSAF). Este producto proporciona estimaciones de la humedad del suelo en la zona de raíces a intervalos diarios en una grilla de $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ (Albergel y otros, 2012). Es importante señalar que los productos SMOPS y H-SAF son una combinación de diversos productos satelitales que constan de validaciones con mediciones in-situ (ej. Albergel y otros 2012, Liu y otros 2016) restringidas a Estados Unidos y Europa, donde existen redes de monitoreo que han sido sostenidas en el tiempo. En nuestro país se cuenta con la red telemétrica de humedad de suelo de CONAE, sin embargo, su uso para validación es limitado dado el acceso restringido a estas observaciones. Algunas excepciones incluyen el trabajo de Spennemann y otros (2020), quienes usaron mediciones de 8 sitios de esta red para evaluar ESA-CCI (producto basado en SMOS, SMAP y AMSR2). Por su parte, Thibeault y otros (2015) y Colliander y otros (2017) usaron datos de la red en Monte Buey para evaluar SMAP, mientras que Capelletti y otros (2022) utilizaron las observaciones en ese sitio para validar SMOS y SMAP. En el caso de la región de estudio, la indisponibilidad de observaciones representa la principal limitación para realizar un trabajo de validación de los productos SMOPS y H-SAF.

La temperatura se evalúa con dos productos: el conjunto de datos mensual de temperatura del aire en superficie CRU TS v. 4.03 y el conjunto de datos de temperatura cada tres horas de WFDEI. Ambos se proporcionan con una resolución de cuadrícula de 0.5° .

3.5.2 Precipitación

El patrón espacial de la precipitación basado en observaciones presenta, para el período de simulación, valores máximos en el sur de Brasil, el este de Paraguay y el noreste de Argentina (Figura 3.7a), donde la tasa de precipitación es de aproximadamente 5 mm día^{-1} . Esta magnitud disminuye gradualmente hacia el oeste a menos de $\sim 1 \text{ mm día}^{-1}$ en la cima de los Andes y el desierto de Atacama. El mapa de precipitación media correspondiente al ensamble CONTROL (Figura 3.7b) muestra una distribución espacial similar a las

observaciones, pero con valores más secos en la parte húmeda, donde el modelo produce sesgos negativos (ver Figura 3.7c). Por otro lado, WRF simula condiciones más húmedas sobre el Altiplano, la meseta alta en Bolivia. Las anomalías húmedas en regiones montañosas podrían deberse a limitaciones del modelo. Sin embargo, varios estudios (Adam y otros, 2006; Beck y otros, 2017; Müller y otros, 2021b, entre otros) enfatizan que las observaciones grilladas y las estimaciones por satélite tienden a subestimar la precipitación en áreas montañosas debido a la escasa disponibilidad de mediciones in situ, con limitadas posibilidades de capturar la precipitación orográfica propia de elevada altitud. Esta limitación conduce a mapas de precipitación en grilla suavizados y evita la calibración de las señales de detección remota.

Enfocándonos en el Gran Chaco, las simulaciones del modelo casi no presentan sesgos en el Chaco Seco y muestran sesgos secos de aproximadamente $1\text{-}2\text{ mm día}^{-1}$ en el Chaco Húmedo. Las condiciones más secas se deben a una subestimación de las lluvias a finales de verano y otoño, como se muestra en la Figura 3.7d. Por otro lado, el modelo WRF mejora notablemente la estimación en invierno (la temporada seca) y primavera. También se destaca que WRF muestra picos casi idénticos a las observaciones en todos los años. Las estimaciones de correlación y error confirman el buen desempeño de WRF en el Gran Chaco. La correlación temporal mensual entre la precipitación observada y simulada promediada en el área es de $r=0,93$ para el Chaco Seco y $r=0,85$ para el Chaco Húmedo. Los RMSE son de $0,6\text{ mm día}^{-1}$ y $1,9\text{ mm día}^{-1}$, respectivamente. Resulta interesante que la dispersión de los miembros del ensamble revela incertidumbre relevante solo durante el primer mes de simulación, después de lo cual la dispersión se mantiene consistentemente en un rango estrecho, indicando que la incertidumbre del modelo es comparable o incluso menor que la incertidumbre de las observaciones.

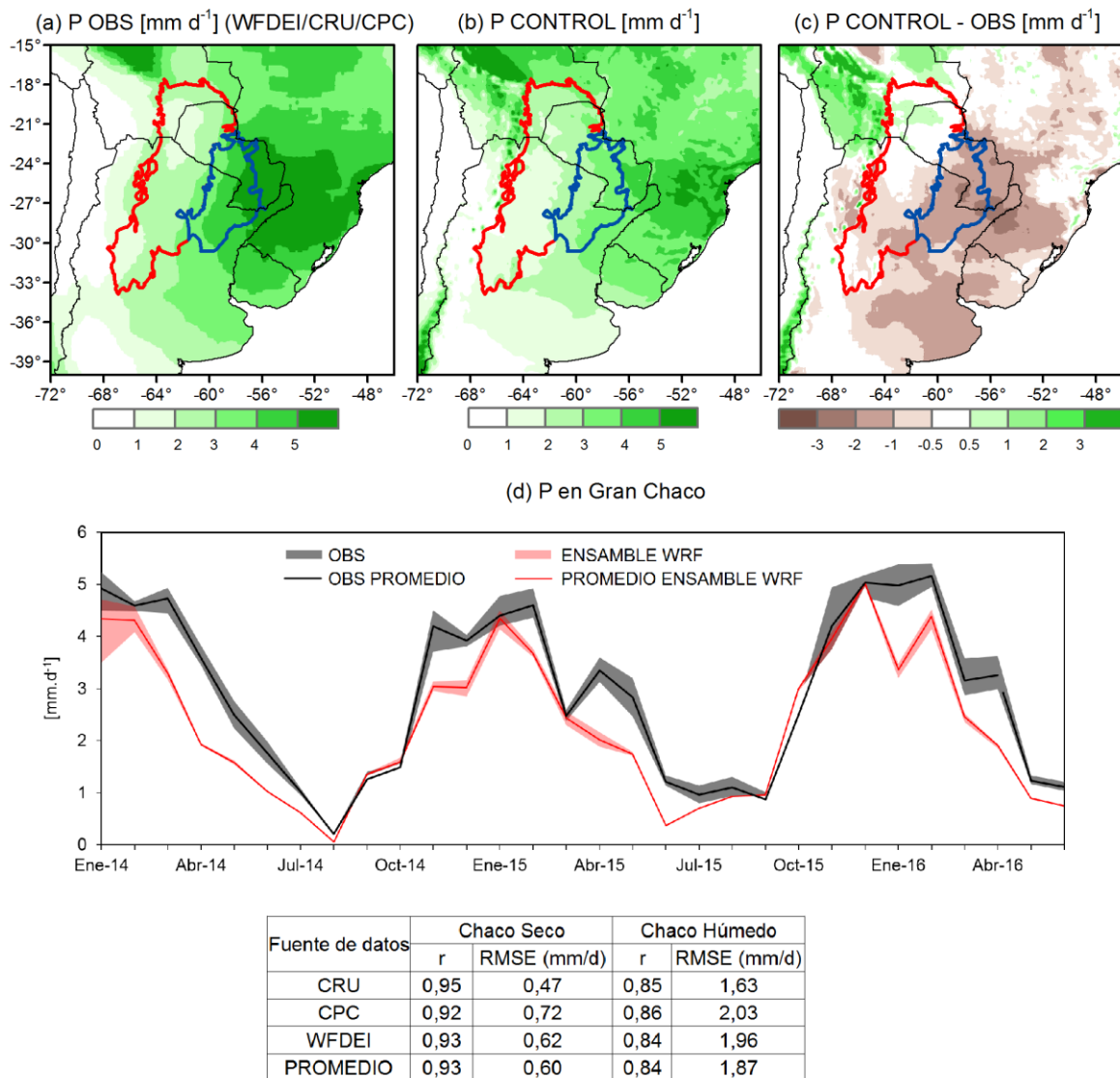


Figura 3.7 Promedio temporal de (a) la precipitación observada (promedio entre WFDEI, CRU y CPC), (b) la precipitación del ensamble CONTROL y (c) sus diferencias. (d) Serie temporal de precipitaciones promediadas en la región del Gran Chaco. Las bandas representan la dispersión de las observaciones (gris) y de los miembros del ensamble (rosado), mientras que las líneas sólidas son sus respectivas medias.

3.5.3 Humedad de suelo

La estimación de humedad del suelo (SM por sus siglas en inglés) cercana a la superficie del satélite SMOPS, muestra un patrón consistente con el patrón de precipitación, con valores altos al este y un gradiente decreciente hacia el oeste (Figura 3.8a). El contenido de humedad del suelo simulado muestra una estructura espacial y una magnitud notablemente acordes en gran parte del dominio, excepto en el Altiplano, donde los sesgos húmedos de precipitación producen anomalías de humedad del suelo (Figura 3.8b). Al igual que en el caso de la precipitación, en áreas topográficamente complejas, los sesgos húmedos podrían deberse a

limitaciones del modelo o a la subestimación de los datos observacionales, tal como se explicó en la sección 3.4.2. La similitud entre la humedad del suelo simulada y la estimada a partir de observaciones es aún más evidente en el Gran Chaco (Figura 3.8c), una región que se muestra en blanco en el mapa, lo que indica un sesgo cercano a cero. En cuanto a la evolución temporal, la humedad del suelo simulada promediada en el área presenta similitudes con SMOPS ($r=0,61$ para el Chaco Húmedo y $r=0,55$ para el Chaco Seco) pero con una ligera sobreestimación sistemática (Figura 3.8g).

La simulación del contenido de agua en la zona de raíces también presenta una notoria similitud general con las estimaciones del producto HSAF (Figura 3.8d-e), con ligeros sesgos secos hacia el este, probablemente derivados de los sesgos de precipitación mostrados para la misma área (ver Figura 3.7c). Centrándonos en el Gran Chaco, la humedad del suelo de WRF, promediada en el área presenta una evolución similar a HSAF, pero con un sesgo sistemático negativo (Figura 3.8g) que puede atribuirse (a) a los sesgos de precipitación (Figura 3.7d), (b) a la imposibilidad del modelo de representar una profundidad radicular más realista para dicha zona, es decir mayor a los 2 m, como así también (c) a la incerteza del producto de referencia. Es importante destacar que el desempeño es claramente diferente para las subregiones. El Chaco Seco presenta una fuerte concordancia espacial con HSAF ($RMSE=0,035 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), pero una débil correlación temporal ($r=0,33$), mientras que el Chaco Húmedo presenta una alta correlación temporal ($r=0,88$) pero mayores sesgos secos en el espacio ($RMSE=0,091 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$).

Notablemente, las series temporales simuladas de humedad del suelo en la capa superficial y en la zona de raíces revelan una variabilidad interna mínima durante todo el período de simulación. Esta consistencia se alinea con los hallazgos de Sörensson y Berbery (2015), quienes observaron que la inicialización de WRF/Noah-MP en meses húmedos (enero en este caso) favorece una rápida estabilización de las condiciones del suelo. La limitada variabilidad interna de la precipitación también contribuye a la baja dispersión entre los miembros del conjunto.

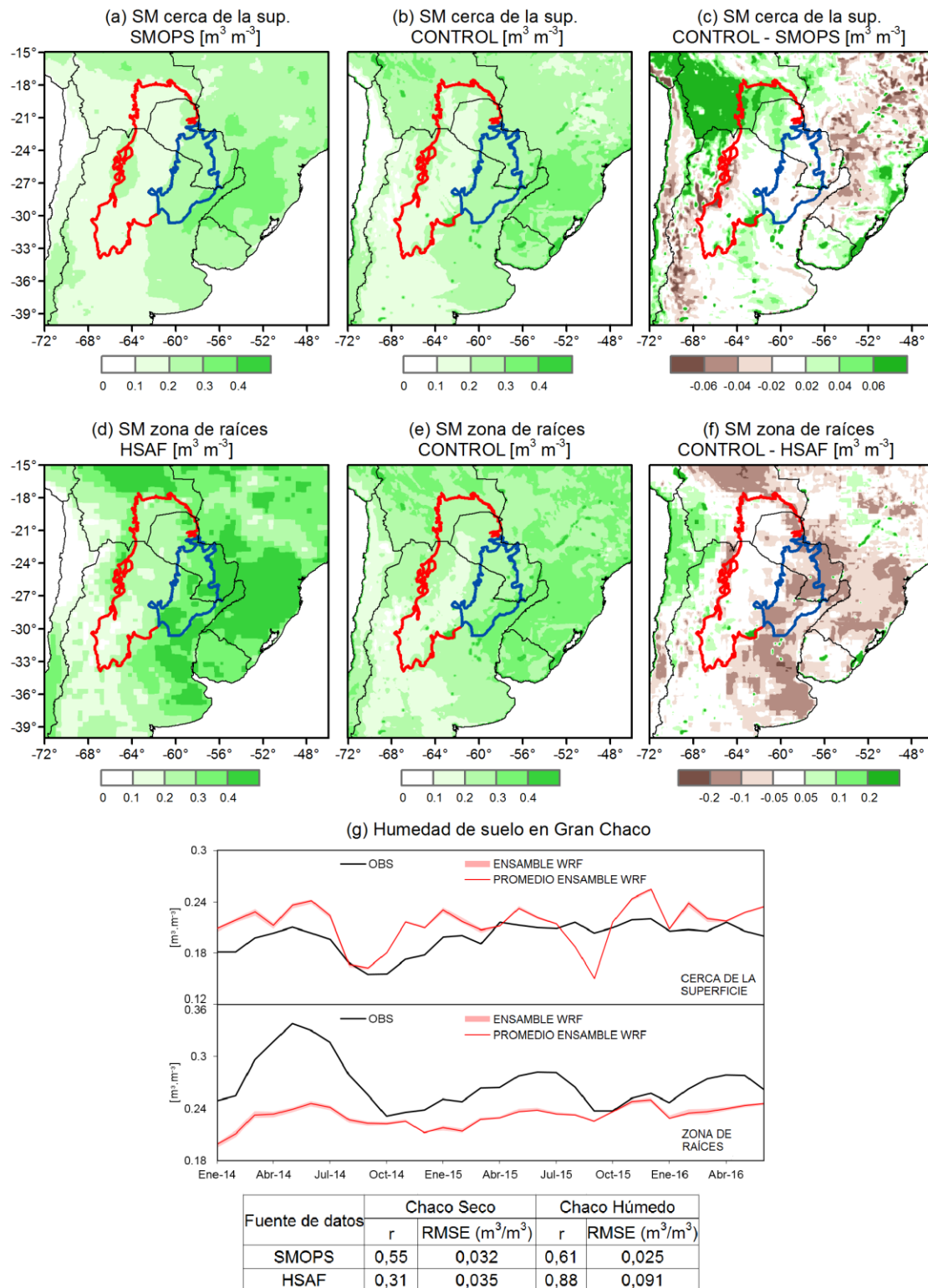


Figura 3.8 Promedio temporal de la humedad del suelo cerca de la superficie para (a) el producto SMOPS, (b) el ensamble CONTROL, (c) sus diferencias, y promedio temporal de la humedad del suelo en la zona de las raíces para (d) el producto HSAF, (e) el ensamble CONTROL, y (f) sus diferencias. (g) Series temporales de humedades del suelo observadas y simuladas promediadas sobre el Gran Chaco. Las bandas rosadas representan la dispersión de los miembros del ensamble, mientras que las líneas rojas son sus respectivas medias.

3.5.4 Temperatura

La distribución espacial de la temperatura media observada muestra un gradiente latitudinal con valores máximos en la parte central y norte del dominio que disminuyen hacia el sur (Figura 3.9a). La región más cálida tiene una temperatura promedio por encima de los 25 °C que disminuye gradualmente hacia el sur a menos de 15 °C. La región más fría, sobre las elevadas montañas de los Andes, tiene temperaturas promedio por debajo de los 5 °C.

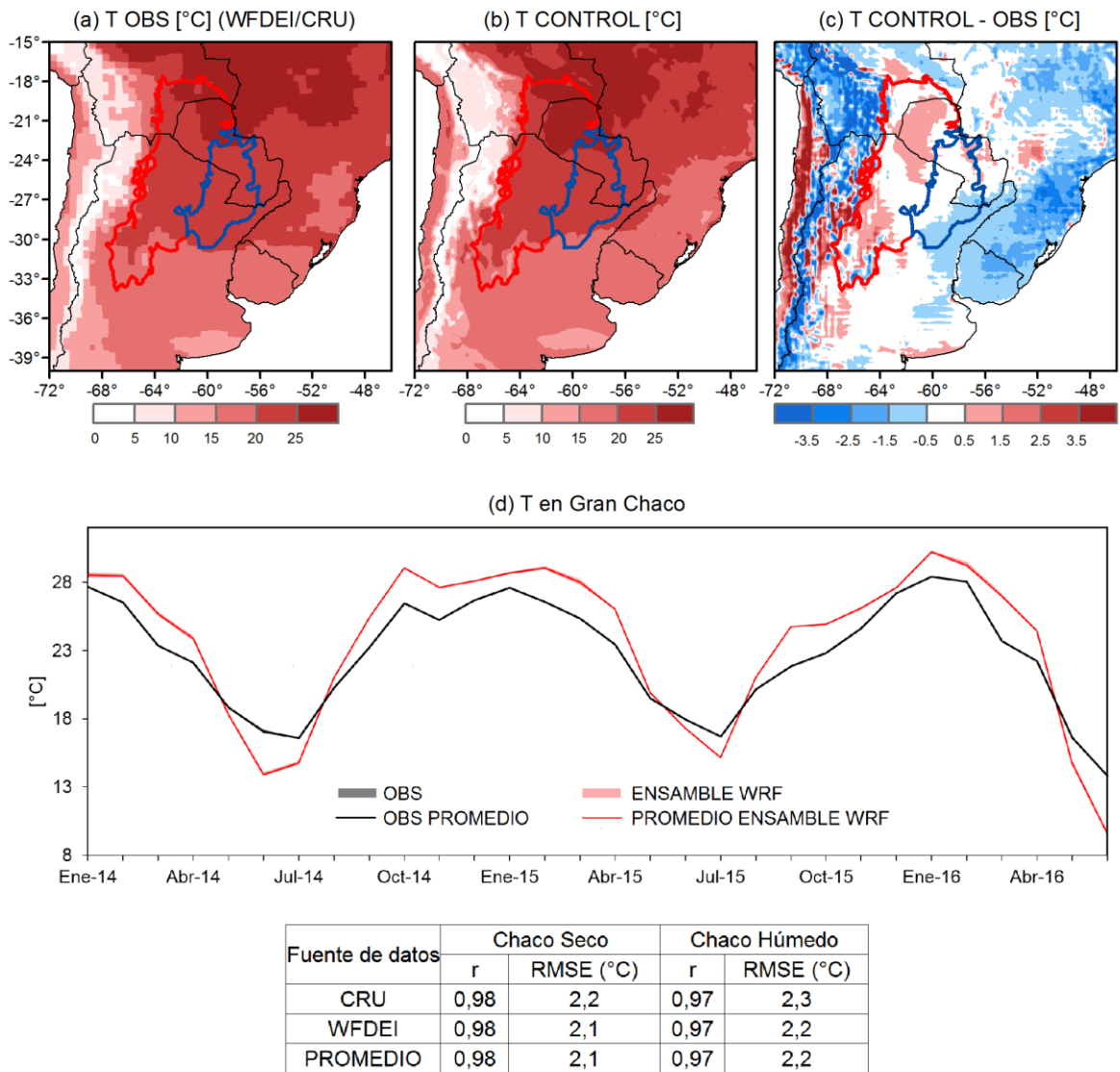


Figura 3.9 Promedio temporal de (a) la temperatura observada a 2 m, (b) la temperatura del ensamble CONTROL a 2 m y (c) sus diferencias. (d) Serie temporal de temperatura promediada sobre el Gran Chaco. Las bandas representan la dispersión de las observaciones (gris) y de los miembros del ensamble (rosado), mientras que las líneas sólidas son sus respectivas medias.

La Figura 3.9b muestra que el patrón espacial de la temperatura simulada captura las características principales de los productos basados en observaciones, en términos de distribución y magnitud (Figura 3.9c), especialmente en áreas llanas (ver Figura 3.1). En regiones de gran altitud, el modelo produce sesgos fríos. Enfocándonos en el Gran Chaco, WRF muestra ligeros sesgos cálidos y fríos (aproximadamente ± 1 °C) en partes del Chaco Seco y el Chaco Húmedo, respectivamente. La evolución de la temperatura simulada en el Gran Chaco es notablemente similar a las observaciones ($r=0,97$ para el Chaco Húmedo y $r=0,98$ para el Chaco Seco), con una variabilidad estacional ligeramente mayor (Figura 3.9d). Similar a lo observado para la precipitación y la humedad del suelo, la temperatura simulada presenta una sensibilidad insignificante a las condiciones iniciales (mínima dispersión del ensamble), lo que refuerza la robustez de las simulaciones del modelo.

3.6 Conclusiones del capítulo

El gran Chaco es una ecorregión que abarca partes de Argentina, Bolivia y Paraguay, constituyendo el tramo continuo más grande de bosque seco que aún perdura en Sudamérica. Esta región enfrenta un proceso de expansión agrícola que la convierten en uno de los hotspots de deforestación con la tasa más alta de pérdida de bosques secos en el mundo en el período 2000-2012. El diseño experimental propuesto permitirá analizar cómo esta expansión agrícola registrada desde 2001, y la proyectada a futuro, influyen en el clima regional, a partir de una evaluación detallada de las condiciones climáticas en el Gran Chaco bajo diferentes escenarios de uso del suelo.

La comparación del ensamble de control con datos observacionales muestra que la configuración seleccionada del modelo WRF es adecuada para representar el hidroclima regional. La evaluación revela la capacidad del modelo para capturar patrones de precipitación, humedad del suelo y temperatura con notable precisión, aunque con algunas limitaciones sobre áreas montañosas. Otro aspecto destacable es la escasa variabilidad intra-modelo, lo que garantiza robustez en los ensambles.

Dentro del Gran Chaco, se observa un buen desempeño en la simulación de precipitación con pequeños sesgos secos en el Chaco Húmedo. En cuanto a la humedad de suelo, el promedio areal dentro del Gran Chaco de dicha variable simulada en zona de raíces, presenta una evolución similar a HSAF, pero con un sesgo sistemático negativo, que puede atribuirse a varios factores: los sesgos de precipitación, la imposibilidad del modelo de representar una

profundidad radicular más realista para dicha zona (mayor a los 2 m) y la incertidumbre debida a la falta de trabajos de validación de los productos satelitales en la zona de estudio que impide responder con certeza sobre la confiabilidad de los mismos. No obstante, a pesar de las limitaciones del modelo y de la incertidumbre existente, se considera que el uso de estos productos para evaluar las simulaciones es preferible a no utilizar ninguna herramienta de evaluación.

Por su parte, la temperatura simulada mostró una fuerte concordancia con las observaciones, aunque existen dos áreas dentro del Chaco Seco donde WRF muestra sesgos mayores a 0.5°C y se observa además, en el promedio areal del Gran Chaco, una mayor amplitud anual que en las observaciones. Estos sesgos pueden ser producto de errores en la clasificación de los tipos de cobertura de suelo ya que los mismos tienen un efecto directo sobre la temperatura, dado que su clasificación determina propiedades claves como el albedo o la resistencia estomática. La incerteza en las observaciones debida a la escasa cantidad de estaciones meteorológicas en la región, limita la validación de los productos utilizados pudiendo ser también otro motivo de la aparición de los sesgos. Con respecto al posible impacto de los sesgos positivos en temperatura, se puede suponer que este calentamiento aumenta la demanda atmosférica de vapor facilitando la evapotranspiración de las plantas. A su vez, a mayor temperatura mayor radiación saliente. No obstante, vale destacar que los sesgos observados en este estudio son similares e inclusive menores a los reportados en trabajos similares usados como referencia para la configuración del modelo.

Capítulo 4: Escenarios de cambios de uso del suelo en el Gran Chaco

4.1 Introducción al capítulo

La cobertura de suelo en el Chaco Seco ha experimentado significativos cambios en las últimas décadas, influidos tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas. Este capítulo se enfoca en analizar la evolución de la cobertura de suelo dominante en esta región desde el año 2001 hasta el 2015, utilizando datos obtenidos del producto MCD12C1 de MODIS.

Se analizan los cambios de cobertura identificando aquellos que podrían asociarse a procesos de deforestación. Se cuantifica la expansión de las tierras ocupadas por cultivos y pasturas y la reducción de las áreas ocupadas por bosques y sabana leñosa. Asimismo, se discuten los cambios clasificados como "otros", que no están relacionados directamente con la deforestación, y los cambios "ilógicos", que podrían ser resultado de errores en los algoritmos de clasificación. Con estas definiciones, se presenta un análisis de los escenarios de cobertura de suelo propuestos en el capítulo anterior, incluyendo el escenario OBS_LULCC, que evalúa las condiciones climáticas en función de los cambios observados en el uso del suelo entre 2001 y 2015, y el escenario AG_INT, que simula una expansión intensiva de la agricultura para evaluar su impacto en el clima.

4.2 La cobertura de suelo y su evolución en el Chaco Seco

La cobertura de suelo dominante en el Chaco Seco y su evolución desde 2001 al 2015 se estima utilizando los mapas de uso del suelo del producto MCD12C1 de MODIS. Las categorías de cobertura de suelo dominante en la región, según se observa en 2015, son sabana, sabana leñosa, bosque, pasturas, matorral y cultivos (Figura 3.5a). La Figura 4.1 muestra cómo estas categorías de cobertura de suelo evolucionaron en el Chaco Seco desde 2001 hasta 2015. Para simplificar, en esta figura se agruparon algunas de las categorías del IGBP en clases de cobertura de suelo principales. Por ejemplo, el bosque incluye bosques

de hoja ancha perennes, bosques de hoja ancha caducifolios y bosques mixtos; el matorral incluye matorrales cerrados y matorrales abiertos, mientras que cultivos incluye cultivos y mosaicos de suelo de cultivo/vegetación natural. La evolución de la cobertura terrestre indica que las tierras agrícolas (cultivos y pasturas) aumentaron principalmente hasta 2007. La desaceleración de la expansión agrícola después de 2007 podría estar relacionada con la implementación de la Ley Argentina 26.331, también conocida como la "Ley nacional para la protección de los bosques nativos", que se promulgó con el objetivo de preservar los bosques nativos en nuestro país. Entre 2001 y 2015, la cobertura agrícola aumentó un 15,4 %, lo que representa un 2,6 % del área total del Chaco Seco. Por otro lado, los bosques y las sabanas leñosas disminuyeron un 1,5 % y un 16,4 %, respectivamente, lo que representa un 4,3 % del área del Chaco Seco.

De 2001 a 2015, el 18 % del área del Chaco Seco experimentó cambios LULCCs. Estos cambios se cuantifican por categoría en la Figura 4.2. La mayoría de estos cambios (53 %) implican transiciones de categorías caracterizadas por una mayor cobertura arbórea a otras con una cobertura menor, lo que podría estar relacionado con procesos de deforestación (Figura 4.3). Según la Figura 4.2, estos cambios son:

- De sabana leñosa a sabana, 23.328 km².
- De sabana a agricultura, 12.672 km² (40 % a cultivos y 60 % a pasturas).
- De sabana leñosa a agricultura, 10.368 km² (50 % a cultivos y 50 % a pasturas).
- De bosque a sabana, 8.064 km².
- De bosque a sabana leñosa, 6.336 km².
- De bosque a agricultura, 6.192 km² (67 % a cultivos y 33 % a pasturas).
- De matorral abierto a pasturas, 5.904 km².

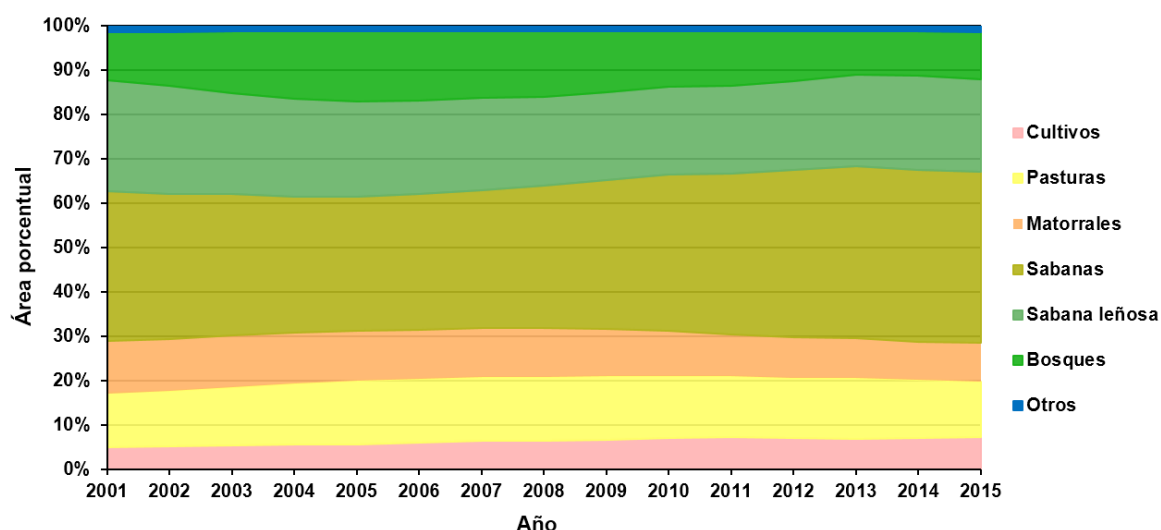


Figura 4.1 Evolución temporal de la cobertura del suelo en el Chaco Seco. Por simplificación las categorías se presentan de modo agregado (ver texto).

		2001								
	CATEG	2	4	7	8	9	10	12	14	
2015	2	2592	1008							
	4	144	58608	144	8064	10800	288			
	7			1008						
	8	144	6192		155376	2592	144			
	9		7056	288	20016	194256	576	144		
	10		2016	288	4176	2736	13248	1440		
	12		3456		3888	1296	432	16128	288	
	14									0

Figura 4.2 Cuantificación (en km²) de LUCCs en el Chaco Seco de 2001 a 2015. El color de la celda es proporcional a su valor.

Es importante señalar que aproximadamente el 46 % del área con LULCCs en el Chaco Seco corresponde a cambios denominados "otros", que no están relacionados con procesos de deforestación (por ejemplo, de matorral abierto a sabana o a suelo desnudo, de pasturas a cultivos, entre otros). El 1% restante de los cambios se denominan como "ilógicos" en la

Figura 4.3 dado que implican transformaciones entre coberturas naturales en un corto período (14 años) que son impensables en el mundo real y podría ser una falla de los algoritmos de clasificación (Liang y Gong, 2010; Cai y otros, 2014). En esta categoría identificamos cambios de bosque caducifolio a bosque perenne, de bosque perenne a bosque caducifolio y de cuerpo de agua a sabana. Los píxeles identificados como ilógicos mantienen las categorías en sus respectivos mapas ya que para identificar cuál de las dos clasificaciones (inicial o final) es la “incorrecta” y poder corregirla se requiere de un trabajo más exhaustivo que escapa de los objetivos de este trabajo.

Cabe destacar que dentro de la clasificación “otros”, algunos cambios pueden ser considerados como ilógicos según Liang y Gong (2010) y Cai y otros (2014), como por ejemplo de pasturas a bosque caducifolio. Sin embargo, Basualdo y otros (2019) reportaron que la recuperación del funcionamiento ecosistémico de los bosques en un período de 15 años es factible en tierras agrícolas abandonadas de la región del Chaco semiárido. Dado que este último trabajo se basa en observaciones in-situ sobre la zona de interés se adoptó este último criterio para la clasificación de los cambios observados.

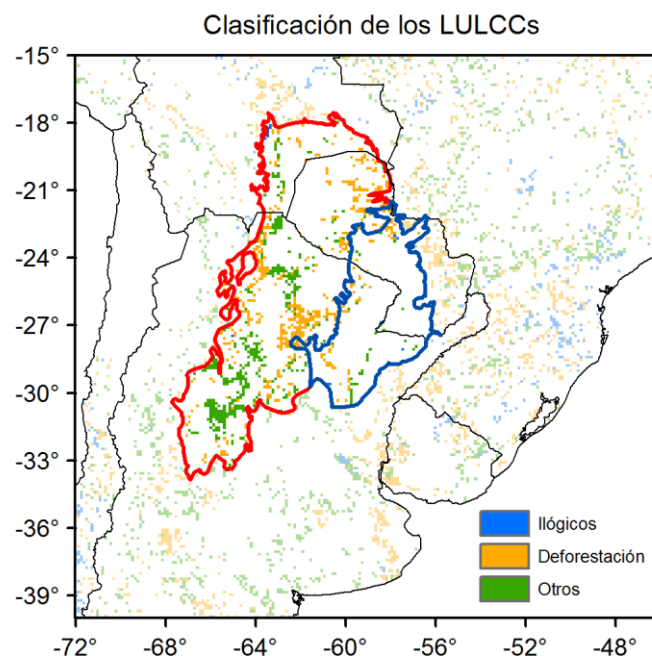


Figura 4.3 Clasificación de los LULCCs.

4.3 Escenarios de cobertura de suelo

4.3.1 Escenario OBS_LULCC: LULCCs observados entre 2001 a 2015

Este escenario fue diseñado para evaluar cómo habrían variado las condiciones climáticas de un período relativamente reciente (2014-2016) si el uso del suelo que existía en el pasado, caracterizado por una mayor cobertura forestal, se hubiera mantenido. Con este propósito, se selecciona el mapa más antiguo disponible del producto MCD12C1, correspondiente al año 2001 (Figura 3.5b), y se utiliza para generar el ensamble PASADO, que se comparará con el ensamble CONTROL.

En la Figura 4.4, se puede observar que las categorías dominantes en el dominio de simulación en 2001 son: pasturas (28,3 %), sabanas (26,2 %), bosques de hoja ancha perennes (13 %), matorrales abiertos (8,8 %), suelos desnudos o escasamente vegetados (7 %), cultivos (6,5 %), sabanas leñosas (3,8 %), bosques de hoja ancha caducifolios (2,7 %), mosaicos de cultivo/vegetación natural (1,1 %) y otros (2,6 %). Para el escenario OBS_LULCC, como se ve en la Figura 4.5, los LULCCs se producen tanto dentro como fuera del Gran Chaco. Esto implica que las diferencias observadas en los balances de agua y energía entre los ensambles PASADO y CONTROL pueden atribuirse tanto a cambios que han tenido lugar tanto dentro del Gran Chaco como fuera de él, en el resto del dominio.

De 2001 a 2015, el 12,4 % del dominio experimentó LULCCs. Como se explicó en la sección 4.1, los cambios en el uso del suelo se clasificaron en deforestación, cambios ilógicos, y otros. La Figura 4.3 muestra que los cambios asociados con la deforestación son predominantes, abarcando el 53 % de ellos, seguidos por los cambios asociados con otros procesos, que representan el 46 %, y finalmente, el 1 % restante corresponde a cambios ilógicos.

De acuerdo con el proceso de deforestación observado, hubo una expansión de pasturas y cultivos en un 1,8 % y un 25,7 %, respectivamente (ver Figura 4.4), lo que en conjunto corresponde al 2 % de la superficie total del dominio. Este aumento en las áreas agrícolas se compensa con la reducción de las sabanas (-2,1 %), los bosques de hoja ancha perennes (-4,4 %) y las sabanas leñosas (-17,3 %) observadas en la Figura 4.4.

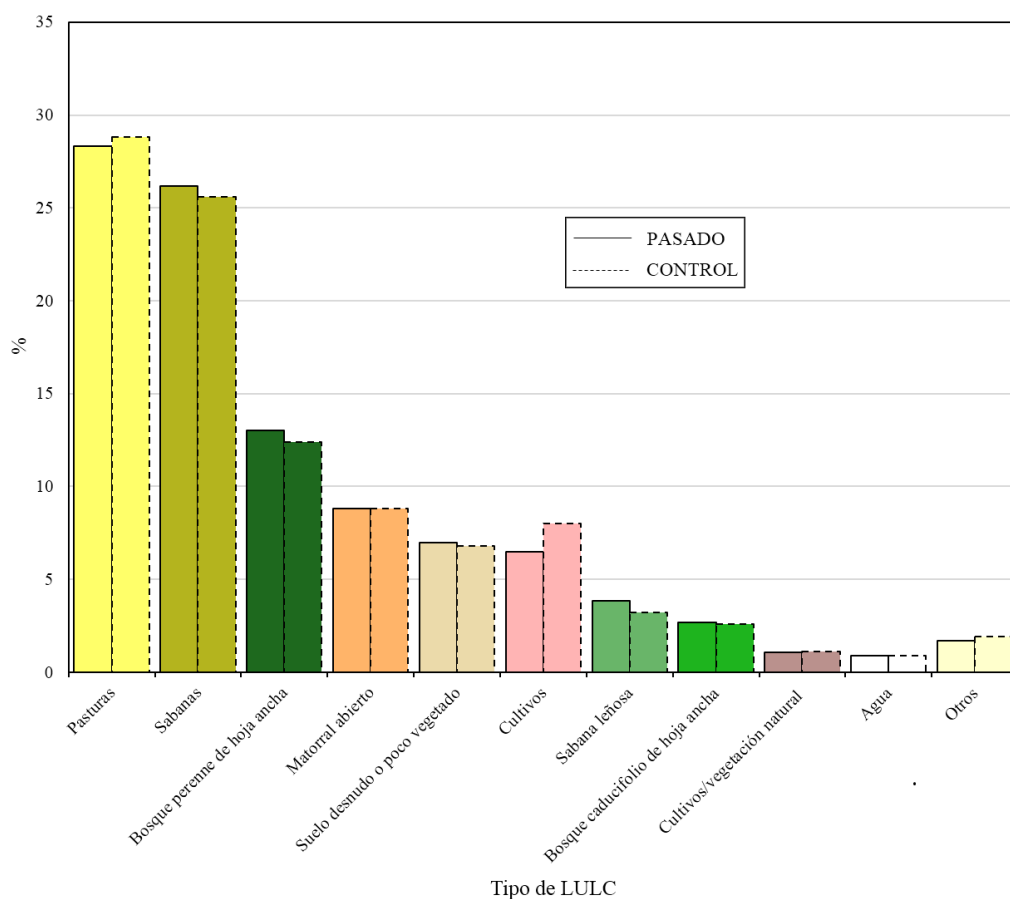


Figura 4.4 Porcentajes del tipo de cobertura de suelo en el dominio del escenario OBS_LULCC para los ensambles PASADO y CONTROL.

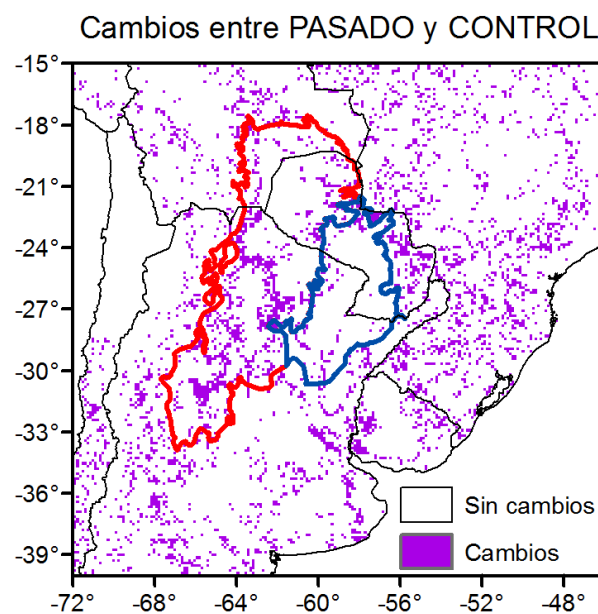


Figura 4.5 Diferencias entre el mapa de cobertura de suelo del ensamble PASADO con el mapa de cobertura de suelo del ensamble CONTROL. Se utilizó opacidad en todos los paneles para resaltar la región de interés.

4.3.2 Escenario AG_INT: Expansión intensiva de tierras agrícolas

El escenario AG_INT fue diseñado para evaluar cómo habrían variado las condiciones climáticas de un período relativamente reciente (2014-2016) si el uso del suelo para ese período se hubiera modificado mediante una expansión intensiva de la agricultura. Con el objetivo de lograr esto, se creó una versión modificada del mapa de cobertura terrestre de 2015 (Figura 3.5c), simulando lo que se podría esperar en el futuro si las tendencias actuales de expansión continúan, y luego se utilizó para generar el ensamble FUTURO que se compara con el ensamble CONTROL. El mapa sintético se crea utilizando la técnica de dilatación en celdas de cultivos de la grilla del Chaco Seco en 2015. El proceso de dilatación expande todas las regiones de cultivos/pasturas incorporando celdas vecinas de la grilla en los perímetros de las zonas agrícolas.

En la Figura 4.6, es evidente que las categorías dominantes dentro del Chaco Seco en el mapa de uso del suelo del ensamble CONTROL son sabana, sabana leñosa, pasturas, bosque de hoja ancha caducifolios, matorral abierto y cultivos. Sin embargo, en el mapa de uso del suelo del ensamble FUTURO, las áreas ocupadas por cultivos y pasturas se han expandido 5 y 2,5 veces respectivamente, cubriendo el 68,3 % del Chaco Seco entre las dos categorías. Este aumento en las áreas agrícolas implicó una reducción en las áreas ocupadas por matorral abierto, sabanas, bosques de hoja ancha caducifolios y sabanas leñosas. El horizonte temporal de este escenario FUTURO basado en la tasa de cambio del escenario global-bajo propuesto por Mosciaro y otros (2022), que es de aproximadamente 7800 km² por año, es el año 2065.

Para el escenario AG_INT, los cambios en el uso del suelo se producen exclusivamente dentro del Chaco Seco (ver Figura 4.7). Esto significa que las diferencias observadas en los balances de agua y energía resultantes de la comparación entre los ensambles CONTROL y FUTURO se atribuyen únicamente a estos cambios en el uso del suelo.

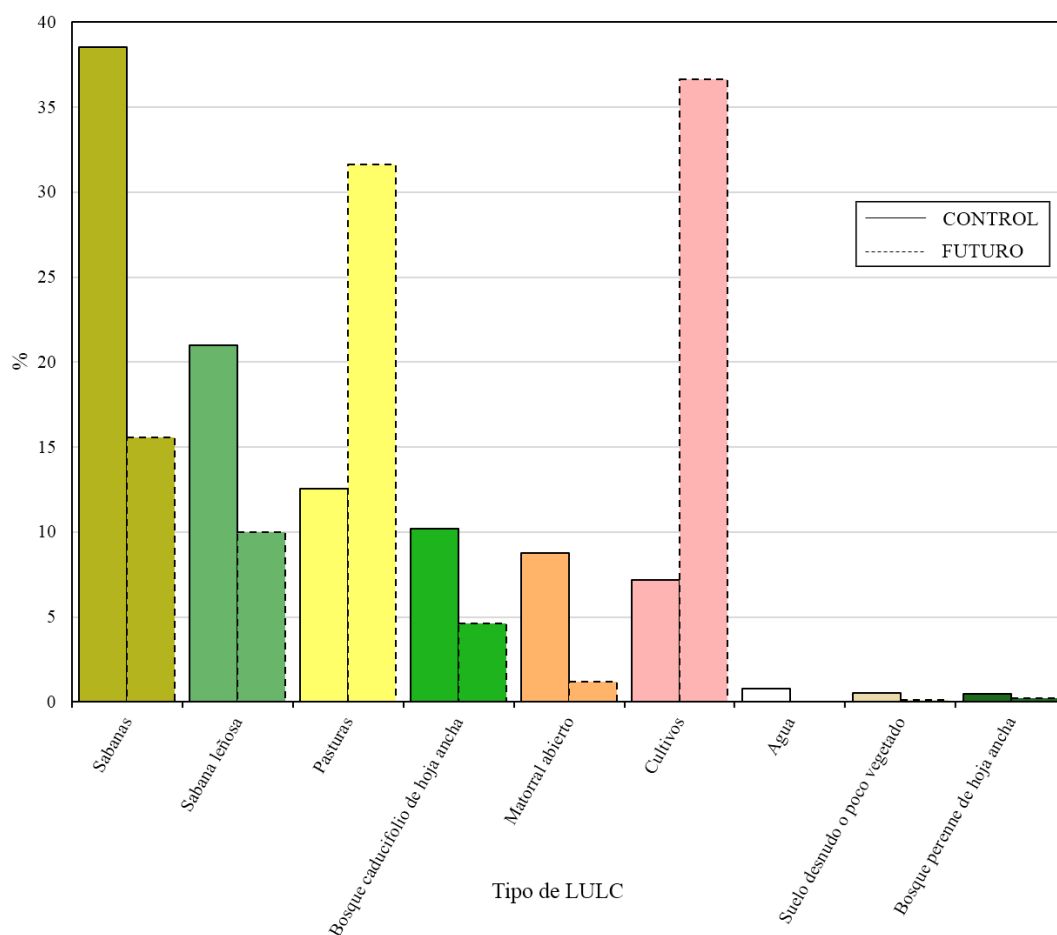


Figura 4.6 Porcentajes del tipo de cobertura de suelo en Chaco Seco del escenario AG_INT para los ensambles CONTROL y FUTURO.

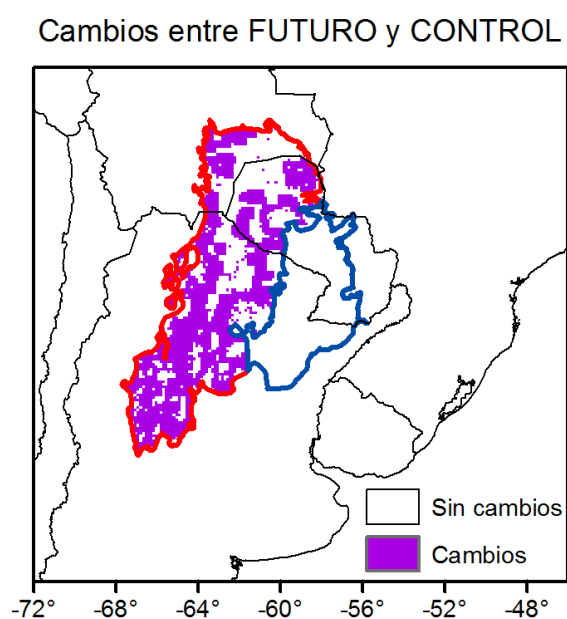


Figura 4.7 Diferencias entre el mapa de cobertura de suelo del ensamble CONTROL con el mapa de cobertura de suelo del ensamble FUTURO.

4.4 Conclusiones del capítulo

El análisis de la evolución de la cobertura de suelo en el Chaco Seco entre 2001 y 2015 revela que el 18% del área sufrió cambios, de los cuales el 53% implicaron una reducción de la cobertura arbórea, reflejando procesos de deforestación. Simultáneamente, la expansión de las tierras agrícolas fue notable, principalmente antes de 2007, año a partir del cual se desacelera, en parte debido a la implementación de la Ley 26.331 de protección de bosques nativos de Argentina. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en otros trabajos como Boletta y otros (2006), Vallejos y otros (2015) y Volante y otros (2016). Boletta y otros (2006) documentaron la rápida deforestación y expansión agrícola en el Chaco, destacando que entre 1976 y 2005 se perdieron aproximadamente 2.1 millones de hectáreas de bosques nativos. Vallejos y otros (2015) encontraron que la tasa de deforestación fue particularmente alta entre 2000 y 2010 debido a la expansión de la agricultura industrial, especialmente la soja, y que las políticas de ordenamiento territorial han tenido un impacto limitado en la mitigación de esta tendencia. Por último, Volante y otros (2016) subrayaron la presión que la agricultura y la ganadería ejercen sobre los ecosistemas nativos y observaron que, tras la implementación de la Ley 26.331, hubo una reducción en la tasa de deforestación, lo que indica que la ley ha tenido un impacto positivo en la conservación de los bosques.

Por otro lado, el escenario AG_INT asume una fuerte apertura del mercado global con baja regulación estatal de los LULCCs (Mosciaro y otros 2022) donde las condiciones favorecen una gran expansión agrícola indiscriminada. El escenario plantea una expansión intensiva de la agricultura exclusivamente dentro del Chaco Seco cubriendo el 68,3% de su área a costa de una considerable reducción de sabanas, bosques y matorrales. El análisis de este escenario en los siguientes capítulos permitirá evaluar el efecto hidroclimático local, no-local y remoto de los LULCCs asumiendo deforestación intensiva durante 5 décadas.

Capítulo 5: Efectos de los LULCCs en el hidroclima regional

5.1 Introducción al capítulo

Este capítulo examina los efectos hidroclimáticos de los dos escenarios planteados en la sección 3.3: OBS_LULCC y AG_INT. Mediante un análisis basado en procesos se evalúan como los cambios de cobertura modifican las propiedades biofísicas, y sus consecuentes efectos en el balance energético e hidrológico.

En todos los casos, las simulaciones se llevan a cabo para el período enero 2014 – junio 2016, solo cambiando los correspondientes mapas de cobertura de suelo. En ambos escenarios, el análisis exploratorio incluyó la evaluación de los cambios en el período completo, incluyendo todas las estaciones. Sin embargo, aquí se decidió mostrar los resultados específicos durante los meses de verano austral (DEF), que es cuando emergen los cambios más significativos. Durante el verano la vegetación está fuertemente activa y las interacciones entre el suelo y la atmósfera son más evidentes en la ecorregión del Gran Chaco (Müller y otros, 2021a), proporcionando una visión más clara de las alteraciones inducidas por el cambio en el uso del suelo. Si bien no se muestran, vale destacar que las estaciones intermedias (otoño y primavera) muestran efectos hidroclimáticos similares de menor magnitud, mientras que el invierno resulta insensible a los LULCCs.

Notar que a lo largo del análisis, el término "efectos locales" se refiere a los efectos que corresponden a los puntos de grilla dentro del Chaco Seco que experimentaron cambios en el uso del suelo (celdas violetas en la Figura 4.5), mientras que el término "efectos no locales" se refiere a aquellos que se encuentran en puntos de grilla que no experimentaron ningún cambio en la cobertura de suelo en el resto del Chaco Seco (áreas en blanco en la Figura 4.5). Por último, los "efectos remotos" abarcan aquellos observados en el área del Chaco Húmedo (áreas en blanco dentro de los límites azules en la Figura 4.7).

5.2 Escenario OBS_LULCC

5.2.1 Cambios en las propiedades de la cobertura del suelo

Casi el 20 % de la cobertura terrestre del Chaco Seco cambió desde 2001 al 2015 (ver Sección 4.1). La Figura 5.1 muestra los cambios en las propiedades biofísicas que son particularmente sensibles a los cambios en el uso del suelo observados: el LAI, el albedo y la resistencia estomática. Para el caso de LAI y albedo Noah-MP genera un ciclo anual a partir de un valor máximo y mínimo de cada uno de ellos, del cual se tomó el promedio entre estos valores para el análisis. El parámetro resistencia estomática es constante a lo largo del tiempo en Noah-MP.

Los cambios en las propiedades se distribuyen en las pequeñas áreas fragmentadas que experimentaron cambios en el uso del suelo. La disminución en el LAI, el aumento en el albedo y la reducción en la resistencia estomática en el centro-este, noreste y límites occidentales del Chaco Seco están asociados con procesos de deforestación (celdas en naranja en la Figura 4.3). Por otro lado, otras áreas que muestran aumentos en el LAI y la resistencia estomática, y disminuciones en el albedo, no están directamente asociados con la deforestación, como se discutió en la Sección 4.1.

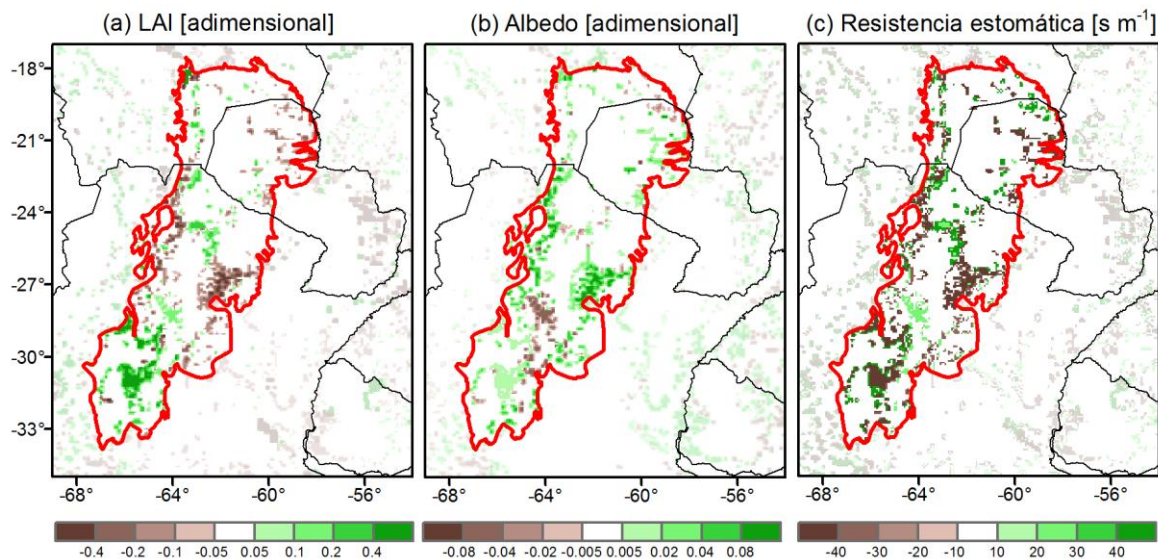


Figura 5.1 Diferencias en las propiedades biofísicas para el escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) LAI, (b) albedo y (c) resistencia estomática. Se utilizó opacidad en todos los paneles para resaltar la región de interés.

5.2.2 Efectos sobre el balance energético

Los cambios en las propiedades biofísicas conducen a una distribución heterogénea de cambios positivos y negativos en los flujos de radiación (Figura 5.2a-c). El patrón de radiación neta está influenciado principalmente por las variaciones en la radiación de onda corta, mientras que los cambios en la radiación de onda larga son mínimos debido a que, a la luz de los parámetros biofísicos del Noah-MP, las variaciones en los valores de emisividad entre PASADO y CONTROL son insignificantes. En promedio, las áreas que experimentaron LULCCs (*local*) experimentaron una reducción del $\sim 2\%$ en la radiación neta, lo que es consistente con el aumento general del albedo (Figura 5.1b) y el consiguiente aumento de la radiación de onda corta saliente. En las áreas restantes del Chaco Seco, donde no se produjeron cambios en el uso del suelo, los cambios positivos y negativos de hasta $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$ se equilibran entre sí, dando como resultado un promedio areal casi nulo.

Los cambios en la radiación neta también se reflejan en los componentes principales del balance de energía, es decir, el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente. La Figura 5.2d-e revela un patrón espacial similar pero con signos opuestos para los cambios en el calor sensible y en el calor latente. Al igual que con los términos de radiación, los cambios son del orden de $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$. Las distribuciones espaciales de los flujos de calor sensible y calor latente desempeñan un papel importante en la determinación de la temperatura cercana a la superficie. La Figura 5.2f muestra que las áreas deforestadas en las zonas del norte y centro-este del Chaco Seco experimentan un calentamiento, mientras que el área del sur muestra un enfriamiento. Ambos cambios se pueden atribuir a las variaciones en el flujo de calor sensible. En promedio, los cambios en la radiación neta conducen a una disminución promedio del $-3,5\%$ en el calor sensible a nivel local y del $0,6\%$ en el resto del Chaco Seco (Figura 5.2e). Por su parte, el calor latente presenta cambios menores o despreciables en todo el Chaco Seco (Figura 5.2d). A pesar de la presencia de señales localmente fuertes (de hasta $\pm 0,4^\circ\text{C}$), los cambios de temperatura promedio espacialmente presentan un ligero aumento debido a los efectos compensatorios de calentamiento y enfriamiento.

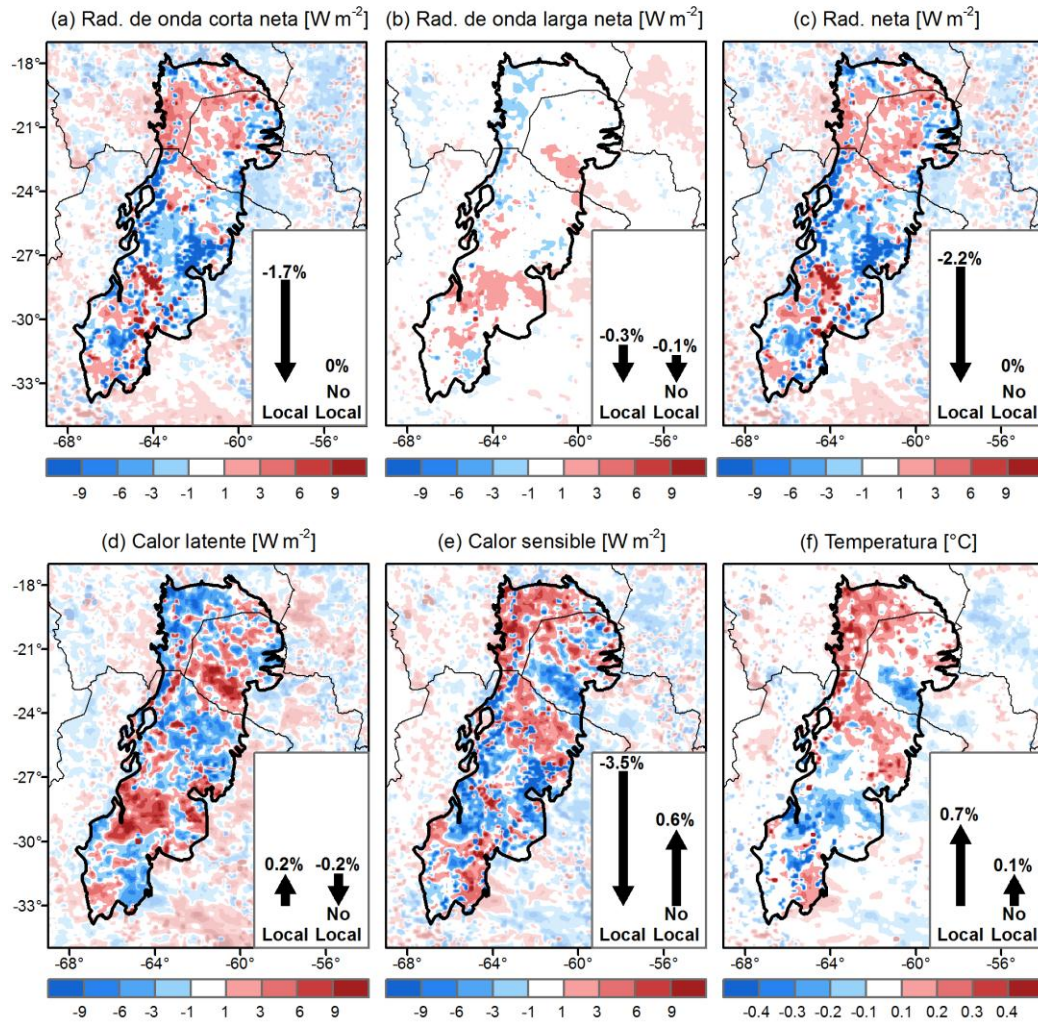


Figura 5.2 Diferencias en los componentes del balance energético para el verano del escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) radiación de onda corta neta, (b) radiación de onda larga neta, (c) radiación neta, (d) calor latente, (e) calor sensible, y (f) temperatura a 2 m. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo (local) y sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Seco (no local).

5.2.3 Efectos en el ciclo del agua

Los cambios en las propiedades biofísicas conducen a condiciones globales más secas en el Chaco Seco, con una disminución promedio de aproximadamente el -1,7 % en la precipitación. Sin embargo, existe una heterogeneidad espacial significativa en los cambios que varían desde -29 mm mes⁻¹ hasta +35 mm mes⁻¹, incluso en áreas que conservan su cobertura nativa (Figura 5.3a). La humedad del suelo (Figura 5.3b) sigue el patrón espacial de la precipitación, con cambios negativos netos tanto en áreas *locales* (-2,6 %) como *no locales* (-0,7 %). De manera consistente, la evapotranspiración también sigue los patrones

de precipitación y humedad del suelo, mostrando cambios localmente significativos con variaciones en el rango de -17% al 18% aproximadamente pero que tienden a compensarse cuando se promedian sobre un área tan grande, resultando en cambios netos insignificantes (ver Figura 5.3c). Cabe destacar que la resistencia estomática se reduce significativamente en las áreas deforestadas, lo que facilitaría la transpiración de las plantas y, en consecuencia, favorecería el aumento evapotranspiración. Una interpretación plausible es que las plantas no son capaces de aprovechar los estomas abiertos debido a la sequedad de los suelos, dado que el Chaco Seco es una región donde el régimen de evapotranspiración está limitado por la disponibilidad de agua en el suelo. La reducción de la precipitación y los suelos más secos terminan afectando el escurrimiento total, que presenta una reducción neta en el Chaco Seco de -2,1 % en áreas *locales* y -5,5 % en áreas *no locales* (Figura 5.3d). Estos resultados sugieren que los cambios observados en el uso del suelo en solo 14 años pueden debilitar el ciclo del hidrológico en el Chaco Seco, llevando a esta región árida a veranos aún más secos.

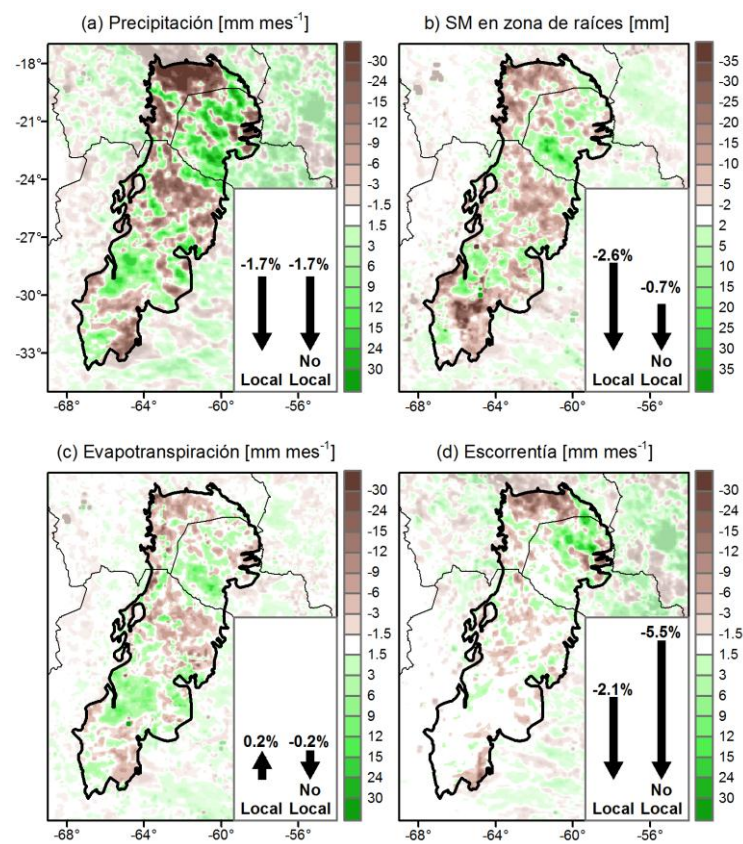


Figura 5.3 Diferencias en los componentes del balance hídrico para el verano del escenario OBS_LULCC (CONTROL-PASADO): (a) precipitación, (b) humedad del suelo, (c) evapotranspiración y (d) escurrimiento. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas de la grilla con cambios en la cobertura del suelo (local) y sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Seco (no local).

5.3 Escenario AG_INT

5.3.1 Cambios en las propiedades de la cobertura del suelo

Los cambios en las propiedades de la superficie del suelo en el escenario OBS_LULCC tienen una estructura granular que ilustra las formas realistas en que progresa la deforestación. Por otro lado, el escenario AG_INT muestra cambios en el LAI, el albedo y la resistencia estomática que presentan una continuidad espacial, coherente con las asunciones de los cambios en el uso del suelo idealizados. En este escenario AG_INT, la expansión de cultivos y pasturas cubre el 64 % del Chaco Seco. La Figura 5.4a-c muestra que reemplazar la vegetación nativa con pasturas y cultivos, conlleva una reducción general del LAI y la resistencia estomática, así como un aumento del albedo. Curiosamente, la antropización de ciertas coberturas nativas resulta en condiciones "más verdes", de acuerdo con los valores predefinidos de las propiedades biofísicas aplicados por el LSM. Por ejemplo, Noah-MP prescribe un mayor LAI para las pasturas (1,7) que para el matorral abierto (1,6).

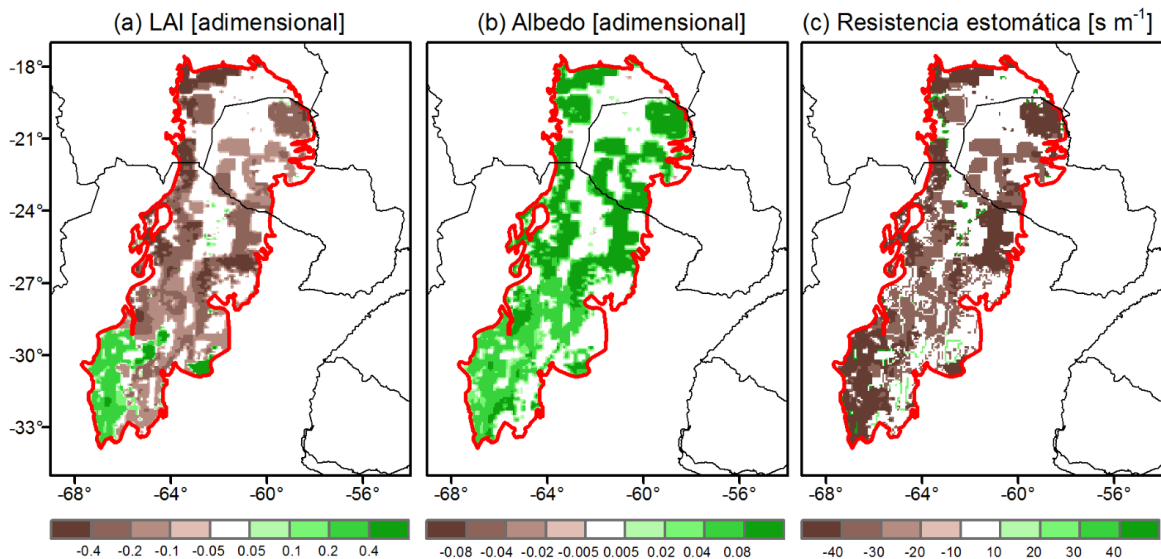


Figura 5.4 Diferencias en las propiedades biofísicas para el escenario AG_INT (FUTURO-CONTROL): (a) LAI, (b) albedo y (c) resistencia estomática. Se utilizó opacidad en todos los paneles para resaltar la región de interés.

5.3.2 Efectos sobre el balance energético

La expansión intensiva de la agricultura simulada en el Chaco Seco resultó en una disminución general de la radiación total neta, que se reduce en un -9,5 % (Figura 5.5c). Esta reducción se debe principalmente a los cambios en la radiación de onda corta (Figura 5.5a).

Las áreas donde se imponen los cambios en el uso del suelo presentan un albedo más alto (Figura 5.4b), lo que reduce la radiación de onda corta neta en un -15,6 % (Figura 5.5a) debido al aumento de la radiación de onda corta saliente. Los cambios en el LAI, la radiación de onda larga y la temperatura cercana a la superficie siguen patrones similares (Figura 5.4a, Figura 5.5b y Figura 5.5f). En el suroeste, donde el LAI aumenta, hay una disminución en la radiación de onda larga neta y una temperatura cercana a la superficie más fría. Por otro lado, las regiones con un LAI reducido en el resto del Chaco Seco resultan en un aumento de la radiación de onda larga neta y temperaturas más cálidas. Esto se puede explicar por la reducción de la cobertura vegetal, que disminuye la sombra y conduce al calentamiento de la superficie y al aumento de la radiación de onda larga saliente. El efecto opuesto ocurre en áreas con un mayor LAI. Aunque los valores promedio de área a nivel local tienden a ser pequeños debido a los cambios positivos y negativos compensatorios, los cambios de temperatura pueden alcanzar valores de hasta $\pm 0,6$ °C. Cabe destacar que la reducción general en la radiación total neta también es evidente en los flujos superficiales turbulentos generalmente más débiles (Figura 5.5d-e). El calor latente disminuye en un -4,2 %, mientras que el calor sensible disminuye en un -11 % en promedio.

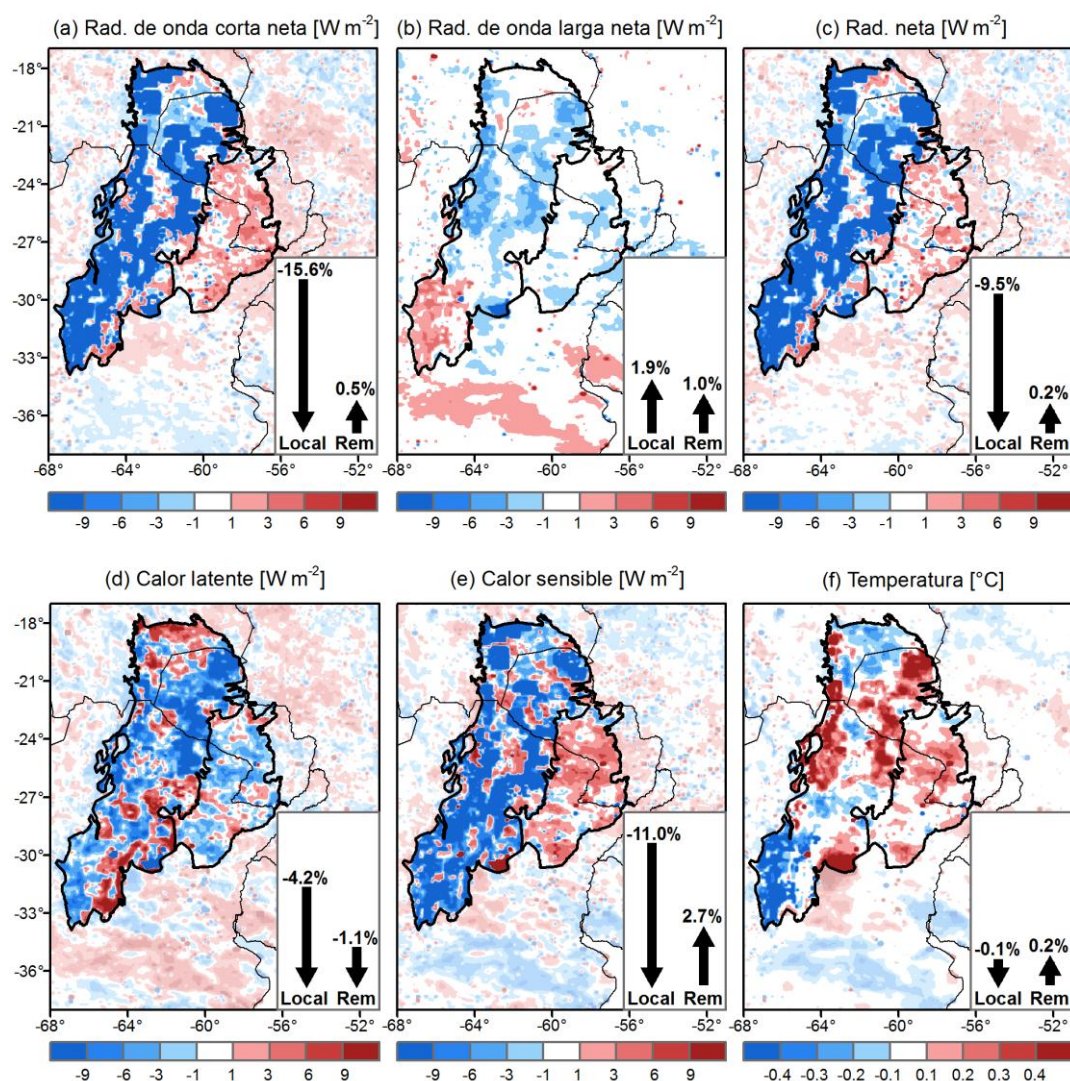


Figura 5.5 Diferencias en los componentes del balance energético para el verano del escenario AG_INT (FUTURO-CONTROL): (a) radiación de onda corta neta, (b) radiación de onda larga neta, (c) radiación neta, (d) calor latente, (e) calor sensible, y (f) temperatura a 2 m. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo en Chaco Seco (Local) y sobre celdas sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Húmedo (Rem).

La expansión agrícola impuesta en el Chaco Seco tiene baja influencia en el balance de energía del Chaco Húmedo (Figura 5.5). La radiación neta presenta un ligero aumento consistente con el aumento general de la radiación de onda corta neta (Figura 5.5a-c). El patrón espacial de cambios en el calor latente y el calor sensible es similar pero con signos opuestos, con una disminución del calor latente en un -1,1 % y un aumento del calor sensible en un 2,7 % (Figura 5.5d-e). La temperatura cercana a la superficie muestra un ligero calentamiento consistente con el aumento del calor sensible (Figura 5.5f).

5.3.3 Efectos en el ciclo del agua

La extensa expansión de cultivos y pasturas en el Chaco Seco resulta en veranos generalmente más secos en el Gran Chaco (Figura 5.6). Las áreas que experimentaron LULCCs directos (efectos *locales*) muestran una disminución promedio en la precipitación estival de aproximadamente un -7 % y un -9,3 % en la humedad del suelo. Los suelos más secos causan una reducción en la evapotranspiración de alrededor de un -4,2 %, con una distribución espacial de cambios similar a la observada para la precipitación y la humedad del suelo, excepto en el sureste del Chaco Seco. Del mismo modo, la escorrentía se reduce en promedio en un -5 %. Si bien las reducciones promedio en los componentes del balance hídrico representan menos del 10 % en magnitud, casi la mitad de la zona con LULCCs muestra cambios negativos significativos de aproximadamente -30 %. Estos cambios sustanciales tienen el potencial de tener un impacto significativo en la región, teniendo en cuenta su naturaleza árida.

Los efectos *remotos* generales en la región del Chaco Húmedo resultan en veranos más secos, similares a los observados en el Chaco Seco pero con menor intensidad (Figura 5.6). Los cambios en la precipitación indican una tendencia general hacia un mayor nivel de aridez en la mayor parte del Chaco Húmedo, excepto en áreas aisladas que experimentan aumentos significativos (Figura 5.6a). En promedio, la precipitación estival disminuye en aproximadamente un -4 %, aunque hay áreas con cambios de hasta $\pm 30 \text{ mm mes}^{-1}$. Estos cambios en la precipitación se acompañan de patrones consistentes en la humedad del suelo, que también muestran una ligera disminución promedio de aproximadamente un -1,2 % (Figura 5.6b). Además, la evapotranspiración experimenta una reducción promedio de alrededor de un -1,1 %, con disminuciones localizadas de hasta un -8 % en partes específicas del Chaco Húmedo. Las condiciones generalmente más secas contribuyen a una reducción en la escorrentía de aproximadamente un -6,2 % en promedio. Curiosamente, esta reducción es mayor en el Chaco Húmedo que en el Chaco Seco (-4,5 %). En resumen, los resultados sugieren que la expansión de la agricultura en el Chaco Seco intensifica la aridez de esta región, a la vez que extiende condiciones más secas hacia el Chaco Húmedo.

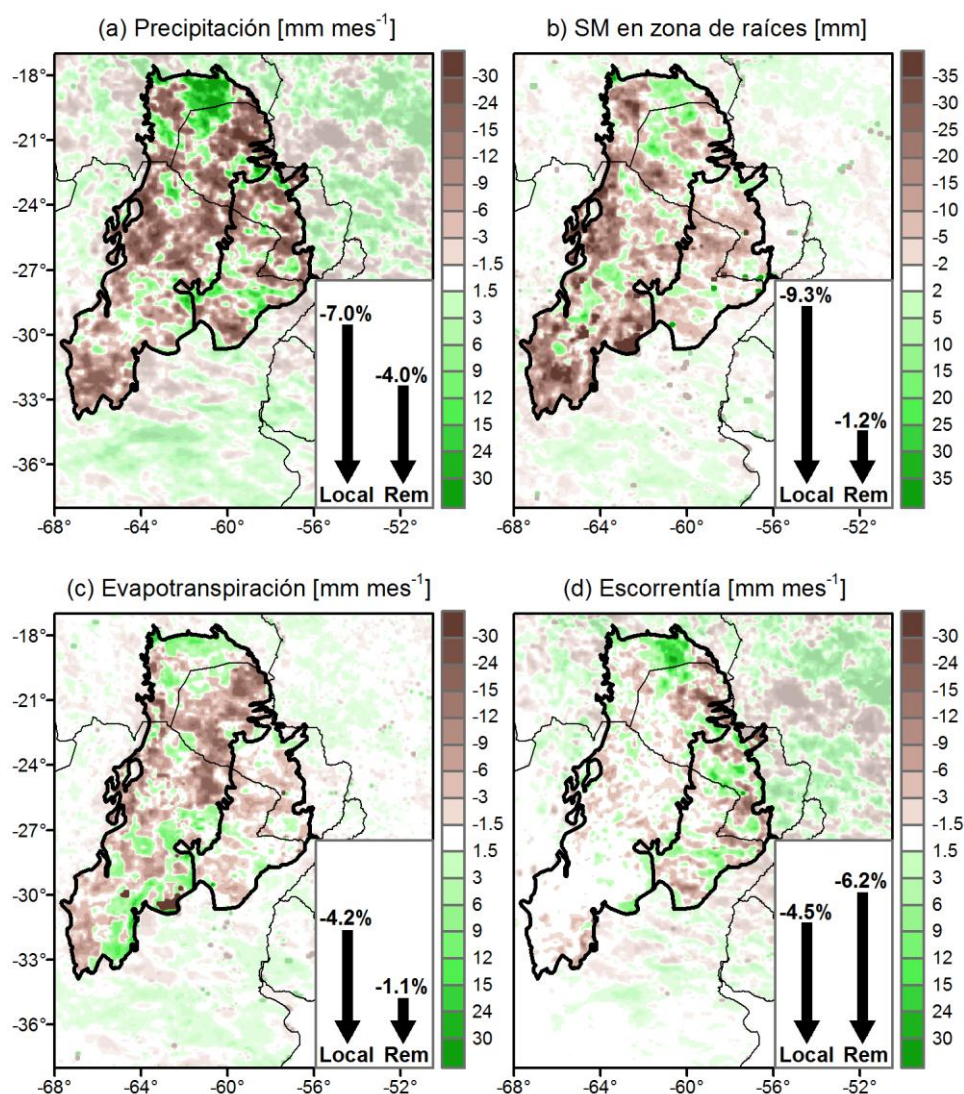


Figura 5.6 Diferencias en los componentes del balance hídrico para el verano del escenario OBS_LULCC (FUTURO-CONTROL): (a) precipitación, (b) humedad del suelo, (c) evapotranspiración y (d) escorrentía. Se utilizó opacidad para resaltar la región de interés. Los recuadros muestran las diferencias porcentuales promediadas sobre las celdas que sufrieron cambios en la cobertura del suelo en Chaco Seco (Local) y sobre celdas sin cambios en la cobertura del suelo en el Chaco Húmedo (Rem).

5.4 Análisis basado en procesos

Los resultados de los experimentos demuestran de manera consistente que la expansión agrícola en la región del Chaco Seco conduce a veranos más secos y cálidos, independientemente de la magnitud de la expansión agrícola. Siempre es un desafío dilucidar los procesos que explican un cambio específico en una variable dada debido a los varios factores que actúan de manera simultánea, como se muestra en la Fig. 1 de Santanello y otros (2018). Por lo tanto, el objetivo de este análisis es identificar los mecanismos más relevantes

que explican los efectos de los LULCCs en el hidroclima del Gran Chaco, reconociendo qué otros procesos, más difíciles de identificar, también pueden tener cierto impacto en los resultados obtenidos. La Figura 5.7 presenta un diagrama esquemático que resume una interpretación plausible de los procesos clave involucrados.

La intensificación de la agricultura en la región del Chaco Seco conlleva a variaciones significativas en las propiedades biofísicas, en particular el LAI y el albedo. Aunque la resistencia estomática también se reduce en gran medida, lo que facilitaría la transpiración de las plantas dando lugar a una mayor evapotranspiración, su impacto sigue siendo restringido en los suelos normalmente secos de esta región debido a la limitada disponibilidad de agua. Esto explica la escasa sensibilidad observada de la evapotranspiración a los cambios en la resistencia estomática. En consecuencia, el enfoque principal se centra en el efecto de la reducción del LAI, que conduce a un aumento de la temperatura de la superficie debido a la disminución de la protección de la radiación por parte de la vegetación. Este aumento de la temperatura aumenta la radiación de onda larga saliente, que resulta en una disminución de la radiación de onda larga neta. Por otro lado, el aumento del albedo disminuye la radiación de onda corta neta al reflejar una mayor fracción de la radiación de onda corta entrante. Estos cambios en el balance de energía conducen a una reducción en la radiación neta de la superficie, lo que concuerda con los mecanismos de retroalimentación propuestos por Eltahir (1998), Seneviratne y otros (2010) y Santanello y otros (2018).

Los cambios en la radiación neta de la superficie se equilibran con la suma de los flujos de calor latente y sensible, considerando que el flujo de calor del suelo se considera insignificante en períodos largos. Así, la disminución en la radiación neta es equivalente a una disminución en la suma de los flujos de calor latente y sensible. Este flujo de energía total desde la superficie terrestre hacia la atmósfera representa la energía estática húmeda (MSE, por sus siglas en inglés), que caracteriza la energía global dentro de la capa límite. En consecuencia, una reducción en la radiación neta y, por lo tanto, una disminución en la energía disponible en la superficie terrestre, puede asociarse con condiciones más estables en la capa límite planetaria, lo que impide o limita la generación de precipitación convectiva (Eltahir y Pal, 1996; Eltahir, 1998). Nuestra interpretación es que la reducción de la energía en la atmósfera, combinada con la disminución del agua precipitable (PW, no mostrada), contribuye a la estabilización general de la capa límite, resultando en menos lluvia convectiva. Esta disminución en la precipitación contribuye posteriormente a una

disminución en la humedad del suelo, creando un ciclo de retroalimentación, ya que el suelo seco absorbe significativamente menos radiación solar que el suelo húmedo.

Cabe destacar que el análisis de procesos en este estudio incluyó la evaluación de la convergencia de humedad, que puede ser asociada a aumentos/disminuciones de la precipitación. Los cambios en la convergencia de humedad muestran cambios muy heterogéneos que no conducen a conclusiones claras. Esta variable es uno de los elementos más complejos de estimar por su alta heterogeneidad con dependencia de topografía, y resolución tanto espacial como temporal (ver Berbery y otros 1996; Berbery y Rasmusson 1999). Es por ello que, en la cadena de procesos presentada, el esfuerzo se focalizó en la variable “agua precipitable” que muestra un patrón muy claro y consistente con los cambios obtenidos en precipitación. Si bien se reconoce que esta variable no reemplaza la convergencia de humedad, se entiende que ambas contribuyen a la comprensión de las condiciones atmosféricas. Así, una reducción de agua precipitable sugiere menos humedad disponible para el desarrollo de procesos convectivos.

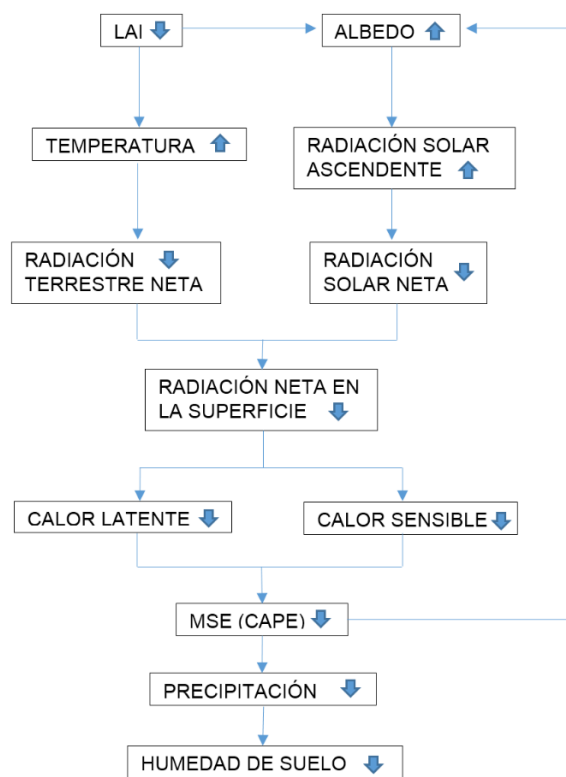


Figura 5.7 Diagrama esquemático de las interacciones suelo-atmósfera afectadas por la expansión agrícola. Las flechas hacia arriba representan aumentos, mientras que las flechas hacia abajo representan disminuciones.

5.5 Conclusiones del capítulo

El análisis de los escenarios OBS_LULCC y AG_INT en el Chaco Seco cómo los cambios en el uso del suelo pueden alterar las propiedades biofísicas y los balances energéticos e hídricos de la región. Los LULCCs experimentados dentro del Chaco Seco entre 2001 hasta 2015, que fueron impulsados por la deforestación y la expansión agrícola, han llevado a una disminución del índice de área foliar (LAI), un aumento del albedo y una reducción de la resistencia estomática en áreas fragmentadas.

En ambos escenarios, los LULCCs y los correspondientes cambios en las propiedades biofísicas, resultan en un aumento de las temperaturas y una reducción de las precipitaciones a nivel local, que puede extenderse hasta regiones que no sufrieron LULCCs como el Chaco Húmedo, como se demuestra en el escenario AG_INT. Esto se produce por una serie de mecanismos donde la reducción del LAI aumenta la temperatura de la superficie debido a la menor protección contra la radiación solar. Este aumento de temperatura incrementa la radiación de onda larga saliente y reduce la radiación de onda larga neta. Además, el aumento del albedo refleja más radiación de onda corta entrante, disminuyendo la radiación de onda corta neta. Como resultado, la radiación neta de la superficie disminuye, afectando los flujos de calor latente y sensible, lo que genera condiciones más estables en la capa límite, limitando la precipitación convectiva, y por ende, suelos más secos, que absorben menos radiación solar, perpetuando un ciclo de retroalimentación negativo.

Estos resultados, aunque contraintuitivos (ver discusión en Capítulo 6), son consistentes con los obtenidos en otros trabajos que se enfocaron en la pérdida de bosques amazónicos como Sierra y otros (2022). Este trabajo estudia los impactos de la deforestación amazónica sobre la precipitación durante el verano austral en el periodo (2001–2011) en términos de equilibrios hidrológicos y energéticos, encontrando que la deforestación conduce a una reducción de la radiación neta superficial, la evaporación, la convergencia de la humedad y las precipitaciones en toda la cuenca del Amazonas. Por su parte, Butt y otros (2023) encontraron que la rápida pérdida de bosques en el sur de la Amazonia durante el período 2000-2020 provocó un fuerte calentamiento a distancias de hasta 100 km de donde se produjo la pérdida de bosques. Finalmente, Smith y otros 2023 evaluaron el impacto sobre las precipitaciones de la pérdida de bosques de la región de los trópicos durante el período 2003-2017, concluyendo que la pérdida de dichos bosques tropicales causa disminuciones estadísticamente significativas en la precipitación media anual.

Capítulo 6: Discusión y conclusiones

Sudamérica es una de las zonas del mundo más afectadas por los procesos de deforestación, generando serios problemas ambientales. Esto se debe principalmente a la expansión de la agricultura y la cría de ganado, así como a la tala ilegal. En particular, la región del Gran Chaco, una de las más grandes de Sudamérica, ha estado experimentando tasas de deforestación alarmantes en las últimas décadas. En particular, la reconocida diversidad biológica del Chaco Seco, que cuenta con una amplia variedad de flora y fauna, está siendo seriamente amenazada por el avance de la frontera agrícola.

En esta investigación se exploraron los LULCCs más predominantes en el Chaco Seco desde 2001 hasta 2015 y sus efectos en el clima regional. Además, se examinaron otros efectos que podrían desarrollarse si la expansión agrícola intensiva (de cultivos y pasturas) en el Chaco Seco persiste en el tiempo. Para abordar esto, se realizaron un conjunto de simulaciones climáticas con el modelo WRF. Los experimentos de sensibilidad consistieron en simular un período común pero bajo diferentes escenarios de LULCCs. Los mapas de tipos de suelo se basaron en la información provista por el satélite MODIS, que se adaptaron para su utilización en Noah-MP, la componente de suelo de WRF.

El análisis de los resultados muestra que la calidad del producto MODIS en la región de interés es adecuada para este estudio. Los valores de confianza son altos en casi todo el dominio, en general superiores al 75%. Curiosamente, el Chaco Seco es la región del dominio con los valores de confianza más bajos, sin embargo, están por encima del 71% en casi toda el área. Además, se encontró una mejora en los niveles de confianza del producto a lo largo del tiempo durante el período de 2001 a 2015. No obstante, la incertidumbre remanente en los datos de MODIS es lo que explica posibles clasificaciones erróneas en ciertos puntos de los mapas de cobertura que conducen a registrar cambios en el uso del suelo entre 2001 y 2015, clasificados como "ilógicos", ya que no son posibles en el mundo real.

Para explorar los efectos de los LULCCs del Chaco Seco sobre el clima regional se llevaron a cabo tres conjuntos de simulaciones (ensambles) para el período enero de 2014 - junio de 2016. Aunque simulaciones más largas podrían ofrecer una comprensión bajo diversas

condiciones atmosféricas a gran escala, la duración de estas simulaciones de alta resolución (determinada por la capacidad computacional) proporciona valiosas perspectivas para evaluar los procesos de interacción entre la tierra y la atmósfera, que ocurren en escalas de tiempo diarias a mensuales. El primer ensamble utilizó el mapa de cobertura de suelo MODIS correspondiente a 2015 (CONTROL). El segundo utilizó el mapa de cobertura de suelo MODIS correspondiente a 2001 (PASADO) para explorar los cambios en el clima desde 2001 hasta 2015. El tercer conjunto empleó una versión modificada del mapa de cobertura de suelo de 2015 en la que se expandieron artificialmente las áreas de cultivos y pasturas existentes en 2015 en el Chaco Seco (FUTURO).

Previo a la comparación de los ensambles se evaluó el rendimiento de WRF en la región de estudio, comparando la simulación CONTROL con datos observacionales de precipitación, humedad del suelo (en la superficie y en la zona de raíces), y temperatura a 2 metros. La comparación incluyó tanto observaciones grilladas basadas en mediciones in-situ como remotas. La evaluación demuestra que el modelo WRF tiene muy buen desempeño para la región de interés. La precipitación simulada muestra una clara semejanza con las observaciones en el Gran Chaco, con ligeros sesgos negativos en el Chaco Húmedo. La humedad del suelo en la superficie y en la zona de raíces coincide estrechamente con los productos derivados de datos captados de manera remota en el Gran Chaco, aunque, consistentemente con los sesgos negativos en la precipitación, se observan sesgos secos en el Chaco Húmedo. Por su parte, los coeficientes de correlación para la temperatura en la superficie indican una fuerte similitud con las observaciones en el Gran Chaco, aunque con una variabilidad estacional ligeramente mayor. Estos resultados refuerzan la efectividad del modelo WRF y las parametrizaciones seleccionadas en la simulación del hidroclima del sur de América del Sur, alineándose con los resultados de nuestros esfuerzos de investigación previos (Lee y Berbery, 2012; Müller y otros, 2014; Sörensson y Berbery, 2015; Müller y otros, 2016).

Los mapas MODIS revelan que las categorías dominantes de cobertura del suelo en el Chaco Seco incluyen sabana, sabana leñosa, bosque, pasturas, matorral y cultivo. A lo largo del período de 2001 a 2015, se observaron cambios en la cobertura del suelo en un 18% de toda la región del Chaco Seco. Estos cambios pueden clasificarse como deforestación (53%), ilógicos (46%) y otros (1%). Las tierras agrícolas, específicamente los cultivos y pasturas, experimentaron un aumento sostenido en la región, especialmente hasta 2007. Los cambios en la cobertura del suelo debidos a procesos de deforestación, principalmente caracterizada

por la pérdida de bosques, se ha observado en las fronteras del centro-este, noreste y oeste del Chaco Seco, consistente con los hallazgos de estudios recientes (Maertens y otros, 2021; Mosciaro y otros, 2022). Los cambios se observaron en áreas pequeñas y fragmentadas, donde se observa una disminución en el LAI, un aumento en el albedo y un debilitamiento de la resistencia estomática. Estos hallazgos son consistentes con otros estudios (por ejemplo, Jiang y otros, 2021), que reportan que la deforestación conduce a un menor LAI y un mayor albedo de la superficie. En otras áreas donde ocurrieron diferentes cambios en la cobertura de suelo (de matorrales abiertos a suelos desnudos, de pasturas a cultivos, entre otros), algunas propiedades biofísicas muestran tendencias opuestas, lo que resulta en un patrón heterogéneo de cambios en las propiedades.

Las simulaciones muestran que los LULCCs producidos entre 2001 y 2015 y los cambios asociados en las propiedades biofísicas llevaron a una distribución desigual de cambios positivos y negativos en los flujos de radiación, afectando principalmente a la radiación neta, el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente. Espacialmente, los cambios en el calor sensible influyeron en la temperatura cercana a la superficie, provocando un calentamiento en las áreas deforestadas y un enfriamiento en las áreas con otros LULCCs. Los cambios en las propiedades biofísicas y en el balance de energía también afectaron el ciclo del agua, provocando condiciones generales más secas en el Chaco Seco. La precipitación mostró cambios significativos de ambos signos, pero con una disminución neta local. La humedad del suelo siguió el patrón de la precipitación, mostrando cambios netos negativos locales. Los cambios en la precipitación y la humedad del suelo se reflejan en la evapotranspiración y en la escorrentía total, que experimentan cambios netos negativos. Los hallazgos sugieren que los cambios observados en la cobertura del suelo debilitaron el ciclo del agua en el Chaco Seco, favoreciendo la ocurrencia de veranos más secos. Las condiciones más secas en una región de por sí es de naturaleza árida, y donde la disponibilidad de agua es escasa, puede tener un impacto negativo significativo en diferentes sectores productivos.

En la actualidad no hay indicios de que la deforestación se vaya a frenar en el Chaco Seco. Asumiendo un escenario de fuerte apertura del mercado global con una regulación mínima (Mosciaro y otros, 2022), se diseñó un conjunto de simulaciones donde se contempla la expansión agrícola de las áreas agrícolas existentes dentro del Chaco Seco y evaluamos las posibles consecuencias para el clima regional. Para esto, se diseñó un mapa de cobertura del suelo que asume una expansión de las áreas de cultivo y pasturas existentes sobre zonas con vegetación nativa dentro del Chaco Seco, como sabanas, sabanas leñosas, bosques y

matorrales. Consistentemente con los efectos antes encontrados para los LULCCs asociados con la deforestación, se observó una disminución general del LAI y de la resistencia estomática, y un aumento del albedo a nivel local.

De acuerdo a las simulaciones, la intensiva expansión agrícola de años recientes produce cambios significativos en el balance de energía, con reducciones adicionales en la radiación neta y debilitamiento de los flujos turbulentos en superficie. Estos cambios alteran el ciclo del agua a nivel local, provocando condiciones más secas con disminución significativa de la precipitación, humedad del suelo, evapotranspiración y escorrentía. En síntesis, la extensa expansión de cultivos y pasturas en el Chaco Seco llevó a veranos más secos, con implicaciones para sus ecosistemas y recursos hídricos. Además, la expansión agrícola tuvo efectos remotos en el Chaco Húmedo, extendiendo las condiciones más secas a esta región. El Chaco Húmedo también experimentó una reducción de la precipitación, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la escorrentía, aunque en menor medida que el Chaco Seco.

A priori, se podría suponer que ante un mismo evento de precipitación los cultivos en una parcela deforestada tienen menor capacidad de absorción del agua, y por ende menor capacidad para evapotranspirar. Entonces, es de suponer que la humedad del suelo aumenta, incrementando la percolación y subiendo el nivel freático. Probablemente esto se vería con claridad si se realizaran simulaciones desacopladas, sólo utilizando modelos de suelo o hidrológicos (ej., Noah-MP, VIC, etc.) forzados por variables meteorológicas observadas o reanálisis. Sin embargo, en esta investigación se hizo uso de un modelo climático capaz de simular las complejas interacciones entre el uso del suelo, los cambios en la cobertura y los ciclos de energía y agua en todos los pasos de tiempo. Como se indica en la figura 5.7 el reemplazo de bosques por cultivo disminuye el LAI y aumenta el albedo, lo que favorece el calentamiento del suelo, aumenta la radiación solar reflejada por el mismo, y por ende, disminuye la radiación neta en superficie. Esto conduce a una disminución de los flujos turbulentos en superficie y a una capa límite planetaria más estable y con condiciones desfavorables para la ocurrencia de precipitación, lo que genera condiciones generalizadas más secas. Estos resultados, contraintuitivos en principio, son consistentes con los obtenidos por Sierra y otros (2022), Butt y otros (2023) y Smith y otros (2023) para el Amazonas, o por Jiang y otros (2021) para todo Sudamérica, quienes también encontraron que la deforestación conduce a condiciones más secas y cálidas.

Los resultados de esta investigación indican que la expansión de la agricultura y los procesos de deforestación correspondientes, alteran el hidroclima regional a través de cambios locales, no locales y remotos de diferentes magnitudes, lo que resulta en veranos australes con menor precipitación y suelos más secos y cálidos. Estos cambios en precipitación podrían contribuir a la interrupción y reversión de la tendencia positiva de precipitación observada en el Gran Chaco desde los años '70. La comunidad científica atribuyó este cambio de tendencia a la variabilidad climática de gran escala (Agosta y Compagnucci, 2012; Lovino y otros, 2018). Sin embargo, la alteración de los procesos de interacción suelo-atmósfera derivados de los cambios de cobertura puede interpretarse como un segundo factor influyente en el cambio de tendencia.

Por último, reconocemos las incertidumbres inherentes asociadas con los modelos que pueden limitar la representación completa de los procesos físicos complejos relacionados con la deforestación, por ejemplo, al imposibilitar representar raíces a una profundidad mayor de 2m, o al no considerar aspectos ecofisiológicos claves como el gran consumo de agua por parte de algunas vegetaciones leñosas. Sin embargo, destacamos que los modelos climáticos ofrecen ventajas distintivas, incluyendo la capacidad de mantener la consistencia física dentro del Sistema Tierra, simular una amplia gama de procesos y facilitar experimentos controlados mediante la modificación de las condiciones iniciales y de frontera. Estas características hacen que los modelos climáticos sean la única herramienta capaz de explorar la intrincada cadena de procesos afectados por cambios en las condiciones iniciales y de frontera, un análisis que no puede ser replicado utilizando datos observados o reanálisis. Además, la escasa variabilidad intramodelo junto con la gran habilidad demostrada por el modelo WRF para simular las variables fundamentales —un reconocimiento ya reflejado en estudios previos— refuerza la confianza en su capacidad para capturar los procesos subyacentes. Por lo tanto, nuestros experimentos proporcionan un enfoque válido y único para analizar la sensibilidad de las interacciones físicas tierra-atmósfera a diferentes escenarios de cobertura del suelo.

Como línea futura de investigación se propone avanzar en el desarrollo de modelos de vegetación dentro de los modelos climáticos para representar de manera más realista las características de la misma y para poder incorporar aspectos ecológicos y fisiológicos que puedan ser determinantes en el balance hídrico. Además, se pretende realizar experimentos similares con simulaciones en períodos más largos permitiendo repetir el análisis ante diferentes escenarios de variabilidad climática.

APÉNDICE A

Opciones de esquemas para diversos procesos físicos disponibles en Noah-MP (Niu y otros, 2011)

1. Vegetación Dinámica

Existen dos opciones para la vegetación dinámica: (1) off y (2) on. Cuando se selecciona (2), el LAI y la Fveg se predicen a partir del modelo de hojas dinámicas como se describe en la sección 2.3.1, y la opción para la resistencia estomática debe ser del tipo Ball-Berry. Cuando se selecciona (1), se prescribe el LAI mensual para varios tipos de vegetación, el Fveg proviene de valores climatológicos mensuales de Fveg, y la opción para la resistencia estomática puede ser del tipo Ball-Berry o del tipo Jarvis.

2. Resistencia Estomática

Existen dos opciones para Resistencia estomática: (1) tipo Ball-Berry (Ball y otros, 1987; Collatz y otros, 1991, 1992; Sellers y otros, 1996; Bonan, 1996) and (2) tipo Jarvis (Jarvis, 1976). La resistencia estomática del tipo Ball-Berry para las hojas iluminadas por el sol y las hojas sombreadas está relacionada con sus tasas de fotosíntesis, que son controladas por la radiación fotosintéticamente activa (PAR) para las hojas iluminadas y sombreadas, respectivamente. Chen y otros (1996) describieron en detalle el esquema de resistencia estomática del tipo Jarvis. El esquema se modificó para acomodar el LAI iluminado por el sol y el LAI sombreado, así como su PAR asociada.

3. Factor de humedad del suelo que controla la resistencia estomática (β)

Se implementan tres opciones para este factor: (1) tipo Noah usando la humedad del suelo, (2) tipo CLM usando potencial mátrico y (3) tipo SSiB también usando potencial mátrico pero expresado por una función diferente (Xue y otros, 1991). El factor tipo Noah se parametriza en función de la humedad del suelo:

$$\beta = \sum_{i=1}^{N_{root}} \frac{\Delta z_i}{z_{root}} \min \left(1.0, \frac{\theta_{liq,i} - \theta_{wilt}}{\theta_{ref} - \theta_{wilt}} \right) \quad A.1$$

donde θ_{wilt} y θ_{ref} son humedad del suelo en el punto de marchitez ($m^{-3}m^{-3}$) y humedad del suelo de referencia ($m^{-3}m^{-3}$) (cerca de la capacidad de campo), respectivamente. Ambos dependen del tipo de suelo. N_{root} y z_{root} son el número total de capas de suelo que contienen raíces y la profundidad total de la zona de raíces, respectivamente. El factor tipo CLM (Oleson y otros, 2004) es una versión refinada del de BATS (Yang y Dickinson, 1996):

$$\beta = \sum_{i=1}^{N_{root}} \frac{\Delta z_i}{z_{root}} \min \left(1.0, \frac{\psi_{wilt} - \psi_i}{\psi_{wilt} - \psi_{sat}} \right) \quad A.2$$

donde $\psi_i = \varphi_{sat}(\theta_{liq,i}/\theta_{sat})^{-b}$ es el potencial matricial de la i ésima capa del suelo, ψ_{sat} es el potencial matricial saturado, y ψ_{wilt} es el potencial matricial de marchitez, que es -150 m independientemente de la vegetación y los tipos de suelo. El factor β tipo SSiB es:

$$\beta = \sum_{i=1}^{N_{root}} \frac{\Delta z_i}{z_{root}} \min(1.0, 1.0 - e^{-c2 \ln(\psi_{wilt}/\psi_i)}) \quad A.3$$

donde $c2$ es un factor de pendiente que oscila entre 4,36 para cultivos y 6,37 para arbustos de hoja ancha (ver Xue y otros, 1991). El factor β tipo CLM muestra un rango de variación más agudo y estrecho con la humedad del suelo que el tipo Noah. El factor SSiB β ($c2 = 5,8$) es incluso más pronunciado que el tipo CLM. Estas tres opciones representan una gran incertidumbre a la hora de formular el factor β en los LSMs.

4. Escorrentía superficial y subterránea

Existen cuatro opciones para los esquemas de escorrentía. La opción 1 es el esquema de escorrentía basado en TOPMODEL con el modelo de aguas subterráneas simple (SIMGM) (Niu y otros, 2007). La opción 2 es un esquema de escorrentía basado en TOPMODEL con un nivel freático de equilibrio (SIMTOP) (Niu y otros, 2005). Al igual que SIMGM, SIMTOP parametriza tanto la escorrentía superficial como la subterránea como funciones de la profundidad del nivel freático, pero con una base sellada de la columna de suelo (condición de límite inferior de flujo nulo) de acuerdo con una de las suposiciones de

TOPMODEL, es decir, la disminución exponencial de la conductividad hidráulica saturada. La opción 3 es un esquema de escorrentía superficial basado en el exceso de infiltración, junto con un esquema de escorrentía subsuperficial de drenaje gravitacional utilizado en el modelo original Noah (Schaake y otros, 1996). La opción 4 es el esquema de escorrentía BATS, que parametriza la escorrentía superficial como una función de la cuarta potencia de la humedad del suelo en los primeros 2 metros (grado de saturación) y la escorrentía subsuperficial como un drenaje gravitacional (Yang y Dickinson, 1996).

5. Coeficiente de intercambio superficial para el calor, C_H

Se implementan dos opciones. La opción 1 es la utilizada en Noah versión 3.0 (en adelante Noah V3) (Chen y otros, 1997) (en adelante Chen97):

$$C_H = \frac{\kappa^2}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right) - \psi_h\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right]} \quad A.4$$

donde κ es la constante de von Kármán, L es la longitud de Monin-Obukhov y z es la altura de referencia. z_{0h} y z_{0m} son longitudes de rugosidad para calor y momento, respectivamente, y $z_{0h} = z_{0m} \exp(-\kappa C \sqrt{Re^*})$, donde Re^* es el número de Reynolds de rugosidad y $C = 0,1$. La opción 2 se basa en la teoría de similitud más general de Monin-Obukhov (Brutsaert, 1982), en adelante, M-O:

$$C_H = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z - d_0}{z_{0m}}\right) - \psi_m\left(\frac{z - d_0}{L}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z - d_0}{z_{0h}}\right) - \psi_h\left(\frac{z - d_0}{L}\right) \right]} \quad A.5$$

donde d_0 es la altura de desplazamiento cero y $z_{0h} = z_{0m}$. Ambas opciones toman las mismas funciones de corrección de estabilidad (ψ_m y ψ_h) para condiciones estables e inestables, como lo describe en detalle Chen97. La opción 1 tiene en cuenta la diferencia entre z_{0h} y z_{0m} pero no tiene en cuenta d_0 .

6. Agua líquida sobreenfriada en suelo congelado

Cuando el suelo se congela, el agua cerca de las partículas del suelo permanece en estado líquido debido a las fuerzas capilares ejercidas por las partículas finas del suelo. Por esta

razón, solo el exceso de agua líquida más allá de $\theta_{liqmax,i}$ (el límite superior del agua líquida superenfriada) puede congelarse, y la cantidad de agua líquida para la capa de suelo i es $\theta_{liqmax,i}$ o $\theta_{liq,i}$, la que sea menor. $\theta_{liqmax,i}$ es una función de la temperatura del suelo y la textura (contenido de arcilla) y puede derivarse de varias formas de ecuaciones de disminución del punto de congelación.

Se han implementado dos opciones. La opción 1 toma una forma más general de la ecuación de disminución del punto de congelación (Niu y Yang, 2006) (en adelante, NY06), mientras que la opción 2 toma una variante de la ecuación de disminución del punto de congelación (Koren y otros, 1999) (en adelante, Koren99) con un término adicional, $(1 + 8\theta_{ice})^2$. Este término adicional tiene en cuenta el aumento de la interfaz entre las partículas del suelo y el agua líquida debido al aumento de los cristales de hielo. La opción 2 necesita resolverse de manera iterativa y generalmente produce más agua líquida que la opción 1 debido al término adicional.

7. Permeabilidad del suelo congelado

Se han implementado dos opciones. La opción 1 adopta un esquema propuesto por NY06, que asume que una celda de la cuadrícula del modelo consta de áreas permeables e impermeables y, por lo tanto, utiliza la humedad del suelo total para calcular las propiedades hidráulicas del suelo. La opción 2 hereda el esquema Koren99 en Noah V3, que utiliza solo el volumen de agua líquida para calcular las propiedades hidráulicas. La opción 1, que asume que el hielo del suelo tiene un efecto lineal (menor) en la infiltración, generalmente produce un suelo congelado más permeable que la opción 2, que asume que el hielo del suelo tiene un efecto no lineal (mayor) en la permeabilidad del suelo.

8. Transferencia de radiación

Se han diseñado tres opciones para la transferencia de radiación a través del dosel vegetal en relación con las distribuciones a escala de subgrilla de la vegetación. La opción 1 es el esquema modificado de dos corrientes, brevemente descrito en la sección 2.3.1. Más detalles se pueden encontrar en Yang y Friedl (2003) o Niu y Yang (2004). La opción 1 asume que la probabilidad de brecha es una función del ángulo cenital solar (SZA) y de la estructura tridimensional del dosel vegetal, con un máximo de brecha entre los dos doseles de 1,0 - Fveg (cuando el sol está en la cima). La opción 2 aplica la aproximación de dos corrientes a toda la celda de la cuadrícula, por lo que la probabilidad de brecha entre los doseles es cero.

La opción 3 aplica la aproximación de dos corrientes solo a la fracción vegetada, y la probabilidad de brecha entre los doseles es igual a $1,0 - F_{veg}$. La opción 3 es equivalente a un modelo "mosaico", que generalmente expone demasiada vegetación del sotobosque o nieve a la radiación solar.

9. Albedo superficial de la nieve

Existen dos opciones para el albedo de la superficie de la nieve: una adoptada de BATS (ver Yang y otros, 1997) y la otra de CLASS (Verseghy, 1991). El esquema BATS calcula el albedo de la superficie de la nieve para radiación directa y difusa en bandas de ondas visibles e infrarrojas cercanas (Dickinson y otros, 1993), teniendo en cuenta el albedo de la nieve fresca, las variaciones en la edad de la nieve, el ángulo cenital solar (SZA), el crecimiento del tamaño de los granos y las impurezas (tierra o hollín en la nieve). El esquema CLASS simplemente calcula el albedo general de la superficie de la nieve teniendo en cuenta el albedo de la nieve fresca y la edad de la nieve, y funciona bien para simular la edad de la nieve y el albedo de la superficie. El esquema BATS generalmente produce un albedo de superficie de nieve más alto que el esquema CLASS debido a sus efectos de envejecimiento más débiles.

10. Partición de las precipitaciones en lluvias y nevadas

La partición de la precipitación en lluvia y nieve en la mayoría de los LSM utiliza la temperatura del aire en la superficie, T_{air} , como criterio. Hay tres opciones: (1) la forma funcional relativamente compleja de Jordan (1991), (2) el esquema BATS, que asume que toda la precipitación es nieve cuando $T_{air} < T_{frz} + 2.2K$ y lluvia en caso contrario, y (3) simplemente asumir que toda la precipitación es nieve cuando $T_{air} < T_{frz}$ y lluvia en caso contrario. En las regiones de latitudes medias y costeras donde la temperatura del aire varía con frecuencia alrededor del punto de congelación, la acumulación de nieve modelada es muy sensible a estas opciones.

APÉNDICE B

Tabla de descripción de los tipos de cobertura terrestre utilizados en Noah-MP LSM

Tabla B.1 Leyenda y descripciones de las categorías del producto MCD12C1 según la clasificación de coberturas de suelo del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP, Sulla-Menashe, 2018).

Tipo de cobertura terrestre	Descripción
1 - Bosque perenne de hoja acicular	Dominado por coníferas de hoja perenne (dosel >2m). Cobertura arbórea >60%.
2 - Bosque perenne de hoja ancha	Dominado por árboles siempre verdes latifoliados y palmeados (dosel >2m). Cobertura arbórea >60%.
3 - Bosque caducifolio de hoja acicular	Dominado por árboles de hoja caduca (alerce) (dosel >2m). Cobertura arbórea >60%.
4 - Bosque caducifolio de hoja ancha	Dominado por árboles caducifolios de hoja ancha (dosel >2m). Cobertura arbórea >60%.
5 - Bosque mixto	No está dominado por tipos de árboles caducifolios ni perennes (40-60 % de cada uno) (dosel >2 m). Cobertura arbórea >60%.
6 - Matorrales cerrados	Dominado por plantas leñosas perennes (1-2 m de altura) >60% de cobertura.
7 - Matorrales abiertos	Dominado por plantas leñosas perennes (1-2 m de altura) con una cobertura del 10-60%.
8 - Sabanas leñosas	Cobertura arbórea 30-60% (dosel >2m).
9 - Sabanas	Cobertura arbórea 10-30% (dosel >2m).
10 - Pasturas	Dominado por herbáceas anuales (<2m).
11 - Humedales permanentes	Tierras permanentemente inundadas con 30-60% de cobertura de agua y >10% de cobertura de vegetación.
12 - Cultivos	Al menos el 60% de la superficie es tierra cultivada.
13 - Urbanización	Al menos un 30 % de superficie impermeable, incluidos materiales de construcción, asfalto y vehículos.
14 - Cultivos/vegetación natural	Mosaicos de cultivo a pequeña escala 40-60% con vegetación natural arbórea, arbustiva o herbácea.
15 - Nieve/hielo	Al menos el 60% del área está cubierta por nieve y hielo durante al menos 10 meses al año.
16 - Suelo desnudo o poco vegetado	Al menos el 60% del área son áreas áridas sin vegetación (arena, roca, suelo) con menos del 10% de vegetación.
17 - Agua	Al menos el 60% del área está cubierta por cuerpos de agua permanentes.

APÉNDICE C

Tablas de búsqueda de propiedades de cobertura terrestre en Noah-MP LSM

Tabla C.1 Propiedades biofísicas para tipos de cobertura terrestre según la clasificación IGBP.

Tipo de cobertura terrestre	Fveg	i	rs	rgl	hs	snp	α_{sn}	LAI _{mn}	LAI _{mx}	ϵ_{mn}	ϵ_{mx}	α_{mn}	α_{mx}	Z0 _{mn}	Z0 _{mx}
1 - Bosque perenne de hoja acicular	0,7	4	125	30	47,35	0,080	52	5,00	6,40	0,95	0,95	0,12	0,12	0,50	0,50
2 - Bosque perenne de hoja ancha	0,95	4	150	30	41,69	0,080	35	3,08	6,48	0,95	0,95	0,12	0,12	0,50	0,50
3 - Bosque caducifolio de hoja acicular	0,7	4	150	30	47,35	0,080	54	1,00	5,16	0,93	0,94	0,14	0,15	0,50	0,50
4 - Bosque caducifolio de hoja ancha	0,8	4	100	30	54,53	0,080	58	1,85	3,31	0,93	0,93	0,16	0,17	0,50	0,50
5 - Bosque mixto	0,8	4	125	30	51,93	0,080	53	2,80	5,50	0,93	0,97	0,17	0,25	0,20	0,50
6 - Matorrales cerrados	0,7	3	300	100	42,00	0,030	60	0,50	3,66	0,93	0,93	0,25	0,30	0,01	0,05
7 - Matorrales abiertos	0,7	3	170	100	39,18	0,035	65	0,60	2,60	0,93	0,95	0,22	0,30	0,01	0,06
8 - Sabanas leñosas	0,7	3	300	100	42,00	0,030	60	0,50	3,66	0,93	0,93	0,25	0,30	0,01	0,05
9 - Sabanas	0,5	3	70	65	54,53	0,040	50	0,50	3,66	0,92	0,92	0,20	0,20	0,15	0,15
10 - Pasturas	0,8	3	40	100	36,35	0,040	70	0,52	2,90	0,92	0,96	0,19	0,23	0,10	0,12
11 - Humedales permanentes	0,6	2	70	65	55,97	0,015	59	1,75	5,72	0,95	0,95	0,14	0,14	0,30	0,30
12 - Cultivos	0,8	3	40	100	36,25	0,040	66	1,56	5,68	0,92	0,99	0,17	0,23	0,05	0,15
13 - Urbanización	0,1	1	200	999	999,00	0,040	46	1,00	1,00	0,88	0,88	0,15	0,15	0,50	0,50
14 - Cultivos/vegetación natural	0,8	3	40	100	36,25	0,040	68	2,29	4,29	0,92	0,98	0,18	0,23	0,05	0,14
15 - Nieve/hielo	0	1	999	999	999,00	0,020	82	0,01	0,01	0,95	0,95	0,55	0,70	0,00	0,00
16 - Suelo desnudo o poco vegetado	0,01	1	999	999	999,00	0,020	75	0,10	0,75	0,90	0,90	0,38	0,38	0,01	0,01
17 - Agua	0	0	100	30	51,75	0,010	70	0,01	0,01	0,98	0,98	0,08	0,08	0,00	0,00
18 - Tundra boscosa	0,6	3	150	100	42,00	0,025	55	0,41	3,35	0,93	0,93	0,15	0,20	0,30	0,30
19 - Tundra mixta	0,6	3	150	100	42,00	0,025	60	0,41	3,35	0,92	0,92	0,15	0,20	0,15	0,15
20 - Tundra estéril	0,3	2	200	100	42,00	0,020	75	0,41	3,35	0,90	0,90	0,25	0,25	0,05	0,10

REFERENCIAS

- Adam, J. C., Clark E. A., Lettenmaier, D. P., y Wood, E. F.: Correction of global precipitation products for orographic effects, *J. Climate*, 19, 15–38, doi.org/10.1175/JCLI3604.1, 2006.
- Agosta, E.A., y Compagnucci, R.H.: Central-West Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections, *J. Climate*, 25(5), 1657-1677, doi:10.1175/JCLI-D-11-00206.1, 2012.
- Albergel, C., De Rosnay, P., Gruhier, C., Muñoz-Sabater, J., Hasenauer, S., Isaksen, L., Kerr Y., y Wagner, W.: Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations, *Remote Sens. Environ.*, 118, 215-226, doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.017, 2012.
- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N., Rashid, I.U., Kamil, S., Abid, M.A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensson, A.A., Arias, P.A., Alves, L.M., Tippet, M.K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F.J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J.A., Ehsan, M.A., Martinez-Castro, D., Muñoz, A.G., Ali, M.A., Coppola, E. y Sylla M.B.: Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Syst. Environ.*, 5(2), 155–183, doi: 10.1007/s41748-021-00233-6, 2021.
- Baldi, G., Houspanossian, J., Murray, F., Rosales, A., Rueda, C., y Jobbágy, E.: Cultivating the dry forests of South America: Diversity of land users and imprints on ecosystem functioning, *J. Arid Environ.*, 123, 47-59, doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.05.027, 2015.
- Ball, J. T., Woodrow, I. E. y Berry, J. A.: A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions, *Progress in photosynthesis research: volume 4 proceedings of the VIIth international congress on photosynthesis providence, Rhode Island, USA, Dordrecht: Springer Netherlands*, doi.org/10.1007/978-94-017-0519-6_48, 1987.
- Barros, V. R., Boninsegna, J., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrin, G. O., y Rusticucci, M.: Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *WIREs Clim Change*, doi.org/10.1002/wcc.316, 2014.

- Basualdo, M., Huykman, N., Volante, J. N., Paruelo, J. M., y Piñeiro, G.: Lost forever? Ecosystem functional changes occurring after agricultural abandonment and forest recovery in the semiarid Chaco forests. *Science of the Total Environment*, 650, 1537-1546, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.001, 2019.
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., y De Roo, A.: MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data, *Hydrol Earth Syst Sci.*, 21(1), 589-615., doi.org/10.5194/hess-21-589-2017, 2017.
- Belward, A.S.: The IGBP-DIS Global 1 km Land Cover Data Set ‘DISCover’ Proposal and Implementation Plans. Report of the Land Cover Working Group of IGBP-DIS, IGBP-DIS Working Paper #13, 11–19. IGBP Data and Information System Office, Toulouse, France, 1996.
- Berbery, E.H., Rasmusson, E. M., y Mitchell, K.E: Studies of North American continental-scale hydrology using Eta model forecast products. *J. Geophys. Res.*, 101, D3, 7305-7319, doi.org/10.1029/95JD02373, 1996.
- Berbery, E. H., y Rasmusson, E. M.: Mississippi moisture budgets on regional scales. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2654-2673, doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2654:MMBORS>2.0.CO;2, 1999.
- Boletta, P. E., Ravelo, A. C., Planchuelo, A. M., y Grilli, M.: Assessing deforestation in the Argentine Chaco, *Forest Ecol. Manag.*, 228 (1-3), 108-114, doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.045, 2006.
- Bonan, G. B.: A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user’s guide, NCAR Tech. Note NCAR/TN-417+STR, 150 pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo, www.osti.gov/biblio/442360, 1996.
- Boers, N., Bookhagen, B., Barbosa, H. M. J., Marwan, N., Kurths, J., y Lucht, W.: Prediction of extreme floods in the eastern Central Andes based on a complex networks approach. *Nat. Commun.*, 5, 5199, doi.org/10.1038/ncomms6199, 2014.
- Brutsaert, W. A.: Evaporation into the atmosphere, 299 pp., D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 1982.

- Bucher, E. H., y Huszar, P. C.: Sustainable management of the Gran Chaco of South America: ecological promise and economic constraints, *J. Environ. Manage.*, 57(2), 99-108, doi.org/10.1006/jema.1999.0290, 1999.
- Bulacio, E.M., Romagnoli, M., Otegui, M.E., Chan, R.L., y Portapila, M.: OSTRICH-CROPGRO multi-objective optimization methodology for calibration of the growing dynamics of a second-generation transgenic soybean tolerant to high temperatures and dry growing conditions, *Agric. Syst.*, 205, 103583, doi:10.1016/j.agry.2022.103583, 2023.
- Butt, E. W., Baker, J. C., Bezerra, F. G. S., von Randow, C., Aguiar, A. P., y Spracklen, D. V.: Amazon deforestation causes strong regional warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(45), e2309123120, doi.org/10.1073/pnas.2309123120, 2023.
- Cai, S., Liu, D., Sulla-Menashe, D., y Friedl, M. A.: Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm, *Remote Sens. Environ.*, 147, 243-255, doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.012, 2014.
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., Karamperidou, C., Takahashi, K., y Vera, C.: Climate impacts of the El Niño-southern oscillation on South America. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 1(4), 215-231, doi.org/10.1038/s43017-020-00012-4, 2020.
- Cappelletti, L. M., Sörensson, A. A., Salvia, M., Ruscica, R. C., Spennemann, P., Fernandez-Long, M. E., y Jobbágy, E.: Soil moisture estimates over sporadically flooded farmlands: Synergies and biases of remote sensing and in situ sources. *International Journal of Remote Sensing*, 43(19-24), 6979-7001. doi.org/10.1080/01431161.2022.2152755, 2022.
- Chen, F., y Dudhia J.: Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity, *Mon. Weather. Rev.*, 129, 569-585, doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2, 2001.

- Chen, F., Janjić, Z., y Mitchell, K.: Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Boundary-Layer Meteorology*, 85, 391-421, doi:10.1023/A:1000531001463, 1997.
- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H. L., Koren, V., Duan, Q. Y., Ek, M. y Betts, A.: Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 101(D3), 7251-7268, doi.org/10.1029/95JD02165, 1996.
- Chen, M., P. Xie, y Co-authors: CPC Unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation, Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns, Australia, 29 July - 1 August, 2008.
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., y Berry, J. A.: Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer, *Agric. For. Meteorol.*, 54(2-4), 107-136, doi.org/10.1016/0168-1923(91)90002-8, 1991.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., y Berry, J. A.: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants, *Functional Plant Biology*, 19(5), 519-538, doi.org/10.1071/PP9920519, 1992.
- Colliander, A., Jackson, T. J., Bindlish, R., Chan, S., Das, N., Kim, S. B., Cosh, M.H., Dunbar, R.S., Dang, L., Pashaian, L., Asanuma, J., Aida, K., Berg, A., Rowlandson, T., Bosch, D., Caldwell, T., Caylor, K., Goodrich, D., Jassar, H., Lopez-Baeza, E., Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Livingston, S., McNairn, H., Pacheco, A., Moghaddam, M., Montzka, C., Notarnicola, C., Niedrist, G., Pellarin, T., Prueger, J., Pulliainen, J., Rautiainen K., Ramos, J., Seyfried, M., Starks, P., Su, Z., Zeng, Y., van der Velde, R., Thibeault, M., Dorigo, W., Vreugdenhil, M., Walker, J.P., Wu, X., Moneris, A., O'Neill, P.E., Entekhabi, D., Njoku, E.G. y Yueh, S.: Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote sensing of environment*, 191, 215-231, doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.021, 2017.
- Collini, E. A., Berbery, E. H., Barros, V. R., y Pyle, M. E.: How does soil moisture influence the early stages of the South American monsoon?, *J. Clim.*, 21(2), 195-213, doi.org/10.1175/2007JCLI1846.1, 2008.
- De Sy, V., Herold, M., Achard, F., Beuchle, R., Clevers, J.G., Lindquist, E., y Verchot, L.: Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South

- America. Environ. Res. Lett., 10(12), 124004, doi:10.1088/1748-9326/10/12/124004, 2015.
- Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, J. Geophys. Res., 83, 1889–1903, doi.org/10.1029/JC083iC04p01889, 1978.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., y Kennedy P. J.: Biosphere- Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR Tech. Note NCAR/TN- 387+STR, 80 pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo, 1993.
- Dickinson, R. E., Shaikh, M., Bryant, R. y Graumlich, L.: Interactive canopies for a climate model, J. Clim., 11, 2823–2836, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2823:ICFACM>2.0.CO;2, 1998.
- Dirmeyer, P.: Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation, J. Climate, 13, 2900-2922, doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2900:UAGSWD>2.0.CO;2, 2000.
- Dros, J. M.: Managing the Soy Boom: Two scenarios of soy production, Amsterdam, AID Environment, 63 pp., 2004.
- Dudhia, J.: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, J. Atmos Sci., 46(20):3077–3107, doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2, 1989.
- Dueben, P. D., y Bauer, P.: Challenges and design choices for global weather and climate models based on machine learning. Geoscientific Model Development, 11(10), 3999-4009, doi.org/10.5194/gmd-11-3999-2018, 2018.
- Eidenshink, J. C. y Faundeen, J. L.: The 1 km AVHRR global land dataset: first stages in implementation, Int. J. Remote Sens., 15(17):3443–3462, doi.org/10.1080/01431169408954339, 1994.
- Eltahir, E. A. B., y Pal, J. S.: Relationship between surface conditions and subsequent rainfall in convective storms, J. Geophys. Res., 101(D21), 26237– 26245, despecially thankD01380, 1996.

- Eltahir, E. A. B.: A Soil Moisture–Rainfall Feedback Mechanism: 1. Theory and observations, *Water Resour. Res.*, 34(4), 765– 776, doi.org/10.1029/97WR03499, 1998.
- Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N. I., Piquer-Rodriguez, M., Gavier-Pizarro, G., y Kuemmerle, T.: The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco, *Global Environ. Chang.*, 45, 24-34, doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.05.001, 2017.
- Ferrero, M. E., y Villalba, R.: Interannual and long-term precipitation variability along the subtropical mountains and adjacent Chaco (22–29 S) in Argentina. *Front. Earth Sci.*, 7, 148, doi.org/10.3389/feart.2019.00148, 2019.
- Flanagan, P. X., Mahmood, R., Sohl, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Hayes, M., y Rappin, E.: Simulated atmospheric response to four projected land-use land-cover change scenarios for 2050 in the north-central United States. *Earth Interactions*, 25(1), 177-194, doi.org/10.1175/EI-D-20-0019.1, 2021.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., y Schaaf, S.: Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results, *Remote Sens. Environ.*, 83(1-2), 287-302., doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00078-0, 2002.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J.: Present-day south American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 281(3–4), 180–195, doi: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032, 2009.
- Garreaud, R. D., y Aceituno, P.: Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *J. Climate*, 14(12), 2779-2789, doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2779:IRVOTS>2.0.CO;2, 2001.
- Gasparri, N. I., y Grau, H. R.: Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972–2007), *Forest Ecol. Manag.*, 258(6), 913-921, doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.024, 2009.
- Georgescu, M., Lobell, D. B., Field, C. B., y Mahalov, A.: Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion, *Geophys. Res. Lett.*, 40(5), 972-977, doi:10.1002/grl.50206, 2013.

- Gettelman, A., Gagne, D. J., Chen, C. C., Christensen, M. W., Lebo, Z. J., Morrison, H. y Gantos, G.: Machine learning the warm rain process. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13, e2020MS002268, <https://doi.org/10.1029/2020MS002268>, 2021.
- González, R. y Woods, R.: *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Longman Publishing Co, Boston, United States, 503 pp., ISBN:978-0-201-11026-5, 1993.
- González, M. H., Dominguez, D., y Nuñez, M.: Long term and interannual rainfall variability in Argentinean Chaco plain region. In *Rainfall: behavior, forecasting and distribution*, pp. 68-89, 2012.
- Goosse, H., Barriat, P. Y., Loutre, M. F., y Zunz, V.: Introduction to climate dynamics and climate modeling. Centre de recherche sur la Terre et le climat Georges Lemaître-UC Louvain., oer.uclouvain.be/jspui/handle/20.500.12279/286, 2010.
- Grimm, A. M.: Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. *Clim. Dyn.*, 53(1-2), 907-932, doi.org/10.1007/s00382-019-04673-7, 2019.
- Gulden, L. E., Yang, Z.-L., y Niu, G.-Y.: Interannual variation in biogenic emissions on a regional scale, *J. Geophys. Res.*, 112, D14103, doi.org/10.1029/2006JD008231, 2007.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thaus, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O. y Townshend, J.: High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 342(6160), 850-853, [doi:10.1126/science.1244693](https://doi.org/10.1126/science.1244693), 2013.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. y Lister, D.: Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7(109), 1–18, doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3, 2020.
- He, C., Valayamkunnath, P., Barlage, M., Chen, F., Gochis, D., Cabell, R., Schneider, T., Rasmussen, R., Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Niyogi, D., y Ek, M.: Modernizing the open-source community Noah with multi-parameterization options (Noah-MP) land surface model (version 5.0) with enhanced modularity, interoperability, and applicability, *Geosci Model Dev.*, 16(17), 5131-5151, doi.org/10.5194/gmd-16-5131-2023, 2023.

- Hoffman, R. N., y Kalnay, E.: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, *Tellus A*, 35(2), 100-118, doi.org/10.3402/tellusa.v35i2.11425, 1983.
- Holton, J. R.: *Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th Edition, Elsevier, Amsterdam, 535 p., 2004.
- Janjic, Z.: The surface layer parameterization in the NCEP Eta Model, *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD*, 4–16, 1996.
- Janjic, Z. I.: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon Weather Rev.*, 122(5):927–945, doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2, 1994.
- Jarvis, P. G.: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Philos. Trans. R. Soc. B*, 273, 593–610, doi:10.1098/rstb.1976.0035, doi.org/10.1098/rstb.1976.0035, 1976.
- Jiang, Y., Wang, G., Liu, W., Erfanian, A., Peng, Q., y Fu, R.: Modeled response of South American climate to three decades of deforestation, *J. Clim.*, 34(6), 2189-2203, doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0380.1, 2021.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., y García-Bustamante, E.: A revised scheme for the WRF surface layer formulation, *Mon Weather Rev.*, 140(3), 898-918, doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1, 2012.
- Jobbágy, E., Noretto, M., Santoni, C. y Baldi, G.: El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana, *Ecol. Austral*, 18(3), 305-322, disponible en ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1377, 2008.
- Jordan, R.: A one-dimensional temperature model for a snow cover, *Spec. Rep. 91–16*, Cold Reg. Res. and Eng. Lab., U.S. Army Corps of Eng., Hanover, N. H., hdl.handle.net/11681/11677, 1991.
- Koren, V., Schaake, J. C., Mitchell, K. E., Duan, Q.-Y., Chen, F., y Baker, J. M.: A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models, *J. Geophys. Res.*, 104, 19,569–19,585, doi.org/10.1029/1999JD900232, 1999.

- Kuemmerle, T., Altrichter, M., Baldi, G., Cabido, M., Camino, M., Cuellar, E., Cuellar, R. L., Decarre, J., Díaz, S., Gasparri, I., Gavier-Pizarro, G., Ginzburg, R., Giordano, A. J., Grau, H. R., Jobbagy, E., Leynaud, G., Macchi, L., Mastrangelo, M., Matteucci, S. D., Noss, A., Paruelo, J., Piquer-Rodriguez, M., Romero-Muñoz, A., Semper-Pascual, A., Thompson, J., Torrella, S., Torres, R., Volante, J. N., Yanosky, A. y Zak, M.: Forest conservation: remember gran chaco, *Science*, 355(6324), 465-465, doi: 10.1126/science.aal3020, 2017.
- Lal, P., Shekhar, A., y Kumar, A.: Quantifying temperature and precipitation change caused by land cover change: a case study of India using the WRF model, *Front. Environ. Sci.*, 9, 766328, doi:10.3389/fenvs.2021.766328, 2021.
- Lee, S.-J.: Impact of land surface vegetation change over the La Plata Basin on the regional climatic environment: A study using conventional land-cover/land-use and newly developed ecosystem functional types, Ph.D. dissertation, University of Maryland, <http://hdl.handle.net/1903/10831>, 153 pp, 2010.
- Lee, S. J., y Berbery, E. H.: Land cover change effects on the climate of the La Plata Basin, *J. Hydrometeorol.*, 13 (1), 84-102, doi.org/10.1175/JHM-D-11-021.1, 2012.
- Lee, S. J., Berbery, E. H., y Alcaraz-Segura, D.: Effect of implementing ecosystem functional type data in a mesoscale climate model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 30, 1373-1386, 2013a.
- Lee, S. J., Berbery, E. H., y Alcaraz-Segura, D.: The impact of ecosystem functional type changes on the La Plata Basin climate, *Advances in Atmospheric Sciences*, 30, 1387-1405, 2013b.
- Li, D., Bou-Zeid, E., Barlage, M., Chen, F., y Smith, J. A.: Development and evaluation of a mosaic approach in the WRF-Noah framework. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(21):11–918, doi.org/10.1002/2013JD020657, 2013.
- Liang L, y Gong, P.: An assessment of MODIS Collection 5 global land cover product for biological conservation studies. In: 2010 18th international conference on geoinformatics, Beijing, China, 18–20 June 2010, pp 1–6, doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567991, 2010.
- Liu, J., Zhan, X., Hain, C., Yin, J., Fang, L., Li, Z., y Zhao, L.: NOAA soil moisture operational product system (SMOPS) and its validations. In 2016 IEEE International

- Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 3477-3480). IEEE, doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729899, 2016.
- Lovino, M.A., Müller, O.V., Müller, G.V., Sgroi, L.C., y Baethgen, W.E.: Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(6), 3155-3174, doi:10.5194/hess-22-3155-2018, 2018.
- Lovino, M. A., Pierrestegui, M.J., Müller, O. V., Berbery, E. H., Müller, G.V., y Pasten, M.: Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature and precipitation in Paraguay, *Clim. Change*, 164, 1-24, doi:10.1007/s10584-021-03012-4, 2021.
- Maertens, M., De Lannoy, G. J. M., Apers, S., Kumar, S. V., y Mahanama, S. P. P.: Land surface modeling over the Dry Chaco: the impact of model structures, and soil, vegetation and land cover parameters, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 4099–4125, doi:10.5194/hess-25-4099-2021, 2021.
- Mahmood, R., Pielke Sr, R. A., Hubbard, K. G., Niyogi, D., Bonan, G., Lawrence, P., McNider, R., McAlpine, C., Etter, A., Gameda, S., Qian, B., Carleton, A., Beltran-Przekurat, A., Chase, T., Quintanar, A., Adegoke, J., Vezhapparambu, S., Conner, G., Asefi, S, Sertel, E., Legates, D., Wu, Y., Hale, R., Frauenfeld, O., Watts, A., Shepherd, M., Mitra, C., Anantharaj, V., Fall, S., Lund, R., Treviño, A., Blanken, P., Du, J., Chang, H-I., Leeper, R., Nair, U., Dobler, S., Deo, R., y Syktus, J.: Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91(1), 37-46, doi.org/10.1175/2009BAMS2769.1, 2010.
- Mahmood, R., Pielke, R.A., Sr., Hubbard, K.G., Niyogi, D., Dirmeyer, P.A., McAlpine, C., Carleton, A.M., Hale, R., Gameda, S., Beltrán-Przekurat, A., Baker, B., McNider, R., Legates, D.R., Shepherd, M., Du, J., Blanken, P.D., Frauenfeld, O.W., Nair, U.S. y Fall, S.: Land cover changes and their biogeophysical effects on climate, *Int. J Climatol.*, 34(4), 929-953, doi:10.1002/joc.3736, 2014.
- Martinez, J., Dominguez, F. y Miguez-Macho, G.: Impacts of a Groundwater Scheme on Hydroclimatological Conditions over Southern South America, *J. Hydrometeorol.*, 17(11), 2959-2978, doi:10.1175/JHM-D-16-0052.1, 2016.
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., y Wang, W.: The weather research and forecast model: software architecture and performance. In

- Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology, vol 25, page 29. World Scientific., doi.org/10.1142/9789812701831_0012, 2004.
- Miguez-Macho, G., Fan, Y., Weaver, C., Walko, R. y Robock, A.: Incorporating water table dynamics in climate modeling: 1. Water table observations and equilibrium water table simulations, *J. Geophys. Res.*, 112, D10125, doi.org/10.1029/2006JD008111, 2007.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., y Clough, S.A.: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave (Paper 97JD00237). *J. Geophys. Res. All Series*, 102:16–663, doi.org/10.1029/97JD00237, 1997.
- Molina, M. J., O'Brien, T.A., Anderson, G., Ashfaq, M., Bennett, K. E., Collins, W. D., Dagon, K., Restrepo, J. y Ullrich, P. A.: A review of recent and emerging machine learning applications for climate variability and weather phenomena. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(4), 220086, doi.org/10.1175/AIES-D-22-0086.1, 2023.
- Mosciaro, M.J., Calamari, N.C., Peri, P.L., Flores Montes, N., Seghezzo, L., Ortiz, E., Rejalaga, L., Barral, P., Villarino, S., Mastrangelo y M., Volante, J.: Future scenarios of land use change in the Gran Chaco: how far is zero-deforestation?. *Reg. Environ. Change.*, 22, 115, doi:10.1007/s10113-022-01965-5, 2022.
- Müller, O. V., Berbery, E. H., Alcaraz Segura, D., y Ek, M. B.: Regional model simulations of the 2008 drought in southern South America using a consistent set of land surface properties, *J. Clim.*, 27(17), 6754-6778, doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00463.1, 2014.
- Müller, O. V.: Hydrometeorological forecasts and their sensitivity to land cover changes (tesis doctoral). Universidad Nacional del Litoral, 2015.
- Müller, O. V., Lovino, M. A., y Berbery, E. H.: Evaluation of WRF model forecasts and their use for hydroclimate monitoring over southern South America, *Weather Forecast.*, 31(3), 1001-1017., doi.org/10.1175/WAF-D-15-0130.1, 2016.
- Müller, O. V., Vidale, P. L., Vannière, B., Schiemann, R., Senan, R., Haarsma, R. J., y Jungclaus, J. H.: Land–Atmosphere Coupling Sensitivity to GCMs Resolution: A Multimodel Assessment of Local and Remote Processes in the Sahel Hot Spot, *J. Clim.*, 34(3), 967-985, doi:10.1175/JCLI-D-20-0303.1, 2021a.

- Müller, O., Vidale, P. L., Vannière, B., Schiemann, R., y McGuire, P.: Does the HadGEM3-GC3.1 GCM overestimate land precipitation at high resolution? A constraint based on observed river discharge. *J. Hydrometeorol.*, 22, 8, 2131-2151. doi.org/10.1175/JHM-D-20-0290.1, 2021b.
- Niu, G.-Y., y Yang, Z.-L.: The effects of canopy processes on snow surface energy and mass balances, *J. Geophys. Res.*, 109, D23111, doi.org/10.1029/2004JD004884, 2004.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R. E., y Gulden, L. E.: A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models, *J. Geophys. Res.*, 110, D21106, doi.org/10.1029/2005JD006111, 2005.
- Niu, G.-Y., y Yang, Z.-L.: Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale, *J. Hydrometeorol.*, 7, 937–952, doi.org/10.1175/JHM538.1, 2006.
- Niu, G.-Y., y Yang, Z.-L.: An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins, *J. Geophys. Res.*, 112, D21101, doi.org/10.1029/2007JD008674, 2007.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R. E., Gulden, L. E., y Su, H.: Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data, *J. Geophys. Res.*, 112, D07103, doi.org/10.1029/2006JD007522, 2007.
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., y Xia, Y.: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(D12), doi.org/10.1029/2010JD015139, 2011.
- Nori, J., Torres, R., Lescano, J. N., Cordier, J. M., Periago, M. E., y Baldo, D.: Protected areas and spatial conservation priorities for endemic vertebrates of the Gran Chaco, one of the most threatened ecoregions of the world, *Divers. Distrib.*, 22(12), 1212-1219, doi.org/10.1111/ddi.12497, 2016.
- Oleson, K. W., Dai, Y., Bonan, G. B., Bosilovichm, M., Dickinson, R., Dirmeyer, P., Hoffman, F., Houser, P., Levis, S., Niu, G.-Y., Thornton, P., Vertenstein, M., Yang, Z.-L., and Zeng, X.: Technical description of the Community Land Model (CLM),

- NCAR Tech. Note NCAR/TN-461+STR, 174 pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo., [dx.doi.org/10.5065/D6N877R0](https://doi.org/10.5065/D6N877R0), 2004.
- Ooyama, K. V.: A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 47(21):2580–2593, [doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2580:ATFFMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2580:ATFFMT>2.0.CO;2), 1990.
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., y Nobre, P.: Present- day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models, *Int. J. Climat.*, 41(15), 6713-6735, [doi:10.1002/joc.7221](https://doi.org/10.1002/joc.7221), 2021.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., y Verón, S. R.: Agricultural expansion and changes in land use, *Ciencia Hoy*, 15, 14–23, 2005 (in Spanish).
- Piquer-Rodríguez, M., Torella, S., Gavier-Pizarro, G., Volante, J, Somma, D., Ginzburg, R., y Kuemmerle, T.: Effects of past and future land conversions on forest connectivity in the Argentine Chaco. *Landscape Ecol.*, 30, 817–833, doi.org/10.1007/s10980-014-0147-3, 2015.
- Pohl, B., y Crétat, J.: On the use of nudging techniques for regional climate modeling: Application for tropical convection, *Climate Dyn.*, 43, 1693–1714, [doi:10.1007/s00382-013-1994-3](https://doi.org/10.1007/s00382-013-1994-3), 2014.
- Portillo-Quintero, C. A., y Sánchez-Azofeifa, G. A.: Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas, *Biol. Conserv.*, 143(1), 144-155, doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020, 2010.
- Ribichich, K. F., Chiozza, M., Ávalos-Britez, S., Cabello, J. V., Arce, A. L., Watson, G., Arias, C., Portapila, M., Trucco, F., Otegui, M. E., y Chan, R. L.: Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HB4, *J. Exp. Bot.*, 71(10), 3142-3156, [doi:10.1093/jxb/eraa064](https://doi.org/10.1093/jxb/eraa064), 2020.
- Richards, P.D., Myers, R.J., Swinton, S.M., y Walker, R.T.: Exchange rates, soybean supply response, and deforestation in South America. *Glob. Environ. Change*, 22(2), 454-462, [doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.004), 2012.
- Rogers, E., Black, T., Ferrier, B., Lin, Y., Parrish, D., y DiMego, G.: Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud

- microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. NOAA/NWS Technical Procedures Bulletin, 488, 2001.
- Ruscica, R., Menéndez, C. y Sörensson, A.: Land surface-atmosphere interaction in future South American climate using a multi-model ensemble, *Atmos. Sci. Lett.*, 17: 141-147, <https://doi.org/10.1002/asl.635>, 2016.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., y Becker, E.: The NCEP Climate Forecast System Version 2, *J. Clim.*, 27(6), 2185-2208, doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1, 2014.
- Salazar, A., Baldi, G., Hirota, M., Syktus, J., y McAlpine, C.: Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review, *Glob. Planet. Change.*, 128, 103-119, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.009, 2015.
- Sánchez, E., Solman, S., Remedio, A. R. C., Berbery, H., Samuelsson, P., Da Rocha, R. P., Mourão, C., Li, L., Samuelsson, P., Da Rocha, R. P., de Castro, M., Jacob, D.: Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twentyfirst century projections of regional temperature and precipitation over South America. *Clim. Dyn.*, 45, 2193-2212, [doi:10.1007/s00382-014-2466-0](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2466-0), 2015.
- Santanello, J. A., Dirmeyer, P. A., Ferguson, C. R., Findell, K. L., Tawfik, A. B., Berg, A., Ek, M., Gentile, P., Guillod, B. P., van Heerwaarden, C., Roundy, J., y Wulfmeyer, V.: Land-atmosphere interactions: The loco perspective. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99(6), 1253–1272. doi.org/10.1175/bams-d-17-0001.1, 2018.
- Schaaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q.-Y., Mitchell, K. E., y Chen, F.: Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales, *J. Geophys. Res.*, 101, 7461–7475, doi.org/10.1029/95JD02892, 1996.
- Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D., y Bounoua, L.: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: Part I. Model formulation, *J. Clim.*, 9, 676–705, [doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2), 1996.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., y Teuling, A. J.: Investigating soil moisture–climate interactions in a changing

- climate: A Review. *Earth Sci. Rev.*, 99(3–4), 125–161, doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004, 2010.
- Sierra, J. P., Junquas, C., Espinoza, J. C., Segura, H., Condom, T., Andrade, M., .Molina-Carpio, J., Ticona, L., Mardoñez, V., Blacutt, L., Polcher, J., Rabatel, A., y Sicart, J.E.: Deforestation impacts on Amazon-Andes hydroclimatic connectivity. *Climate Dynamics*, 1-28, doi.org/10.1007/s00382-021-06025-y, 2022.
- Sirimarco, X., Barral, M. P., Villarino, S. H., y Laterra, P.: Water regulation by grasslands: A global meta-analysis, *Ecohydrology*, e19-34, doi.org/10.1002/eco.1934, 2018.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., y Powers, J. G.: A description of the Advanced Research WRF version 3. Technical report, NCAR., dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH, 2008.
- Smith, C., Baker, J. C. A., y Spracklen, D. V.: Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, 615(7951), 270-275, doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1, 2023.
- Sörensson, A.A., y Berbery, E. H.: A note on soil moisture memory and interactions with surface climate for different vegetation types in the La Plata basin. *J. Hydrometeorol.*, 16(2), 716-729, doi:10.1175/JHM-D-14-0102.1, 2015.
- Spennemann, P. C., Fernández-Long, M. E., Gattinoni, N. N., Cammalleri, C., y Naumann, G.: Soil moisture evaluation over the Argentine Pampas using models, satellite estimations and in-situ measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100723, doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100723, 2020.
- Spennemann, P. y Saulo, A.: An estimation of the land-atmosphere coupling strength in South America using the Global Land Data Assimilation System, *Int. J. Climatol.*, 35, 4151-4166, doi.org/10.1002/joc.4274, 2015.
- Stanimirova, R., Graesser, J., Olofsson, P., y Friedl, M. A.: Widespread changes in 21st century vegetation cover in Argentina, Paraguay, and Uruguay. *Remote Sens. Environ.*, 282, doi:10.1016/j.rse.2022.113277, 2022.
- Sulla-Menashe, D., y Friedl, M. A.: User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product. NASA MODIS Land Cover Product User Guide, https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf, 2018.

- Thibeault, M., Cáceres, J. M., Dadamia, D., Soldano, A. G., Quirno, M. U., Guerrieri, J. M., ... y Mariotti, M. (2015, July). Spatial and temporal analysis of the Monte Buey SAOCOM and SMAP core site. In 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 969-971). IEEE.
- Vallejos, M., Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Vale, L. M., Bustamante, M. L., y Paruelo, J. M.: Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environments*, 123, 3-11, doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.11.009, 2015.
- Vera, C. S., y Osman, M.: Activity of the Southern Annular Mode during 2015–2016 El Niño event and its impact on Southern Hemisphere climate anomalies. *Int. J. Climatol.*, 38, e1288-e1295, doi.org/10.1002/joc.5382, 2018.
- Versegny, D. L.: CLASS-A Canadian land surface scheme for GCMS: I. Soil model, *Int. J. Climatol.*, 11, 111–133, doi.org/10.1002/joc.3370110202, 1991.
- Volante, J., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M., Viglizzo, E., y Paruelo, J.: Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 154:12–22, doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.012, 2012.
- Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Gavier-Pizarro, G. I., y Paruelo, J. M.: Agricultural expansion in the Semiarid Chaco: Poorly selective contagious advance, *Land use policy*, 55, 154-165, doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.025, 2016.
- Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J. y Viterbo, P.: The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9), 7505-7514, doi.org/10.1002/2014WR015638, 2014.
- Williams, E., y Renno, N.: An Analysis of the Conditional Instability of the Tropical Atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 21–36, doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0021:AAOTCI>2.0.CO;2, 1993.
- Xie, P., Chen, M., y Shi, W.: CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation. In Preprints, 24th Conf. on Hydrology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc (Vol. 2), 2010.

- Xue, Y., Sellers, P. J., Kinter, J. L., y Shukla, J.: A simplified biosphere model for global climate studies, *J. Clim.*, 4, 345–364, doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0345:ASBMFG>2.0.CO;2, 1991.
- Yang, Z.-L., y Dickinson, R. E.: Description of the Biosphere- Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the soil moisture workshop and evaluation of its performance, *Glob. Planet. Change*, 13, 117–134, doi.org/10.1016/0921-8181(95)00041-0, 1996.
- Yang, Z.-L., Dickinson, R. E., Robock, A., y Vinnikov, K. Y.: Validation of the snow sub-model of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme with Russian snow cover and meteorological observational data, *J. Clim.*, 10, 353–373, doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<0353:VOTSSO>2.0.CO;2, 1997.
- Yang, R., y Friedl, M. A.: Modeling the effects of three-dimensional vegetation structure on surface radiation and energy balance in boreal forests, *J. Geophys. Res.*, 108(D16), 8615, doi.org/10.1029/2002JD003109, 2003.
- Yang, Z.-L., y Niu, G.-Y.: The versatile integrator of surface and atmosphere processes (VISA) part I: Model description, *Glob. Planet. Change*, 38, 175–189, doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00028-6, 2003.
- Yang, Z.-L., Niu, G.-Y., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Longuevergne, L., Manning, K., Niyogi, D., Tewari, M., y Xia, Y.: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins, *J. Geophys. Res.*, 116, D12110, doi.org/10.1029/2010JD015140, 2011.
- Zak, M. R., Cabido, M., Cáceres, D., y Díaz, S.: What drives accelerated land cover change in central Argentina? Synergistic consequences of climatic, socioeconomic, and technological factors. *Enviro. Manage.*, 42(2), 181-189, doi.org/10.1007/s00267-008-9101-y, 2008.