



Variaciones en el clima local asociadas a un cambio de cobertura: efectos de un embalse en el Trópico

Daniel Espinosa Ospina

Para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Tutores:

Paola Andrea Arias Gómez, Doctor (PhD) en Ciencias Geológicas

John Alejandro Martínez Agudelo, Doctor (PhD) en Hidrometeorología

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Espinosa Ospina et al., 2022)
Referencia	Espinosa Ospina, D., Arias Gómez, P. & Martínez Agudelo, J. A. (2022). <i>Variaciones en el clima local asociadas a un cambio de cobertura: efectos de un embalse en el Trópico</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Ambiental.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonillas.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Este trabajo de Investigación fue financiado mediante el convenio 33/73 entre la Universidad de Antioquia e ISAGEN, en el proyecto “ASCON19-464 BALANCE ENERGETICO Y CONDICIONES EN EL EMBALSE TOPOCORO”.

Agradezco a cada una de las personas que de una u otra forma hicieron parte de este proceso. A mi familia y amigos por su apoyo. A mis Directores por su guía, claridad, paciencia y sobre todo buena disposición que fueron indispensables para culminar este trabajo.

Contenido

Agradecimientos	3
Resumen.....	5
Breve descripción de los capítulos	6
Objetivos del trabajo de investigación	7
Capítulo 1: Introducción.....	8
Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte	10
Capítulo 3: Análisis de información meteorológica.....	17
3.1. Introducción	17
3.2. Datos y metodología.....	18
3.3. Resultados y análisis	25
3.4. Discusión y conclusiones	50
Capítulo 4: Albedo desde sensores remotos.....	53
4.1. Introducción	53
4.2. Datos y metodología.....	53
4.3. Resultados y análisis	58
4.4. Discusión y conclusiones	67
Capítulo 5: Simulaciones con el modelo WRF	69
5.1. Introducción	69
5.2. Datos y Metodología	70
5.3. Resultado y análisis.....	81
5.4. Discusión y conclusiones	94
Capítulo 6: Efectos del cambio de cobertura en algunas variables superficiales relacionadas con el balance de energía.....	96
6.1. Introducción	96
6.2. Datos y metodología.....	96
6.3. Resultados y análisis	97
6.4. Discusión y conclusiones	127
Capítulo 7: Discusión y conclusiones generales	130
Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona	134
Anexo B: Detalle de valores faltantes	149
Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3.....	177
Anexo D: Figuras complementarias del Capítulo 6	209
Referencias.....	213

Resumen

En general, el clima de una región particular es el resultado de la interacción de diversos fenómenos que ocurren en gran variedad de escalas, desde la global hasta la local. Dichos fenómenos pueden hacer referencia a la combinación entre procesos de variabilidad natural y aquellos asociados a efectos de actividades antrópicas, cuya ocurrencia de manera integrada define los balances de energía y humedad que se dan entre la superficie terrestre y la atmósfera, lo que resulta en parte influenciando la variabilidad climática de un lugar. Así, cualquier modificación en dichos balances tiene el potencial para generar cambios en el clima en diferentes escalas, dependiendo de la magnitud del cambio generado.

Particularmente, el clima de Colombia está condicionado por una variabilidad natural regida por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), así como por corrientes superficiales de chorro que transportan humedad atmosférica desde los océanos, como el chorro de bajo nivel del Chocó, el chorro de bajo nivel de Caribe, o el chorro de bajo nivel del Orinoco (o de los Llanos), así como por la ocurrencia de fenómenos relacionados con la interacción océano-atmósfera, como el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Fenómenos como el ENSO influyen el transporte de humedad asociado a las circulaciones de chorro, así como la posición de la ZCIT. Con respecto a los efectos de actividades antrópicas, los embalses, por ejemplo, que son ampliamente usados para generación de energía y/o almacenamiento de agua, representan un cambio de cobertura y uso del suelo que puede generar variaciones en el balance de energía y humedad, e inducir modificaciones en el clima. Este tipo de uso del suelo es particularmente de interés en Colombia puesto que más del 50% de la matriz energética nacional se basa en la generación hidroeléctrica; sin embargo, existen pocos estudios en el país que se enfoquen en los impactos hidroclimáticos de este tipo de proyectos. Los estudios que existen con esta clase de enfoque se han reportado en la literatura principalmente para localizaciones extratropicales y, en general, otro tipo de climas.

En este Trabajo de Investigación se estudiaron las variaciones en algunas variables hidrometeorológicas importantes dentro del balance de energía en superficie en la región de influencia del embalse Topocoro, ubicado en el departamento de Santander, asociado al proyecto hidroeléctrico Hidrosogamoso, operado por Isagen. Para realizarlo, se emplearon observaciones de estaciones meteorológicas, tanto en el área de influencia del embalse como en otras localizaciones de la región Andina, información de ocurrencia del fenómeno ENSO mediante el índice ONI, estimados de albedo de sensores remotos y experimentos de simulación con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF).

Nuestros resultados indican que el llenado del embalse genera impactos drásticos exclusivamente en el lugar que es inundado. Los cambios más importantes identificados en este trabajo para la zona inundada incluyen una disminución en el albedo de alrededor del 80%, y un posible fortalecimiento en los vientos de cerca del 85%. Además, debido a la inercia térmica del agua, se identificó que la temperatura superficial del agua y la temperatura del aire cerca a la superficie se hacen más cálidas (frías) que los alrededores y/o coberturas preexistentes durante la noche y madrugada (día), lo que significa una reducción en la amplitud del ciclo diurno de temperatura sobre el cuerpo de agua. Por otra parte, pese a ser un cuerpo de agua, no se identifican grandes cambios en la evaporación y el contenido de humedad del aire.

Para las localizaciones cercanas a la zona inundada, los resultados de este Trabajo de Investigación no permiten concluir que los cambios identificados se deben al llenado del embalse, encontrando las variaciones en la temperatura y la humedad relativa están explicadas en al menos 50% por la influencia del ENSO. A pesar de esto, el embalse tiene el potencial para generar cambios, a través del fortalecimiento de los vientos y la advección de temperaturas más frescas o cálidas desde el cuerpo de agua hacia otras zonas. En este caso, identificamos variaciones en la temperatura de las zonas cercanas al cuerpo de agua de alrededor de un 2%, tanto para la temperatura máxima como la mínima. De esta manera, nuestros resultados verifican la importancia del ENSO en el comportamiento de la climatología del país, además de identificar un posible mecanismo a través del cual un embalse podría generar cambios en el territorio, pero que dependerá de las características del lugar en que esté ubicado.

Breve descripción de los capítulos

Capítulo 1

En el capítulo 1 de este documento se hace la introducción al problema de interés para el Trabajo de Investigación y se expone la pregunta orientadora.

Capítulo 2

En este capítulo de este documento se explican las bases teóricas de la investigación, así como el estado del arte considerando tanto estudios en otros embalses como estudios sobre otros impactos del embalse Topocoro.

Capítulo 3

En el capítulo 3 se analiza la información de 7 estaciones en el área de influencia del embalse, así como la información de otras estaciones en escalas espaciales y temporales más amplias. Se identifican las variaciones antes y después del momento del llenado del embalse y se tienen en cuenta la influencia del fenómeno ENSO en las variaciones de la temperatura y la humedad relativa.

Capítulo 4

En este capítulo se describe la metodología de estimación del albedo a partir de información obtenida del sensor MODIS, así como la comparación del albedo de este producto con observaciones obtenidas in-situ en el área de influencia. Se identifican los cambios espacio-temporales del albedo en el área de influencia, relacionando los mismos con las variaciones en la temperatura descritas en el capítulo 3.

Capítulo 5

En este capítulo se hace la descripción de los métodos usados para definir la configuración y diseño de los experimentos de simulación con el modelo WRF, desde la definición de los dominios, hasta la configuración de las parametrizaciones empleadas. Además, se describe la metodología diseñada para incluir un cambio de cobertura superficial en el modelo, correspondiente a un cuerpo de agua con una temperatura superficial prescrita.

Capítulo 6

En este capítulo se analizan las diferencias entre los escenarios de control (CTRL) y cambio de cobertura (LULCC) en los experimentos de simulación. Para esto, se enfatiza en algunas variables relacionadas con el balance de energía en superficie, así como la temperatura y la humedad. También se describen los cambios en la vertical para las variables temperatura y humedad, en dos secciones transversales en el área de influencia del embalse.

Objetivos del trabajo de investigación

Objetivo general

Estudiar las variaciones en algunas variables hidrometeorológicas importantes dentro del balance de energía en superficie asociadas a la presencia de un embalse en una ubicación tropical.

Objetivos específicos

1. Estudiar el comportamiento de variables hidrometeorológicas como temperatura, humedad relativa y albedo, mediante el uso de observaciones in-situ y estimados de sensores remotos, durante un periodo anterior y un periodo posterior al establecimiento de un embalse en una región de montaña tropical.
2. Estudiar el comportamiento de estas variables hidrometeorológicas en la zona de influencia del embalse mediante simulaciones con el modelo meteorológico WRF.
3. Describir los cambios observados en las variables meteorológicas antes y después del establecimiento del embalse, teniendo en cuenta sus potenciales relaciones físicas y mecanismos

Capítulo 1: Introducción

El acoplamiento y las interacciones entre la superficie terrestre (el paisaje) y la atmósfera (interacciones suelo-atmósfera) han sido estudiadas ampliamente desde hace un buen tiempo (e.g., Pielke & Avissar, 1990; Santanello et al., 2018). Dichas interacciones son tan importantes que se afirma que las características de la superficie tienen influencia no solo en la atmósfera local y regional, sino que pueden llegar a influenciar el clima a una escala global (e.g. Pielke, 2001; Pielke et al., 2011). Variaciones en estas características pueden ocurrir debido a la variabilidad natural y/o debido a cambios inducidos por la actividad humana, generalmente manifestados en cambios de cobertura y usos del suelo (LULCCs, por sus siglas en inglés).

Por su parte, el ser humano lleva a cabo actividades para satisfacer necesidades de las sociedades que, directa o indirectamente, tienen un impacto sobre las interacciones suelo-atmósfera, y por ende en el clima (Cotton & Pielke, 2007). Uno de los cambios que tiene principal relevancia en América Latina es la instalación de presas para generación hidroeléctrica (Alarcón, 2018). Woldemichael et al. (2012) concluyen que una represa puede afectar la hidrometeorológica local y regional, así como la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, a través de los cambios que se generan en la superficie. Pese a que las represas, sea para generación de energía o abastecimiento de agua, son de gran importancia para América Latina, la mayoría de los estudios que analizan la influencia de embalses en el clima local se desarrollan para zonas extra-tropicales y principalmente se enfocan en las modificaciones espacio-temporales que sufre la precipitación.

Diferentes estudios abordan la inquietud del efecto de estos cambios de cobertura desde el análisis de observaciones, bien sea mediante el uso de datos in situ o de sensores remotos (e.g. Hao et al., 2019), o con ayuda de experimentos de modelación (e.g. Li et al., 2019). En el caso de datos in situ, la disponibilidad de los datos es determinante y generalmente la extensión temporal de estos no es suficiente para llevar a cabo un análisis concluyente, además de que la cantidad de variables que se miden puede ser limitada. La modelación es, en este caso, una buena opción pues permite diseñar experimentos que respondan específicamente la pregunta de interés y, además, los resultados tienen gran cantidad de variables que pueden resultar importantes para complementar el análisis.

Además de las modificaciones ocasionadas localmente debido a cambios de cobertura, las interacciones suelo-atmósfera también pueden tener influencia de fenómenos de gran escala (e.g. El Niño-Oscilación del Sur, Oscilación Multidecadal del Atlántico, Oscilación Decadal del Pacífico, calentamiento global). Por ejemplo, el principal modulador del clima a nivel global es el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el cual ejerce esta influencia mediante las modificaciones que impone en la circulación atmosférica general (e.g. Wang, 2004). Dai & Wigley (2000) muestran en general cómo el ENSO afecta los patrones de precipitación de manera global. Para Suramérica, Caviedes (2007) expone los efectos de El Niño (fase positiva o cálida del fenómeno ENSO), como es la ocurrencia de fuertes sequías en el Altiplano Boliviano y los Andes peruanos, así como en el nordeste de Brasil. A su vez, durante eventos El Niño se observa un aumento de precipitación en las tierras bajas del Pacífico y los Andes ecuatoriales, así como en Chile y la cuenca del río de La Plata (Caviedes, 2007; Cai et al., 2020). En particular, en Colombia, El Niño genera una disminución en la precipitación, la humedad del suelo, y la escorrentía superficial (e.g. Poveda, 2004; Poveda et al., 2006; 2011). Los cambios observados en Colombia se generan principalmente porque al afectar la circulación general, durante El Niño se debilitan las circulaciones de chorro de bajo nivel (e.g. Chorro del Chocó) que generalmente proveen de humedad la zona occidente y centro del país (Poveda & Mesa, 2000; Poveda, 2004; Morales et al., 2021). Por su parte, la fase fría o negativa del

ENSO, conocida como La Niña, genera efectos opuestos a los observados durante El Niño y sus impactos son generalmente más pronunciados (Poveda & Mesa, 1997; Poveda et al., 2011).

Por otra parte, según Kayano et al. (2016), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) puede modificar la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo cual genera un impacto en la temporada de precipitaciones para los lugares en que la variabilidad de la precipitación se rige, en parte, por el desplazamiento de la ZCIT (e.g. Knight et al. (2006) y Poveda et al. (2006) para el caso específico de Colombia). Además, diferentes autores sugieren una influencia de la AMO en las circulaciones monzónicas tanto en Asia como en Suramérica (e.g. Lu et al., 2006; Chiessi et al., 2009).

Otro de los fenómenos asociados a la variabilidad e interacción océano-atmósfera que afecta el clima global es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). Al respecto, Mantua & Hare (2002) mencionan que esta oscilación puede generar impactos similares a los del ENSO, aunque no tan extremos. Además, algunos autores sugieren que la PDO puede modular los efectos del ENSO dependiendo de la sincronización entre sus fases, no sólo intensificando sus efectos cuando las fases se sincronizan (fases positivas de ENSO y PDO ocurriendo al mismo tiempo y viceversa), sino incluso extendiendo su alcance en dirección a los polos (e.g. Andreoli & Kayano, 2005; Wang et al., 2014).

Estos efectos de fenómenos de mayor escala pueden dominar las variaciones climáticas identificadas en la escala local, haciendo complicado reconocer el efecto de los cambios de cobertura en esa misma escala. La identificación de estos fenómenos y la cuantificación de sus efectos en las variaciones climáticas observadas a escala local es crucial. En particular, para este Trabajo de Investigación es de interés comprender los efectos que el fenómeno ENSO genera en la región de influencia del embalse Topocoro, llenado entre los años 2014 y 2015 para el funcionamiento del proyecto hidroeléctrico Sogamoso, en el departamento de Santander. Este interés surge por la necesidad de aclarar si cambios recientes observados por los pobladores en esta región obedecen a efectos del evento El Niño 2015-2016, que tuvo grandes impactos a nivel nacional, o si son consecuencia de las alteraciones generadas por la presencia de este embalse.

Entre los habitantes del área de influencia de este cuerpo de agua existe la inquietud sobre si el llenado del embalse ha podido influir en un aumento de la temperatura y pérdida de productividad de los cultivos, que ellos han reportado frente a La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), y que está consignada en la resolución 0759 del 30 de junio de 2017. Debido a que, en teoría, se esperaría un efecto de enfriamiento cuando se tiene un cuerpo de agua, producto del consumo de la energía en calor latente (e.g. Shuttleworth, 2012; Winchester et al., 2017), este Trabajo de Investigación propone analizar los posibles impactos en variables hidrometeorológicas como temperatura, albedo y humedad relativa asociados a la construcción del embalse Topocoro. Este estudio se basa en el análisis de observaciones in situ provenientes de estaciones meteorológicas en la región y estimados de sensores remotos, además del análisis de resultados de experimentos de modelación realizados con el modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF). Así, la pregunta orientadora de este trabajo es: ¿qué variaciones en variables representativas del clima local pueden asociarse al cambio de cobertura relativo a la presencia de un embalse en una región montañosa tropical?

Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte

2.1. Interacciones suelo atmósfera y cambios de cobertura

Las interacciones entre el paisaje y la atmósfera influyen el clima local y regional (Pielke & Avissar, 1990), donde se entiende como local una extensión espacial de alrededor de 30km y regional alrededor de 200 km. El acople entre estos dos, aunque está ampliamente estudiado y es aún tema de investigación, no se entiende completamente (e.g. Santanello et al., 2018). Su relación se puede dar a través de los balances de energía y humedad (Ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente), definidos y discutidos con mayor profundidad en Pielke (2001):

$$R_N = Q_G + H + L(E + T) \quad (2.1)$$

$$P = E + T + RO + I \quad (2.2)$$

Donde R_N es el flujo neto de radiación (luego de balancear flujos de onda corta y larga); Q_G es el flujo de calor del suelo; H es el flujo turbulento de calor sensible; $L(E + T)$ es el flujo turbulento de calor latente, donde L es el calor latente de vaporización, y E y T son la evaporación y la transpiración, respectivamente; P es la precipitación; RO es la escorrentía; e I es la infiltración. Se observa que las ecuaciones (2.1) y (2.2) se encuentran acopladas, es decir, no son independientes ya que poseen algunas variables en común, lo que implica que cambios en uno de los balances podrían afectar directamente el otro. La complejidad de lo anterior se evidencia en la Figura 2.1 (para más detalle revisar Santanello et al. (2018)). Por ejemplo, considerando el efecto que ejerce la ocurrencia de eventos El Niño sobre la hidroclimatología de Colombia, una disminución en la precipitación en (2.2) puede implicar menos agua disponible para evaporación y transpiración, lo que bajo un flujo neto de radiación constante en (2.1) puede implicar menos energía disponible en forma de calor latente y más energía disponible en forma de calor sensible, es decir temperaturas superficiales más altas. Por otra parte, en el caso de la influencia de eventos La Niña, se tendría lo opuesto, aumentos de evaporación y transpiración en (2.2) que se podrían traducir en aumentos de la energía disponible en forma de calor latente, disminuyendo la temperatura superficial. Adicionalmente, mayores precipitaciones pueden significar una radiación neta menor debido a nubosidad que no permita llegar la radiación solar a la superficie, lo que potenciaría el efecto de disminución en la temperatura superficial. Además, se resalta que cualquier modificación al paisaje que altere o afecte una o más de las variables en las ecuaciones (2.1) y (2.2) potencialmente afectaría el clima local y/o regional (Mahmood et al., 2014).

La ecuación (2.3) (tomada de Shuttleworth (2012)) presenta el balance de radiación solar considerado en la ecuación (2.1).

$$R_N = S(1 - a) + L_N \quad (2.3)$$

El término S hace referencia a la radiación solar (o de onda corta). La cantidad de esta que es reflejada inmediatamente por la superficie es determinada por a , que es el albedo superficial, una propiedad que depende tanto de características de la superficie como del ángulo de incidencia de la radiación. Valores típicos para el albedo se pueden observar en la Tabla 2.1. Generalmente los cuerpos de agua tienen valores más pequeños de albedo que otros tipos de coberturas, como por ejemplo pastos o bosques; esto significa que absorben más radiación solar incidente que cuerpos con mayores albedos. Finalmente, L_N hace referencia a la radiación neta de onda larga, es decir, la radiación emitida por la superficie en función de su temperatura.

Tabla 2.1 Valores típicos de albedo diarios promedio. Adaptado de Shuttleworth (2012)

Cobertura	Albedo típico
Aguas abiertas	~ 0,08 (8%)
Nieve fresca	~ 0,8 (80%)
Nieve sucia	~ 0,4 (40%)
Suelo desnudo y cultivos	~ 0,23 (23%)
Bosque	~ 0,12 (12%)

Los cambios conocidos como LULCC son modificaciones al paisaje (deforestación, aforestación, desertificación, embalses, urbanización, etc), generalmente resultado de actividades humanas. Según Massad et al. (2019), desde un punto de vista global, en los últimos tres siglos, la actividad humana, a través de LULCCs, ha eliminado alrededor de 12 millones de km^2 de bosques con la finalidad de disponer el suelo para cultivos y ganadería. Además, según estimados de Salazar et al. (2015), 3.6 millones de km^2 de vegetación natural no Amazónica en Suramérica han sido transformados a otros usos del suelo. Dichos cambios juegan un papel importante en el sistema climático (e.g., Pielke, 2001; Pielke et al., 2002; Mahmood et al., 2014) ya que pueden afectar directamente el balance de radiación solar y de onda larga en superficie generando cambios, entre otros, en los flujos de energía y humedad (Pielke et al., 2011), es decir, alterando las ecuaciones (2.1) y (2.2). Por ejemplo, cambiar una cobertura vegetal por un embalse, puede generar cambios en dichas ecuaciones de la siguiente manera. (i) Un cambio en el albedo y la emisividad: como se mencionó, los cuerpos de agua tienen la capacidad de absorber más radiación de onda corta incidente que otros tipos de coberturas, pero además el agua tiene un alto calor específico, es decir, se requiere de una alta cantidad de energía para elevar la temperatura de 1 kg de agua en 1 grado centígrado. (ii) Esto afecta de entrada a R_N , pues se modifican los balances de energía de onda corta y onda larga, porque se cambia el albedo y se cambia la manera de emitir onda larga en función del calor que va almacenando el agua. (iii) Además, se tiene una gran cantidad de agua disponible para evaporación, lo que aumentaría el flujo de calor latente en (2.1), afectando indirectamente el flujo de calor sensible para mantener el balance de la ecuación.

Parte de lo anterior se puede observar siguiendo los puntos destacados en la Figura 2.1. La disminución del albedo (punto a) se traduce en una mayor cantidad de radiación solar (punto b) que logra ser absorbida por la superficie. Esta radiación puede ser empleada en flujos de calor latente (punto c) o flujos de calor sensible (punto f). En nuestro caso, suponiendo una superficie como la del embalse con gran cantidad de agua para evaporar, la energía será usada en calor latente, lo que modificaría directamente variables como la humedad relativa (punto d). Además, para balancear, el calor sensible disminuye, afectando la temperatura superficial (punto e) y la temperatura del cuerpo de agua, lo que afecta la radiación de onda larga emitida por el mismo (punto g).

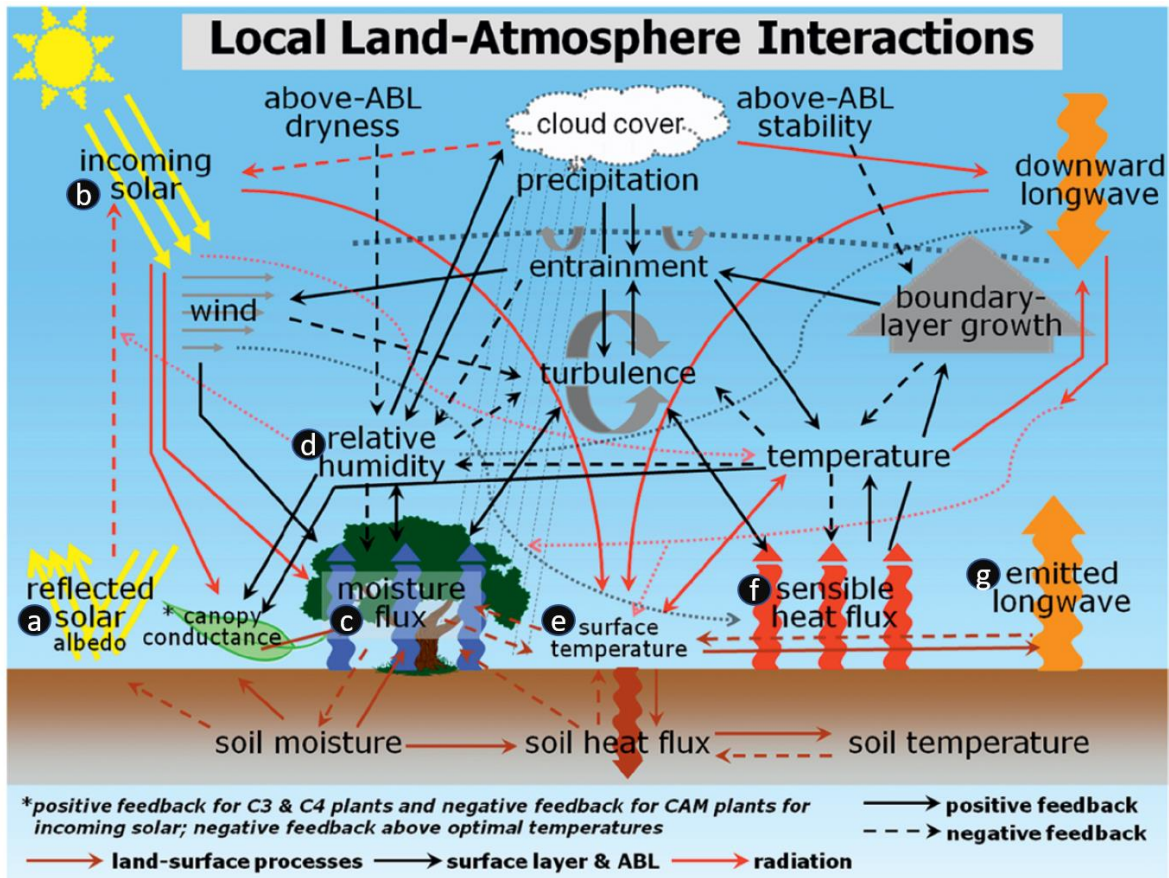


Figura 2.1. Esquema de las interacciones locales entre el suelo y la atmósfera (L-A) en un régimen sinóptico de reposo, incluyendo las vías de retroalimentación entre la humedad del suelo y la precipitación (SM-P). Las flechas sólidas indican una trayectoria de retroalimentación positiva, y las flechas punteadas grandes representan una retroalimentación negativa. Las líneas rojas indican radiación, las líneas negras indican capa superficial y capa límite planetaria (PBL), y las líneas marrones indican procesos de superficie terrestre. Las líneas delgadas de puntos rojos y grises con flechas representan retroalimentación positiva. La única línea punteada gris horizontal (sin flechas) indica el nivel superior de la PBL, y las siete líneas pequeñas punteadas verticales (sin flechas) representan la precipitación. Cortesía de M. Ek, modificado de versiones anteriores que aparecen en Ek y Mahrt (1994) y Ek y Holtslag (2004). Tomado de Santanello et al. (2018)

2.2. Embalses e impactos en variables hidrometeorológicas

Loarie et al. (2011) mencionan que, sin tener en cuenta alteraciones en la vegetación, los cambios en el agua superficial generan las afectaciones más grandes al albedo (variable importante para R_N en las ecuaciones (2.1) y (2.3)). Dichas afectaciones pueden ser causadas por canales y embalses, donde los últimos son intervenciones comunes en todo el mundo, sobre todo en nuestra región. Por ejemplo, Graf. (1999) reporta 75187 embalses existentes en Estados Unidos para el año 1999. Por otra parte, Zarfl et al. (2014) reportan al menos 3700 embalses planeados o en construcción en países con economías emergentes y Finer & Jenkins (2012) reportan 48 embalses sobre la cuenca del Amazonas y unos 151 embalses proyectados para los próximos 20 años en esta región (Finer & Jenkins, 2012). Para el caso de Colombia, Angarita et al. (2018) reporta alrededor de 35 embalses en la cuenca del río Magdalena para el año 2018 y aproximadamente 104 propuestos para construcción en años posteriores. Además, más del 50% de la energía del país es generada mediante hidroeléctricas (Poveda, 2003; UPME, 2015) y a pesar del volumen de construcciones de este tipo, aún se tienen

vacíos de conocimiento en cuanto a las implicaciones que estos proyectos ejercen sobre el clima (Woldemichael et al., 2012; Santanello et al., 2018).

Diferentes estudios se han puesto en la tarea de investigar los impactos generados local y regionalmente por la construcción de embalses. Para ello se han considerado dos tipos de aproximaciones: el análisis de escenarios de modelación (e.g Woldemichael et al., 2012; Hossain et al., 2012; Woldemichael et al., 2014; Winchester et al., 2017) y el análisis de series de tiempo de datos observados in situ, de sensores remotos, o de reanálisis (Degu et al., 2011; Hossain et al., 2012; Song et al., 2017).

La mayoría de los estudios mencionados se enfocan en las afectaciones a la precipitación (patrones de precipitación y eventos extremos de precipitación) causados por la presencia de los embalses, es decir, se enfocan directamente en la variable explicada por la ecuación (2.2), pero que también afecta la ecuación (2.1). Degu et al. (2011) y Hossain et al. (2012) estudian 92 embalses en territorio estadounidense a través de datos obtenidos de reanálisis. Los resultados de estos estudios sugieren que los cambios más marcados asociados a los embalses se observan en la Energía Potencial Disponible para Convección (CAPE), la cual está directamente relacionada con la precipitación. Estos cambios se observan fundamentalmente en climas mediterráneos y semiáridos (de la clasificación de Köppen; ver: Kottek et al. (2006)), mientras que para climas más húmedos no encuentra una relación directa (teniendo en cuenta que se habla de climas húmedos subtropicales). Song et al. (2017), con el uso de datos observados in situ y de sensores remotos en un embalse en China, no logran asociar directamente cambios en la temperatura con la presencia de un embalse y concluyen que el efecto de siembra de árboles por compensaciones ambientales y urbanización en regiones aledañas al embalse parece tener un mayor impacto en los cambios de temperatura.

Woldemichael et al. (2012, 2014) plantean casos similares en su investigación, pero con dos casos de estudio en diferentes embalses de Estados Unidos, con condiciones climáticas y topográficas distintas. Mediante el uso del modelo atmosférico regional RAMS, analizan los mecanismos de retroalimentación entre la cobertura y la atmósfera y concluyen que los cambios en cobertura asociados al embalse pueden modificar la cantidad de precipitación y la distribución espacial de la misma (similar a lo encontrado por Winchester et al. (2017)). Además, las condiciones climáticas del lugar en el que se construye el embalse tienen que ver con la intensidad de los impactos generados por el mismo. En particular, las precipitaciones extremas en regiones áridas o semiáridas (de la clasificación de Köppen) que se encuentran a sotavento de regiones montañosas son más sensibles a modificaciones debido al embalse que las regiones a barlovento (Woldemichael et al., 2014).

Por otra parte, Winchester et al. (2017) usan el modelo WRF para estudiar las interacciones suelo-atmósfera de diferentes coberturas (embalses, pastos, bosques caducifolios, y suelos desnudos) en tres eventos de precipitación seleccionados para un reservorio de agua artificial en

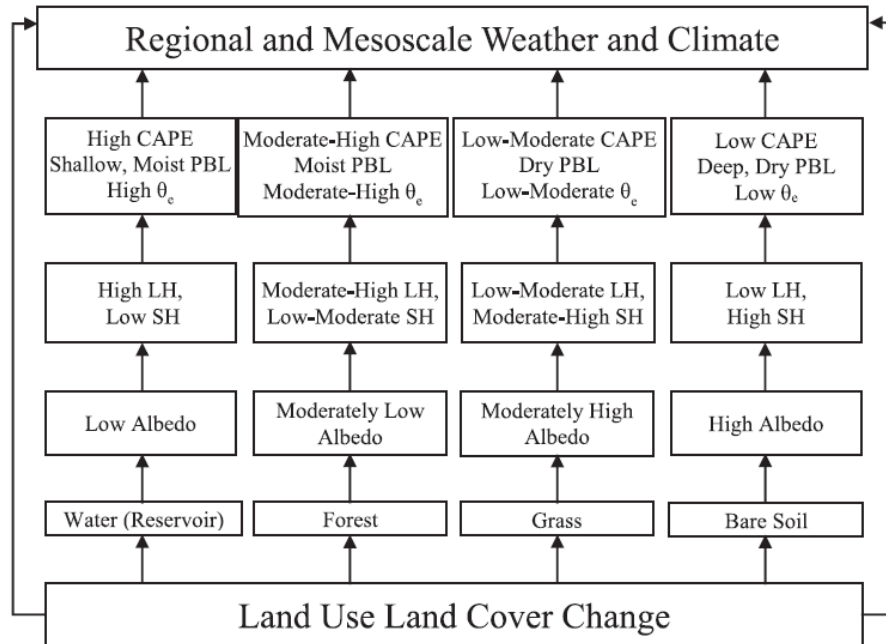


Figura 2.2. Un modelo conceptual idealizado y simplificado de los impactos de un embalse (reservorio hecho por el hombre), el bosque, el pasto y el suelo desnudo sobre la meteorología y el clima regional y de mesoescala. Tomada de Winchester et al. (2017)

Estados Unidos. Estos autores encuentran que la presencia del reservorio de agua no está necesariamente asociada con un aumento o disminución de las precipitaciones y que esto más bien depende de las condiciones meteorológicas asociadas a cada evento específico estudiado. Por otra parte, los autores sí encuentran relación entre el cuerpo de agua y la distribución espacial de las lluvias, así como el momento de su ocurrencia. En este estudio, además, se analizan algunas variables adicionales como los flujos de calor latente y sensible, relevantes en la ecuación (2.1). Los autores encuentran que el calor sensible es menor que el calor latente sobre el cuerpo de agua en todos los eventos estudiados, lo que tiene sentido ya que, por la disponibilidad de agua para evaporar, este flujo se ve favorecido (e.g. Shuttleworth, 2012). Winchester et al. (2017) también encuentran que los flujos de calor latente son mayores durante la noche, lo que se debería a la cantidad de energía que el cuerpo de agua ha almacenado, de manera que en la noche los flujos de calor sensible y latente podrían continuar siendo desde el cuerpo de agua a la atmósfera y nuevamente se vería favorecido el flujo de calor latente. Además, generan una conceptualización de las interacciones suelo-atmósfera para las coberturas que tuvieron en cuenta en su estudio (Figura 2.2). Sus resultados muestran que un embalse generalmente impone disminuciones en el albedo, pues los cuerpos de agua absorben más radiación de onda corta incidente que otro tipo de coberturas, lo que modifica directamente R_N (ver ecuaciones (2.1) y (2.3)). Esto lleva a que se modifiquen los flujos de calor latente y sensible, beneficiando generalmente el aumento de calor latente debido a la disponibilidad de agua para evaporar, lo que finalmente se podría traducir en condiciones más apropiadas para que se produzca precipitación.

2.3. Variabilidad natural

Además de las variaciones que pueden presentar las interacciones suelo-atmósfera debido a cambios locales de cobertura, algunas respuestas de las variables en esta escala se pueden asociar también a forzamientos por fenómenos de mayor escala. La hidroclimatología de Colombia se encuentra moderada en diferentes escalas temporales y espaciales por el efecto de distintos fenómenos como el paso estacional de la ZCIT, la influencia de diferentes corrientes superficiales de chorro que interactúan y transportan humedad atmosférica al interior del país, el fenómeno ENSO, entre otros (e.g. Poveda et al., 2004; Sierra et al., 2015; Arias et al., 2015). Los principales efectos identificados por estos fenómenos se observan en la precipitación, que se traducen en variaciones en las demás variables hidroclimáticas (e.g. temperatura, humedad) a través de balances en las ecuaciones (2.1) y (2.2), por medio de interacciones suelo-atmósfera. La ZCIT, por ejemplo, en sus dos pasos anuales sobre el territorio Colombiano y su interacción con la topografía, define ciclos unimodales y bimodales de precipitación para diferentes localizaciones específicas (Poveda, 2004). Corrientes de bajo nivel como el chorro del Chocó y el chorro del Caribe (CLLJ por sus iniciales en inglés) influyen la precipitación de la zona occidental y central del país debido a su transporte de humedad atmosférica desde el océano e interacciones entre ellos y otras fuentes de humedad (e.g. Poveda & Mesa, 2000; Poveda, 2004; Poveda et al., 2006; Sierra et al., 2015; Arias et al., 2015; Morales et al., 2021). Por su parte, el ENSO exhibe un efecto fundamental que se traduce en disminución (aumento) de la precipitación, de la escorrentía superficial y de la humedad del suelo sobre Colombia durante su fase positiva (negativa) (e.g. Poveda et al., 2011). Relacionado con esto, Cerón et al. (2021) estudian la relación de la hidroclimatología del país, la ocurrencia de eventos ENSO y la descarga de la cuenca del río Cauca, intervenida en 1985 mediante la construcción del embalse Salvajina para generación eléctrica y regulación hídrica. Estos autores identifican que los valores extremos de descarga, además de presentar una diferencia en los valores medios entre los periodos antes y después de la construcción del embalse Salvajina, están relacionados con la ocurrencia e intensidad de los eventos ENSO.

Los efectos de estos fenómenos no ocurren de manera aislada. Cerón et al. (2020) describen cómo las corrientes de chorro de bajo nivel que transportan humedad atmosférica al interior de Colombia se ven influenciadas por las temperaturas superficiales de los océanos, asociadas a fenómenos de variabilidad interdecadal en los océanos Atlántico y Pacífico como la AMO y la PDO, respectivamente. Estos dos fenómenos, de igual manera que el ENSO, presentan fases cálidas y negativas definidas, aunque su frecuencia es mucho más baja. De esta manera, anomalías de temperatura cálidas (frías) en el mar Caribe y en el Océano Atlántico Norte (fase cálida de la AMO) sumadas a una PDO en fase negativa (positiva) son propicias para fortalecer (debilitar) el chorro de bajo nivel del Chocó y debilitar (fortalecer) el CLLJ (Cerón et al., 2020). Además, Kayano et al. (2019, 2020) sugieren que la ocurrencia simultánea de la fase negativa (positiva) de la AMO y la fase positiva (negativa) de la PDO favorece la formación de eventos El Niño (La Niña).

2.4. Estudios relacionados con el embalse Topocoro

Si bien el embalse Topocoro ha sido objeto de diferentes estudios e investigaciones, estos han tenido unos enfoques diferentes, de manera que a la fecha no hay literatura sobre la hidrometeorología del lugar y los cambios en las interacciones ocasionados por el llenado del embalse. Los estudios reportados se enfocan, sobre todo, en temas de dinámicas sociales y ordenamiento del territorio, como los modelos de ocupación alrededor del área de influencia del embalse (e.g. García Lozano, 2020), una evaluación de los potenciales turísticos que representa el espejo de agua (e.g. Corzo-Arévalo, 2020) así como el desarrollo de la normativa para el estudio de impacto ambiental en la zona (e.g. Bautista, 2015). Otros estudios se enfocan específicamente en el cuerpo de agua para analizar su potencial emisión de gases de efecto invernadero (GEI), con la finalidad de tener unidades de

referencia y poder establecer medidas para disminuir el aporte de estos al cambio climático (e.g. Lopera et al., 2016; Ruiz-Vasquez et al., 2019). Incluso hay un estudio que busca relacionar los ciclos de llenado y vaciado de los embalses con la sismicidad del lugar en que están ubicados y obtienen que es posible que el embalse tenga cierta influencia en aumentos de la actividad sísmológica en la región (Leal-Noriega & Vargas-Jiménez, 2020), puesto que el área de estudio se encuentra en una zona geológicamente activa. Aun así, no hay estudios relacionados con los posibles impactos del llenado del embalse en las interacciones suelo-atmósfera y el clima de la zona de estudio. Lo más cercano a un estudio de las variables hidrometeorológicas locales se encuentra como información de soporte aportada por Isagen para apelar a un recurso de reposición en la resolución 00649 del 7 de mayo de 2017, donde se muestran medidas de radiación in situ para el periodo de 2011 a 2017, y relacionan las variaciones en la radiación con la ocurrencia de eventos ENSO, donde se resalta que en la zona, los valores más altos de albedo se tienen para el momento en que el sol se encuentra más perpendicular al cuerpo de agua, por lo que la reflexión directa no podría llegar a ninguna de las parcelas en el área de influencia.

La literatura revisada permite identificar la falta de consenso alrededor de los impactos causados por embalses en el clima a través de las interacciones suelo-atmósfera, además de la escasez de literatura enfocada en el impacto al clima local en la zona de estudio. Se logra identificar que los efectos están muy condicionados al clima pre-existente del lugar específico donde ocurre el cambio de cobertura, además de condiciones meteorológicas (Winchester et al., 2017). Adicionalmente, se identifica que los efectos ocasionados por fenómenos de mayor escala como el ENSO pueden enmascarar los impactos ocasionados localmente por el cambio de cobertura debido a que, generalmente, los impactos del ENSO son más notables. Además, gran parte de estos estudios se enfocan en latitudes extra-tropicales, lo que deja abierto el campo de investigación para regiones tropicales como Colombia.

Así, este Trabajo de Investigación plantea analizar el posible impacto de la construcción de un embalse en el clima local para una localización de montaña en el trópico.

Capítulo 3: Análisis de información meteorológica

3.1. Introducción

A través de las ecuaciones 2.1 para el balance de energía, 2.2 para el balance de humedad y 2.3 para la radiación neta, se establece la relación que puede tener el clima local y regional con las interacciones entre el paisaje y la atmósfera (Pielke & Avissar, 1990). Además, se intuye que si se hace una modificación en alguno de los términos de estas ecuaciones, cambiará el balance y posiblemente se afectará el clima de un lugar. Los términos que aparecen en estas ecuaciones se pueden ver influenciados por una gran cantidad de procesos y fenómenos que ocurren en diferentes escalas espaciales y temporales. Estos procesos abarcan desde lo relacionado con la variabilidad natural, hasta los efectos de intervenciones antrópicas en el territorio, como cambios de coberturas. Por ejemplo, si se consideran los efectos de un fenómeno de variabilidad natural que disminuye las precipitaciones, se tiene que disminuiría la humedad disponible para evaporación y transpiración, y bajo un flujo constante de radiación neta, se generaría una disminución de los flujos de calor latente en (2.1), aumentando los flujos de calor sensible y de calor al suelo, lo que finalmente podría aumentar la temperatura. Por otra parte, una intervención antrópica como un cambio en la cobertura superficial, por ejemplo, de vegetación como pastos a pavimento oscuro, puede aumentar la radiación neta, pues se genera una disminución en el albedo, y si consideramos que los flujos de calor latente no se ven modificados, se tendría más energía disponible para el suelo o para los flujos de calor sensible, lo que podría aumentar la temperatura. Con estos dos ejemplos, en los cuales procesos en diferentes escalas pueden afectar la temperatura superficial, se busca enfatizar sobre la importancia de considerar diferentes factores que pueden influenciar el clima de un lugar, al momento de identificar cambios en el mismo, complejizando el problema cuando estos procesos ocurren simultáneamente, por lo que, determinar si un cambio de cobertura como el llenado del embalse es responsable por los cambios identificados en alguna de las variables meteorológicas de su área de influencia requiere incorporar otros elementos de análisis como la variabilidad climática en escalas mayores de espacio y tiempo.

Además, de los ejemplos anteriores se nota que se tienen en cuenta cada uno de los términos para concluir el posible impacto en la temperatura. Particularmente, para los datos disponibles de las observaciones se tiene información de la radiación incidente (S), que es uno de los componentes para el cálculo de R_n . La precipitación, que puede aportar a que varíen los flujos de calor latente ($L(E + T)$). Los vientos, que también hacen parte de uno de los factores que puede modificar $L(E + T)$ (e.g. Shuttleworth, 2012). La temperatura superficial del aire, que se relaciona con los flujos de calor sensible (H), y la humedad relativa. Estos no son datos suficientes para hacer el completo seguimiento de un cambio, pero permiten identificar variaciones, y en conjunto con la información de otras localizaciones fuera del área de influencia del embalse, poner los cambios en un contexto regional.

Es por eso que en este capítulo se realizó el análisis de la información de las estaciones meteorológicas en la zona, contrastando con las variaciones de las variables en otros lugares del país (donde no hay influencia del embalse) y con la ocurrencia del fenómeno de variabilidad natural ENSO, conocido por tener un gran impacto en el clima del país, y así tener más elementos para determinar si el llenado del embalse pudo ser el causante de los cambios identificados en las variables meteorológicas en el área de influencia. Particularmente, nos interesaba conocer cuáles han sido las variaciones en las variables durante el periodo de registro, así como las diferencias entre el *Antes* y *Después* del llenado

del embalse. A su vez, fue de interés identificar qué porcentaje de esa varianza y cambios podría deberse al efecto del ENSO. Para esto se analizaron las anomalías de cada variable teniendo en cuenta los momentos de ocurrencia de eventos ENSO, y se realizó un filtro mediante el uso de componentes principales (PCA) buscando eliminar la señal de este de la temperatura y la humedad relativa. Además, se analizó la diferencia en los valores medios entre los periodos *Antes* y *Después* del llenado con la finalidad de identificar cambios significativos, también teniendo en cuenta el efecto del ENSO en la temperatura y la humedad relativa.

3.2. Datos y metodología

Para identificar los cambios en el comportamiento de las variables que definen el clima en el área de influencia del embalse Topocoro se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas propiedad de ISAGEN (referidas en adelante como estaciones N/I), así como datos de estaciones propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos datos cuentan con un proceso de control de calidad por parte de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA; por sus siglas en inglés), por lo que serán referidas como estaciones NOAA de acá en adelante. En este proceso se hace una evaluación de continuidad en los datos para encontrar y eliminar valores improbables. También se hace una evaluación de consistencia, para verificar que los datos reportados sean realistas (ver Lott, 2004). Estas estaciones fueron consideradas con la finalidad de tener información tanto en el área de influencia del embalse como en escalas espaciales más grandes, desde la regional hasta la nacional. Particularmente, de las estaciones N/I se cuenta con información para las variables temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de vientos, radiación incidente y precipitación, mientras que para las estaciones NOAA se cuenta con información de temperatura, humedad relativa y precipitación. Además, para identificar la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, se usaron los datos del índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés), obtenido del Centro de Predicciones Climáticas de Estados Unidos (ver: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Inicialmente, se realizó una descripción del comportamiento climatológico exhibido por las variables meteorológicas, según se presenta en el Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona. Posteriormente, se analizó el comportamiento de las variables (presentadas en la Tabla 3.1) para los periodos *Antes* (entre los años 2012 y 2013) y *Después* (2015 a 2020) del llenado del embalse, definidos de acuerdo con la disponibilidad de datos de las estaciones N/I y según el control de calidad de los mismos, como se verá en la sección 3.2.2. La selección temporal de estos rangos puede variar dependiendo de la variable (ver Tabla 3.1). Estos análisis se realizaron sin hacer ningún tipo de procesamiento sobre los datos, es decir, manteniendo la información de la varianza relacionada con los diferentes fenómenos que podrían ocasionar cambios en ellas. Posteriormente, dado que el fenómeno ENSO es determinante en la variabilidad de los procesos meteorológicos en el país, se hizo un análisis de las anomalías de las variables, teniendo en cuenta la ocurrencia de las fases cálida (El Niño) y fría (La Niña) de este fenómeno. Para ello, se estimaron los promedios de precipitación durante eventos El Niño y eventos La Niña, con el objeto de identificar los cambios asociados a ambas fases del ENSO. Además, se aplicó un filtro a la señal asociada al ENSO sobre las variables temperatura y humedad relativa, con el objetivo de identificar si los cambios en estas variables pueden explicarse con la ocurrencia del fenómeno ENSO. Los datos de las estaciones NOAA brindan soporte sobre los procesos y análisis realizados a los datos de algunas de las variables de las estaciones N/I al tener un periodo de registro más largo y con mayor ocurrencia de eventos El Niño y La Niña.

Finalmente, se realizó un “t-test” para diferencia de medias con el objetivo de identificar los cambios en los valores medios entre los periodos definidos de *Antes* y *Después* para cada variable, incluyendo las filtradas en el caso de la temperatura y a humedad relativa.

3.2.1. Datos de estaciones meteorológicas

Para esta sección se usó información de las 7 estaciones del “Proyecto de monitoreo del comportamiento climatológico en el área de influencia de la Central Hidroeléctrica Sogamoso” instaladas en el área de influencia por Natura/ISAGEN (N/I), de los datos seleccionados de 7 estaciones de la base de datos Integrated Surface Dataset (ISD) de la NOAA, y datos de la estación San Vicente del IDEAM para la variable precipitación, en el área de influencia (incluida en la Tabla 3.1 dentro de las estaciones NOAA y llamada San Vicente de Chucurí). Las estaciones y la topografía asociada a la ubicación de las mismas se pueden observar en la Figura 3.1, elaborada con información descargada de la base de datos de modelos de elevación digital de CGIAR-CSI SRTM (Shuttle Radar Topography mission). También se puede ver la distancia aproximada de cada estación N/I al centro del embalse, y se resalta que algunas de las estaciones están a aproximadamente 1 km de las orillas del cuerpo de agua como La Estrella, El Marqués y La Parroquia. La altura de cada una con respecto al nivel del mar se puede ver en la Tabla 3.1. Es importante resaltar que se tiene información para un amplio rango de ubicaciones con respecto al nivel del mar, así como de localizaciones en la región Andina de Colombia.

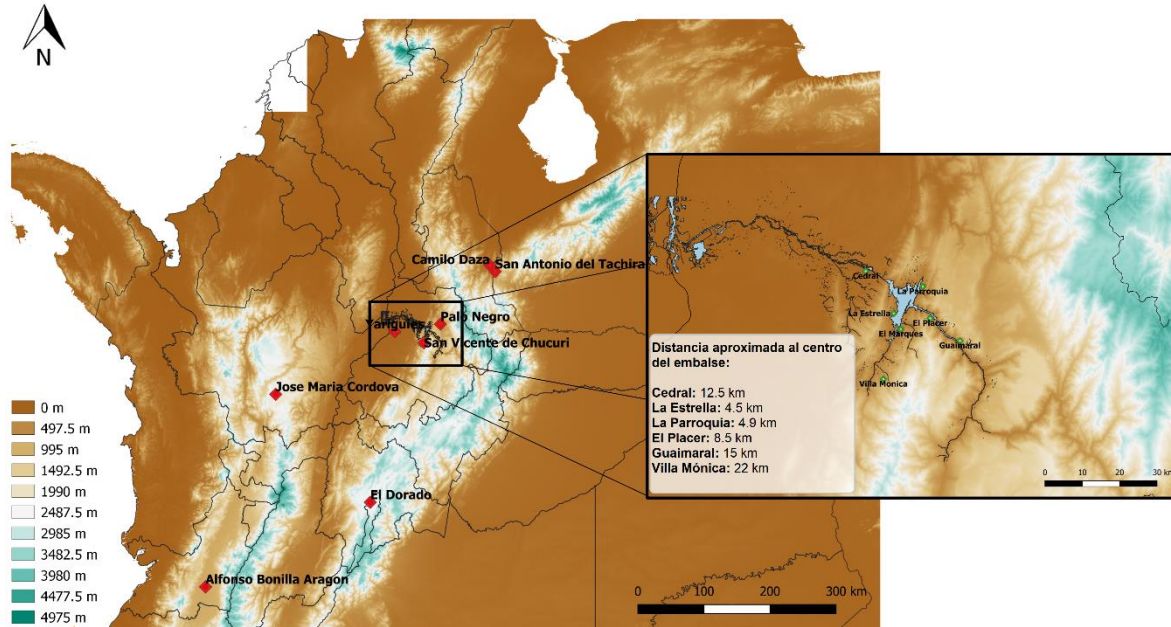


Figura 3.1. Estaciones para el análisis de las variables meteorológicas. Las estaciones NOAA se indican en color rojo. Las estaciones N/I y distancia aproximada al centro del embalse se presentan en color verde en el recuadro

En el caso de las estaciones N/I, se contó con un periodo de registro entre enero de 2012 y octubre de 2020 para las variables temperatura, humedad relativa y precipitación. Para las variables de velocidad y dirección del viento, el periodo de registro comprende entre enero de 2012 y diciembre de 2017, debido a que en abril de 2018 el sensor que mide esta variable fue cambiado de posición. El sensor fue elevado desde la altura de 3 m hasta 10 m, lo que causó un cambio en el comportamiento de la variable, por lo que no se tuvo en cuenta los registros posteriores a este cambio para evitar sesgos en el análisis de los datos. A su vez, la variable radiación incidente también se analizó en el periodo entre enero de 2012 y diciembre de 2017 debido a una disminución en la cantidad de datos disponibles a partir del año 2018 (ver Tabla 3.1).

Para las estaciones NOAA, específicamente para las variables temperatura y humedad relativa, se contó con un registro entre enero de 2006 y marzo de 2019, seleccionado luego de un primer conteo de los datos perdidos entre los años 1950 y 2019, para las estaciones dentro la misma región en la que se encuentra del área de influencia del embalse (Palo Negro, Yariguíes, San Antonio del Táchira y Camilo Daza). Para la variable precipitación, se contó con datos entre enero de 2000 y octubre de 2020.

Inicialmente, se realizó un control de calidad de los datos para las estaciones N/I y NOAA, cuantificando los datos horarios faltantes para cada uno de los meses disponibles. En general, los datos de N/I son continuos, pero se resalta la presencia de algunos datos faltantes que no están dentro los reportes entregados por el operador de las estaciones (ver Anexo B: Detalle de valores faltantes). Para las estaciones NOAA, se encuentra una gran cantidad de valores faltantes para las horas de la noche y la madrugada. Sin embargo, las estaciones NOAA cuentan con datos para el periodo entre 2006 y 2019, lo que permite extender el periodo de análisis alrededor de 6 años con respecto al inicio de toma de datos de N/I. Esto condicionó la definición del ciclo diurno entre las 7am y 7pm (hora local), para ambos grupos de estaciones para las variables temperatura y humedad relativa. Para el caso de estas variables, el dato mínimo se tomó como el dato registrado a las 7 am mientras que el máximo corresponde al registrado a la 1pm.

Tabla 3.1. Información general de las estaciones N/I y NOAA

Estación N/I	Altura (msnm)	Temperatura	Humedad Relativa	Precipitación	Radiación incidente	Viento
Cedral	272	2012-2020			2012-2018	
Parroquia	381					
La Estrella	434					
El Marqués	598					
Guaimaral	650					
Villa Mónica	879					
El Placer	995					
Estación NOAA						
Yariguíes	126	2006-2019			2000-2020	No aplica
Camilo Daza	313					
San Antonio del Táchira	400					
Alfonso Bonilla Aragón	970					
Palo Negro	1189					
José María Córdova	2157					
El Dorado	2547	No aplica			No aplica	
San Vicente de Chucurí	721					

3.2.2. Control de calidad de los datos

El primer paso antes de analizar los datos consistió en un conteo de los valores faltantes para cada una de las variables en las bases de datos, para los periodos de registro respectivos presentados en la Tabla 3.1. En el Anexo B: Detalle de valores faltantes se presentan las figuras con el detalle de los valores horarios perdidos para cada uno de los meses y cada una de las estaciones N/I y NOAA. En esta sección, se presenta un consolidado de los valores faltantes para cada una de las variables por cada grupo de estaciones (Tabla 3.2).

En la Tabla 3.2 se presenta el periodo de registro para cada una de las variables en las estaciones N/I y el porcentaje de valores perdidos en la escala horaria, promediados entre todas las estaciones N/I para ese intervalo de tiempo. La variable con mayor cantidad de valores perdidos en su periodo de registro es la radiación incidente, con un 26.83% de datos faltantes, mientras que la precipitación es la que menos valores perdidos tiene, con un 7.49%. En general, las variables en las estaciones N/I presentan una disponibilidad de datos que permite realizar los análisis propuestos.

Tabla 3.2. Porcentaje de valores horarios perdidos promedio para el periodo de registro de las variables en todas las estaciones N/I

N/I	Temperatura	Humedad relativa	Precipitación	Viento	Radiación incidente
Periodo	2012-2020	2012-2020	2012-2020	2012-2018	2012-2018
% valores perdidos	11.39	13.06	7.49	9.83	26.83

La Tabla 3.3 presenta el periodo de registro para cada una de las variables en las estaciones NOAA y el porcentaje de valores perdidos de manera horaria promediados entre todas las estaciones NOAA durante ese intervalo de tiempo para las variables temperatura y humedad relativa. Para la precipitación, los valores perdidos se cuantificaron a partir de registros diarios. El porcentaje de valores perdidos más alto es para la humedad relativa, con un 26.83%, valor que no representa una cantidad de datos faltantes que pueda afectar los análisis que se realizan en este estudio.

Tabla 3.3. Porcentaje de valores perdidos promedio para el periodo de registro de las variables en las estaciones NOAA. Para temperatura y humedad relativa, los porcentajes corresponden a valores horarios perdidos mientras que para precipitación corresponden a valores diarios perdidos

NOAA	Temperatura	Humedad Relativa	Precipitación
Periodo	2006-2019	2006-2019	2000-2020
% valores perdidos	26.17	26.38	9.3

3.2.3. Filtro de la señal asociada con ENSO

Como ha sido identificado ampliamente en la literatura, el fenómeno ENSO es uno de los principales moduladores del clima global a escala interanual (e.g. Wang, 2004), particularmente en Colombia (Poveda et al., 2006, 2011). En especial, durante el año 2015-2016 ocurrió un evento El Niño de gran

magnitud que generó un aumento de las temperaturas superficiales del aire y disminución en la precipitación, no solo en la región de influencia del embalse sino también a nivel nacional. La ocurrencia de este evento coincidió con los primeros meses después del llenado del embalse Topocoro, por lo que es necesario identificar si los incrementos de temperatura en la región de influencia del embalse observados después del llenado del mismo corresponden al efecto del evento El Niño, o si estos incrementos estuvieron asociados a la presencia del embalse. Es por esto que se hizo necesario filtrar la variabilidad asociada al fenómeno ENSO de los registros de temperatura y humedad relativa disponibles en la región del embalse, con el objeto de identificar cambios adicionales que no estén asociados a este fenómeno, como sería el caso de cambios debidos directamente a la presencia del embalse Topocoro.

Diferentes autores han propuesto métodos para identificar señales de variabilidad en una serie de tiempo. Por ejemplo, Kelly & Jones (1996) identifican que el método de componentes principales (PCA) permite identificar modos de variación del ENSO, de manera que su señal sea removida de la temperatura superficial del aire, disminuyendo significativamente la varianza relacionada con dicho fenómeno. De igual manera, Fernández et al. (2004) resaltan que este método puede capturar satisfactoriamente modos de varianza asociados con el ENSO. Este método agrupa los datos de las estaciones de manera que la información que contienen es resumida en unas nuevas variables, llamadas componentes principales (PC). Estas, a su vez, buscan contener la mayor fracción posible de varianza de los datos originales. Por esto, se eligió utilizar el método PCA con el objeto de identificar la señal generada por el fenómeno ENSO en los registros de temperatura superficial del aire y la humedad relativa provenientes de los dos grupos de estaciones en la región (NOAA y N/I).

La Figura 3.2 ilustra conceptualmente el filtrado de las series de tiempo que permite identificar y extraer la señal ENSO contenida dentro de la serie de anomalías de las variables de cada estación de registro. En este ejemplo ilustrativo, la serie “original” corresponde a la serie de anomalías sin aplicación del filtro para el periodo completo de registros disponibles. Como se mencionó, el método PCA permite identificar y construir una serie que captura el mayor porcentaje posible de variación asociada con el fenómeno ENSO (“Señal ENSO” en la Figura 3.2). Finalmente, la serie “filtrada” corresponde a la resta de la serie original y la señal del ENSO, la cual muestra las variaciones en la temperatura sin considerar la señal ENSO identificada con el método PCA.

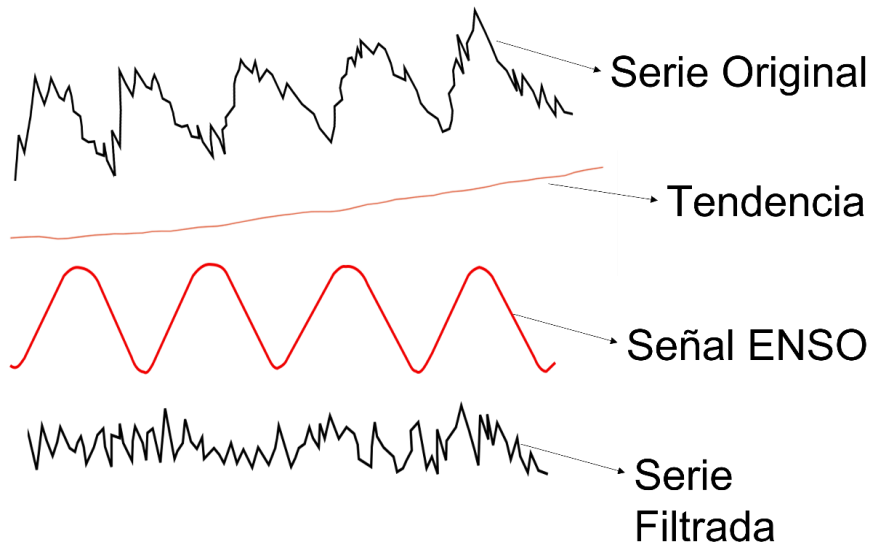


Figura 3.2. Conceptualización de la identificación y remoción de la señal ENSO de una serie de tiempo. “Serie Original” corresponde a la serie de tiempo sin aplicación del filtro. “Tendencia” se refiere a la tendencia identificada en la serie. “Señal ENSO” corresponde a la serie identificada por el método PCA con mayor contribución del fenómeno ENSO. “Serie filtrada” corresponde a la resta de las dos primeras series, indicando la variabilidad de la serie original que no es explicada por el fenómeno ENSO

Para llevar a cabo el procedimiento descrito anteriormente, es necesario que las series de tiempo, las cuales se promedian para llevarlas a escala mensual, no tengan datos faltantes, por lo que se descartaron las estaciones El Marqués y Parroquia debido a que presentan casi un año de registros faltantes. Además, la estación La Estrella presenta una cantidad alta de valores perdidos a partir del año 2019, por lo que el proceso de filtrado se hizo hasta este año, con la finalidad de incluir los datos de esta estación. La estación Villa Mónica presenta un mes faltante que fue rellenado con el promedio multianual de los datos disponibles. Este mismo procedimiento se aplicó para las estaciones NOAA con datos faltantes.

En la Figura 3.3 se presenta un diagrama de flujo del proceso para realizar el filtro. Inicialmente, se removieron las tendencias existentes en las series de anomalías provenientes de los dos grupos de estaciones. Este último procedimiento se encarga de remover una componente como la de “Tendencia”, según se ilustra en la Figura 3.2, que podría estar relacionada con el fenómeno de cambio global, aunque para esta atribución sería necesario un estudio detallado que está por fuera del alcance de este Proyecto. Este procedimiento, además, permite eliminar la no estacionariedad de las series de tiempo. Se continúa con el cálculo de las componentes principales, las cuales se correlacionan con el índice ONI del ENSO para identificar la o las componentes que explican la varianza del ENSO. Finalmente, con las componentes restantes que no se correlacionan con el índice ONI se realiza la reconstrucción de la serie de anomalías para obtener la serie filtrada sin señal de ENSO.

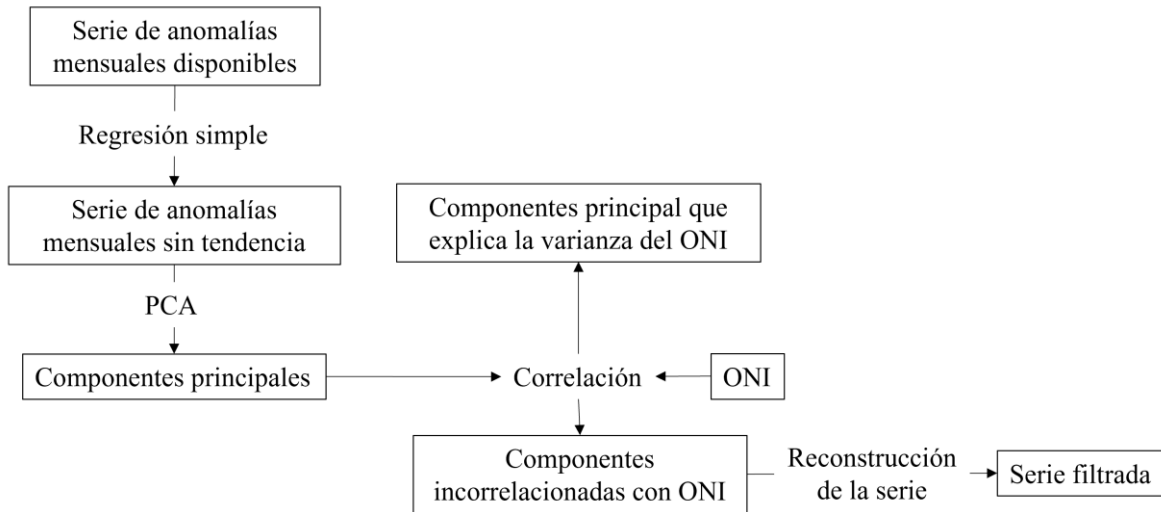


Figura 3.3. Diagrama de flujo describe los pasos para realizar el filtro de la señal del ENSO a los datos

3.3. Resultados y análisis

Dentro de los resultados y análisis generados con la información meteorológica de las estaciones en el área de influencia, se produjo una caracterización de la climatología descrita por las variables para los periodos de análisis disponibles para cada una de ellas (ver Tabla 3.1). Esta caracterización de la climatología se puede encontrar en el Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona. Para esta sección, se realiza una descripción de las variables y los cambios encontrados en las mismas, teniendo en cuenta que en general los datos para las estaciones N/I tienen un registro corto para el periodo del *Antes* del llenado del embalse, por lo que siguiendo la metodología propuesta en la sección anterior, se buscó extraer la mayor cantidad de información posible de los datos. Además, siguiendo el orden lógico de las interacciones representado por los balances de energía y de humedad, se finaliza discutiendo la posible vinculación entre los cambios identificados para las variables y el posible impacto del llenado del embalse en estos.

3.3.1. Radiación incidente

Una vez establecido el comportamiento promedio anual (climatología) de la radiación en el área de influencia del embalse (ver Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona), se analizó el comportamiento de las variaciones de esta variable a lo largo del periodo de registro, por lo cual se recurrió al estudio de sus anomalías mensuales, las cuales se pueden observar Figura 3.4 para dos de las estaciones. Se observan valores positivos de cerca de 60 W/m^2 en el año 2012, posteriores a la finalización del evento La Niña 2010-2012. Estos estarían relacionados con la disminución de la nubosidad y aumento de radiación incidente asociada a las condiciones neutras. También se pueden identificar valores positivos de alrededor de 40 W/m^2 en las dos estaciones mostradas (La Estrella y Guaimaral). Estos aumentos están asociados con la ocurrencia del evento El Niño 2015-2016, representado con una franja roja. Se resalta que este aumento en la variable también es identificado en las demás estaciones N/I (ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). Una de las razones por las que se podría tener este aumento es que durante eventos El Niño,

típicamente se tiene menor nubosidad, por lo que puede llegar más radiación a la superficie. Además, luego de este evento, se puede ver cómo disminuyen los valores hasta aproximadamente -40 W/m^2 mediados del año 2016, y posteriormente se presentan algunas anomalías positivas nuevamente, como ocurre en La Estrella (después de un evento La Niña) y que es similar para el resto de las estaciones N/I. En general, los valores de las anomalías tienden a ser más negativos para estos últimos años del registro, es decir, hay una tendencia a la disminución en la radiación registrada en todas las estaciones N/I, siendo más notable en la estación Guaimaral (comparar Figura 3.4 con figuras en el Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3).

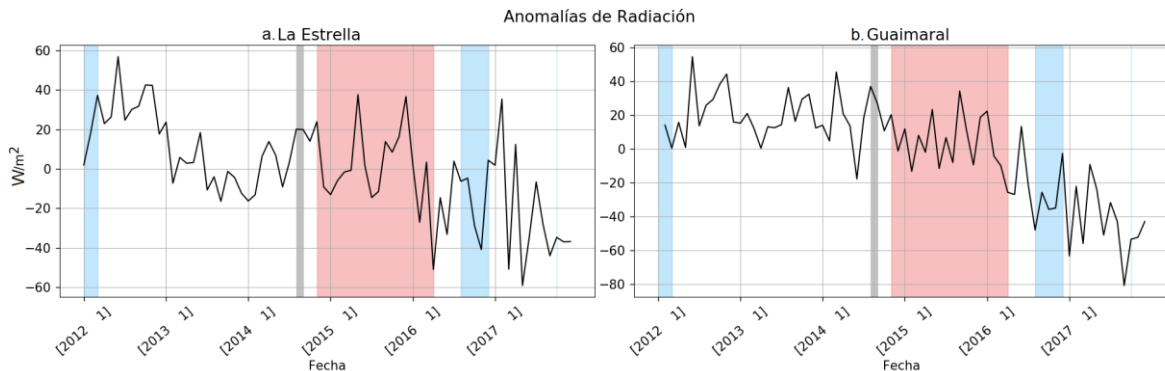


Figura 3.4. Anomalías mensuales de radiación incidente para las estaciones N/I La Estrella y Guaimaral. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

En la Figura 3.5 se presentan los ciclos diarios de radiación incidente para la estación La Estrella (los ciclos diarios para las demás estaciones son similares; ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3), los cuales están divididos entre los periodos *Antes* (2012-2013) y *Después* (2015-2018) del llenado del embalse, en negro y rojo respectivamente. Así, las cajas de la Figura 3.5 representan las horas del día, y cada una de ellas representa la variabilidad para cada hora durante cada uno de los periodos de análisis (el *Antes* y el *Después*). Se puede ver que para el periodo *Después* hay una disminución en los valores de la mediana para todas las horas a lo largo del día, con respecto al periodo *Antes*, con la excepción de las 12 pm y 1 pm. Además, hay un aumento de la varianza en la mayoría de las estaciones, evidenciado por una mayor dispersión en el gráfico del ciclo diario para el periodo *Después*, principalmente en las horas de la mañana y del medio día. Lo anterior podría estar relacionado con un rango temporal más amplio para el periodo *Después*, es decir, una mayor cantidad disponible de datos para cada una de las horas analizadas después del llenado del embalse.

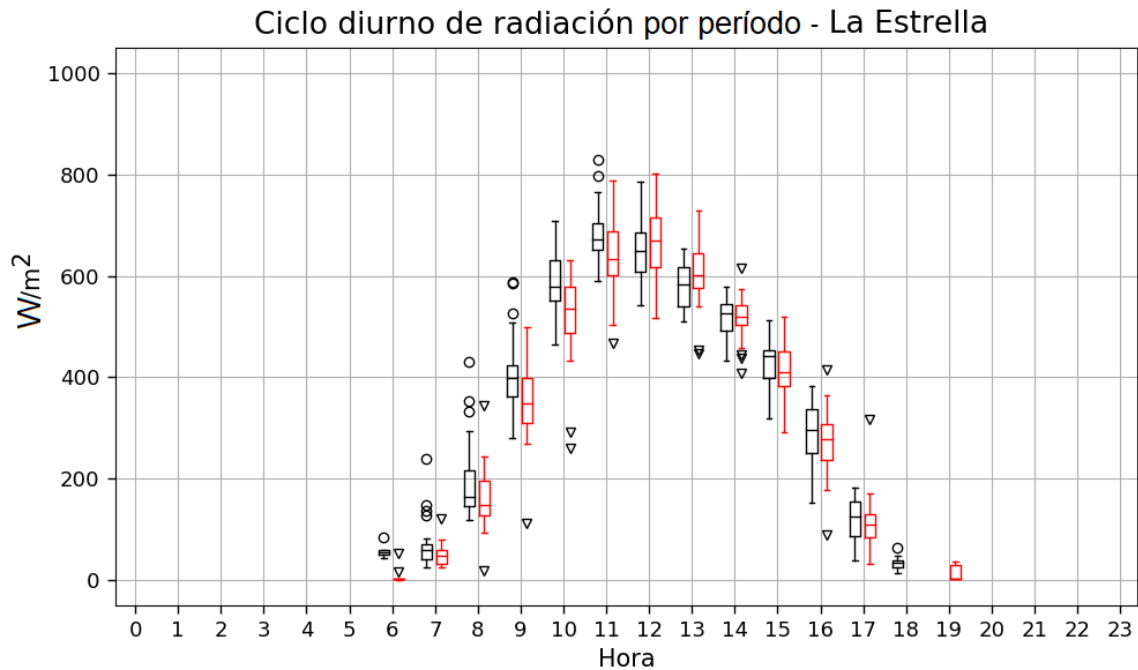


Figura 3.5. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación La Estrella para el periodo Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

Para identificar la magnitud de los cambios entre los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse, se realizaron las pruebas de significancia estadística de diferencia de medias (Figura 3.6). Se observa que, en general, hay disminuciones de los valores medios de la variable, pero estos solo son estadísticamente significativos en las estaciones de La Estrella y Guaimaral, con disminuciones de $24W/m^2$ y $38W/m^2$, respectivamente. La estación El Cedral presenta un aumento estadísticamente significativo de $26W/m^2$, mientras que para el resto de las estaciones no se tiene significancia estadística, lo que indicaría que son variaciones que se encuentran dentro de los rangos normales de variabilidad de la radiación incidente. Así, en la mayoría de las estaciones N/I, los valores permanecen similares, indicando que, en general, no hay un cambio en la radiación que llega a estas estaciones, según se observa al comparar los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse.

De este modo, las mediciones no sugieren aumentos homogéneos en la radiación incidente que puedan incrementar la radiación neta en el balance de energía para las estaciones.

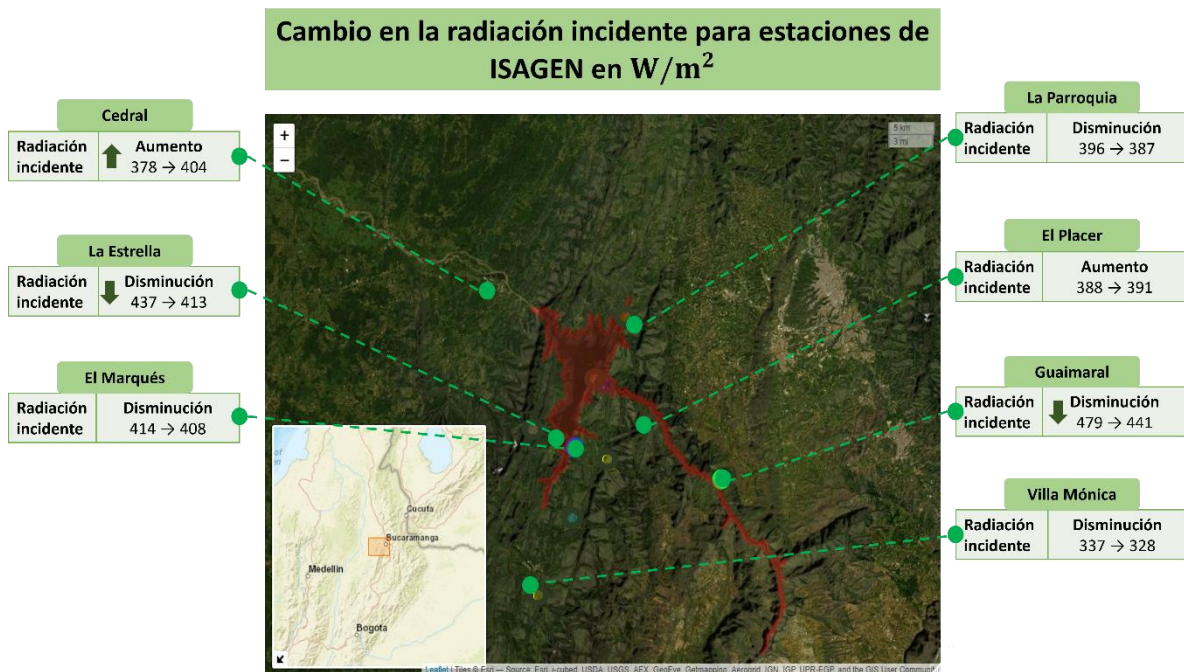


Figura 3.6. Cambio en la radiación incidente (W/m^2) para las estaciones de N/I en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo

3.3.2. Precipitación

La precipitación representa la mayor entrada en el balance de humedad en superficie, y sus variaciones pueden llevar a aumentos o disminuciones en la cantidad de agua disponible para evaporar desde los suelos. Esta es la única variable de la que se tiene registro para el balance de humedad con los datos medidos por las estaciones N/I y NOAA. Los datos para esta variable tienen un periodo de registro entre enero de 2012 y octubre de 2020 para N/I y entre enero de 2000 y octubre de 2020 para NOAA.

Luego de realizar la caracterización general de la climatología de la variable (ver Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona), se continuó con el análisis de las variaciones de esta mediante las anomalías mensuales, teniendo en cuenta los momentos de ocurrencia de eventos ENSO, representados por las franjas de colores rojo (El Niño) y azul (La Niña) en la Figura 3.7, en la que se muestran las anomalías de precipitación para las estaciones La Estrella y Parroquia. La estación Parroquia es una de las estaciones con anomalías de mayor magnitud, de aproximadamente 8 mm/día para finales de 2018, en una fase neutra del ENSO, luego de un evento La Niña. Las anomalías para esta estación son superadas únicamente por las exhibidas en la estación Cedral, de hasta 10 mm/día para el evento La Niña entre 2016 y 2017 (ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). Por su parte, en la estación La Estrella, las anomalías son aproximadamente -4 mm/día para los eventos El Niño 2015-2016, 2018-2019 y 2019-2020, como se puede ver en la Figura 3.7 (similar para el resto de las estaciones N/I; ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). En esta estación las anomalías positivas más elevadas se dan en un periodo neutro en 2018 y alcanzan aproximadamente +8 mm/día.

En general, es clara la disminución en las precipitaciones asociadas con la ocurrencia de eventos El Niño, sobre todo en El Niño 2015-2016, evento de gran duración y magnitud para el que se tienen

anomalías negativas en todas las estaciones (ver Figura 3.7; ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). En el caso de los eventos La Niña, la poca ocurrencia (solo dos eventos) y corta duración de estos en el periodo de registro parece afectar la identificación de la relación esperada con la precipitación. Así, con el fin de identificar con mayor claridad el efecto de los eventos ENSO en la zona, se usaron los datos para la estación San Vicente de Chucurí de los datos disponibles de IDEAM, para el periodo entre los años 2000 y 2020. En la Figura 3.8 se observan las anomalías de precipitación para esta estación entre los años mencionados. El rango temporal más extenso que tiene esta estación permite poner en un contexto el evento El Niño 2015-2016, al observar que las anomalías negativas de precipitación asociadas con este evento son las más bajas para ese periodo de tiempo entre los años 2000 y 2020. Además, es posible observar un comportamiento general más claro, donde se identifica que los eventos El Niño tienden a estar asociados con disminuciones en la precipitación, mientras que los eventos La Niña tienden a estar asociados con aumentos de esta variable.

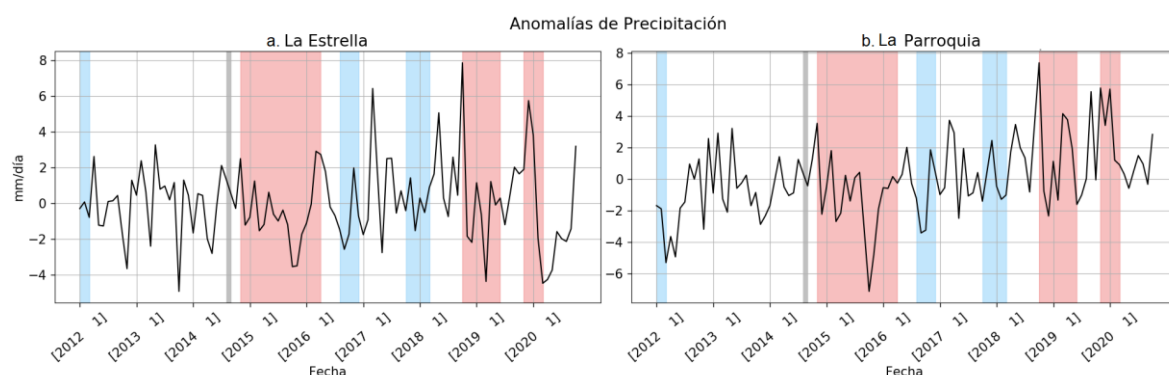


Figura 3.7. Anomalías mensuales de precipitación para las estaciones N/I La Estrella y Parroquia. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

Para una mejor identificación de cómo cambia la precipitación ante la ocurrencia de eventos ENSO, se comparó la precipitación promedio durante los eventos El Niño, La Niña y Neutros. El análisis de estos promedios permite identificar el comportamiento general de la precipitación para cada fase del ENSO. Para la estimación de estos promedios se tuvieron en cuenta las estaciones de N/I y de NOAA. En la Figura 3.9 se observan los promedios para las estaciones La Estrella y Villa Mónica de N/I y para San Vicente de Chucurí y José María Córdova de NOAA. En las estaciones con los periodos de registro más largos (San Vicente de Chucurí y José María Córdova; 2000-2020; en Figura 3.9) se puede identificar el comportamiento típico reportado en la literatura para la zona Andina de Colombia: mayor precipitación durante La Niña y menor precipitación durante El Niño. Para periodos de registro más cortos, como es el caso de las estaciones N/I, este comportamiento no es evidente, como en el caso de La Estrella que se ve en la Figura 3.9, y Guaimaral, Marqués, Parroquia y Placer (ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). Esto se puede deber a que los periodos más cortos contienen menos eventos ENSO, lo cual no permite ver patrones generales de largo plazo. Sin embargo, la estación Villa Mónica (Cedral es similar; ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3) es una excepción, pues se puede ver el comportamiento esperado, pues durante La Niña se observan anomalías de precipitación mayores que durante los eventos neutros, mientras que las anomalías durante El Niño son típicamente menores a las anomalías durante eventos neutros. A grandes rasgos, la estación San Vicente de Chucurí del IDEAM, la cual presenta un periodo de registro de mayor longitud, permite identificar que el comportamiento de la precipitación en el área de influencia del embalse se encuentra dominado, entre otros fenómenos, por las fases del ENSO (ver Figura 3.8 y Figura 3.9).

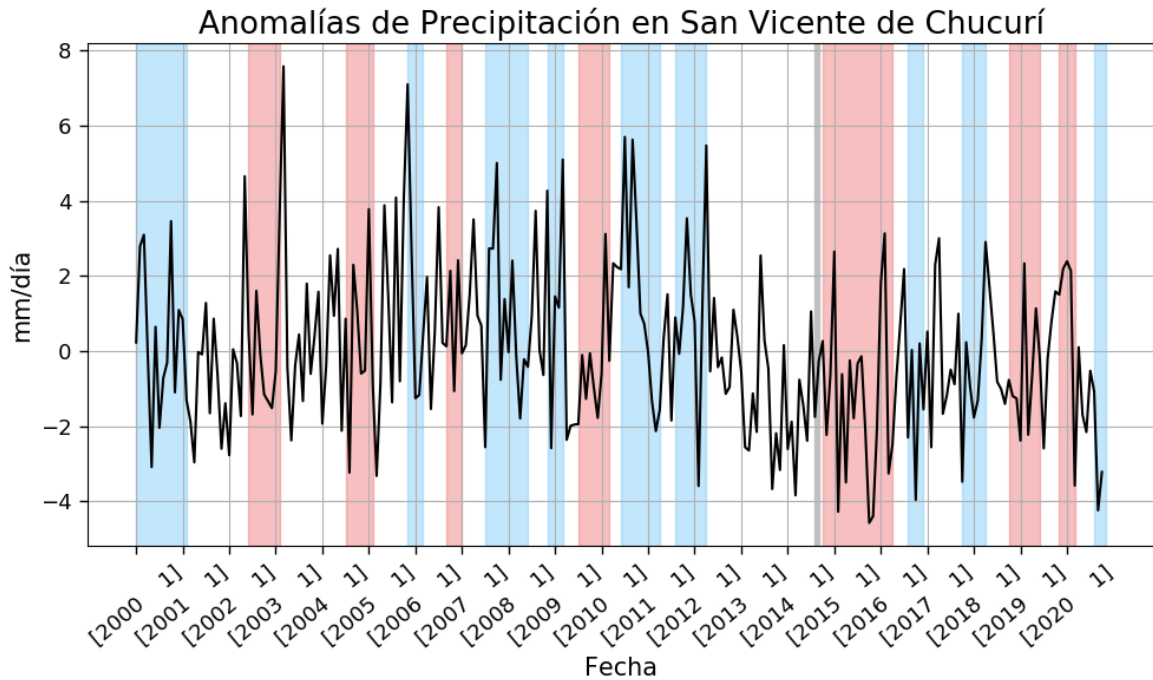


Figura 3.8. Anomalías mensuales de precipitación para la estación NOAA San Vicente de Chucurí. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

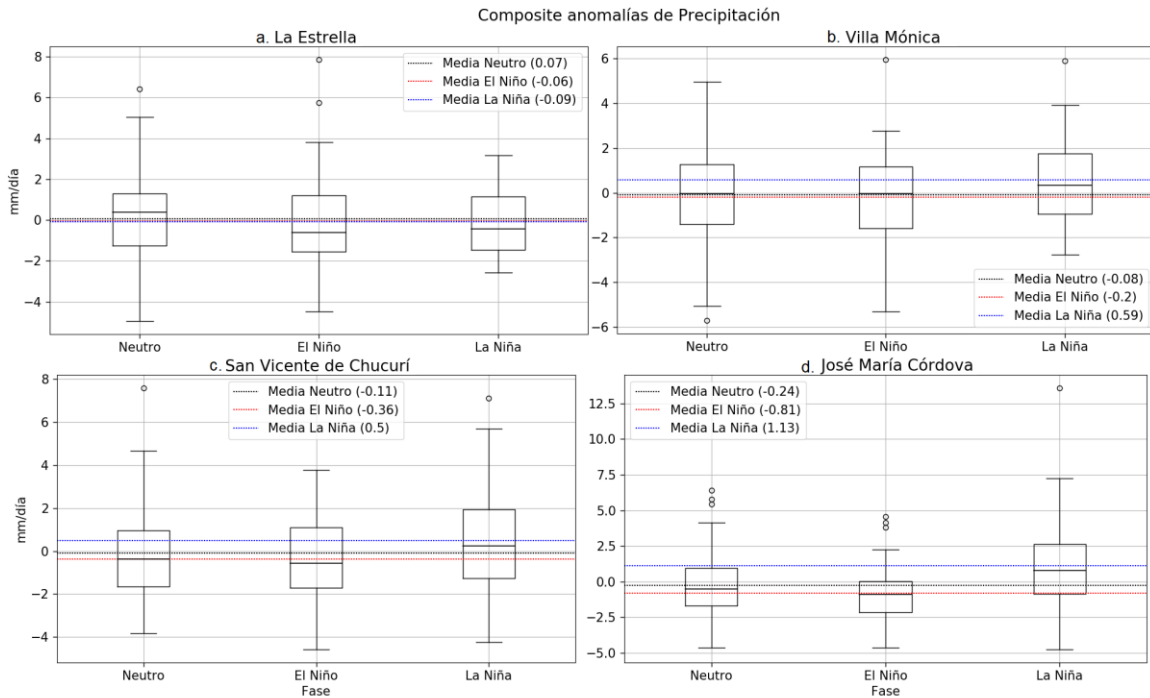


Figura 3.9. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en las estaciones N/I La Estrella y Villa Mónica, y las estaciones NOAA San Vicente de Chucurí y José María Córdova. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

Finalmente, se realizó una prueba estadística para la comparación de medias entre los periodos para *Antes* (2012-2013) y *Después* (2015-2020) del llenado del embalse, según se muestra en la Figura 3.10. En general, se observa que todas las estaciones registran un aumento de los valores medios de precipitación después del llenado del embalse. Sin embargo, este aumento no es muy grande y solamente es estadísticamente significativo para las estaciones de Cedral y La Parroquia, con aumentos de 2.9 mm/día y 1.4 mm/día, respectivamente. Lo anterior significa que, estadísticamente, la precipitación en la mayoría de la zona de influencia permanece con valores aproximadamente similares entre los dos periodos (*Antes* y *Después*), con diferencias que podrían estar explicadas por las variaciones naturales de esta variable.

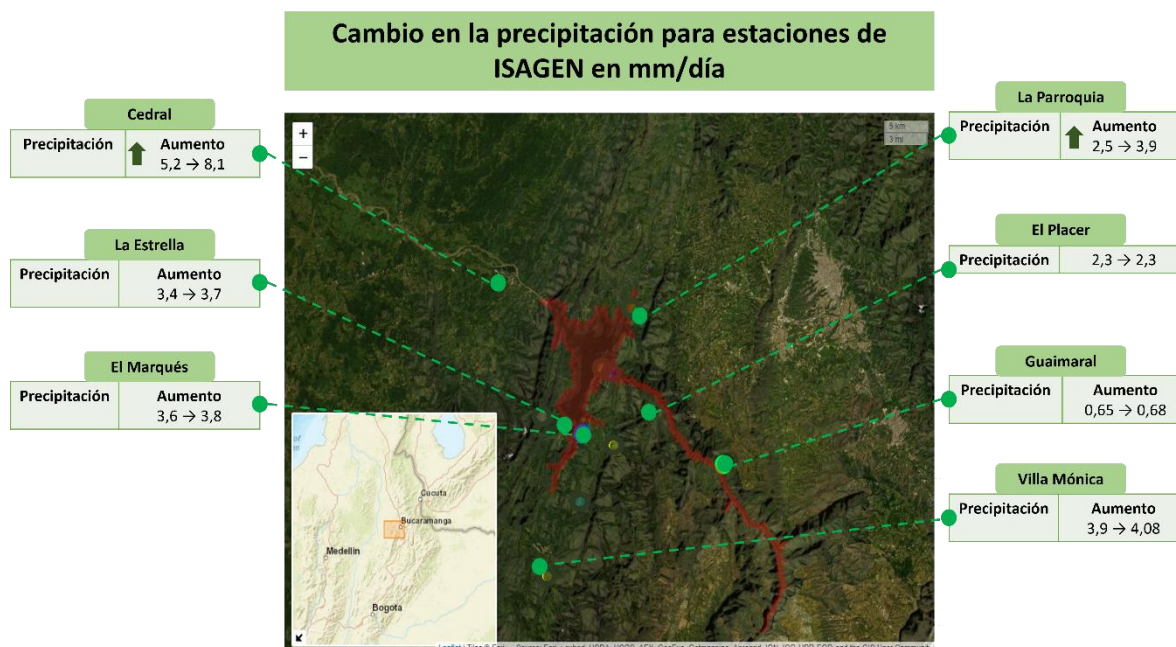


Figura 3.10. Cambio en la precipitación (mm/día) para las estaciones de N/I en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo

3.3.3. Velocidad y dirección del viento

La velocidad y dirección de los vientos se analizaron entre los años 2012 y 2018, debido a un cambio en la altura a la que se encontraba el sensor. Para esta variable se realizó un análisis mediante rosas de vientos, separadas por bloques promediados de 6 horas, de manera que se tienen los bloques entre medianoche y 6am (Madrugada), 6am y mediodía (Mañana), mediodía y 6pm (Tarde), y 6pm y medianoche (Noche). Estos bloques son analizados para los periodos *Antes* (2012-2013) y *Después* (2015-2018) del llenado del embalse.

La caracterización general del comportamiento de los vientos se puede ver en el Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona. En la Figura 3.11 se observan las rosas de vientos para los cuatro bloques considerados. Se puede identificar que las direcciones del viento son muy similares entre los periodos *Antes* y *Después*, con apenas algunas variaciones, como es el caso de La Estrella y Villa Mónica para el bloque de la Madrugada (Figura 3.11 Madrugada); Guaimaral, El Marqués y Villa Mónica para el bloque de la Mañana (Figura 3.11 Mañana); La Estrella para el bloque en la Tarde (Figura 3.11 Tarde); y finalmente, El Placer para el bloque de la Noche (Figura 3.11 Noche).

En general, se observan pequeñas variaciones en la dirección del viento, pues se conserva el cuadrante principal desde el cual se dirige el viento. Por el contrario, la velocidad de los vientos presenta diferencias más notorias. Por ejemplo, para la estación Parroquia se pueden ver velocidades más altas (colores más cálidos) *Después* del llenado, lo cual ocurre para todos los bloques del día (ver Figura 3.11). Algo similar ocurre en la estación Guaimaral. El aumento en la velocidad del viento de estas estaciones se podría deber a que el cuerpo de agua disminuye la fricción que ejerce la superficie sobre el flujo del viento, con lo que los vientos que llegan desde el embalse a estas estaciones pueden tener una mayor velocidad luego del llenado del embalse. Por otra parte, en estaciones como La Estrella, Cedral y Villa Mónica se pueden apreciar cambios hacia velocidades más bajas *Después* del llenado (colores más fríos). Para El Marqués se observa una diferenciación del cambio de la velocidad según los momentos del día: para la Mañana y la Tarde se puede identificar un aumento en la velocidad de los vientos, mientras que para la Noche y la Madrugada se identifican disminuciones. Para el caso de esta estación, la relación con el embalse no sería tan directa como para Guaimaral y Parroquia, pues los vientos no vienen desde el embalse en esta estación, sino que van hacia el embalse; sin embargo, por esta misma razón podrían estar aumentando su velocidad durante el día (luego de que los vientos sobre el embalse y corriente abajo se aceleran).

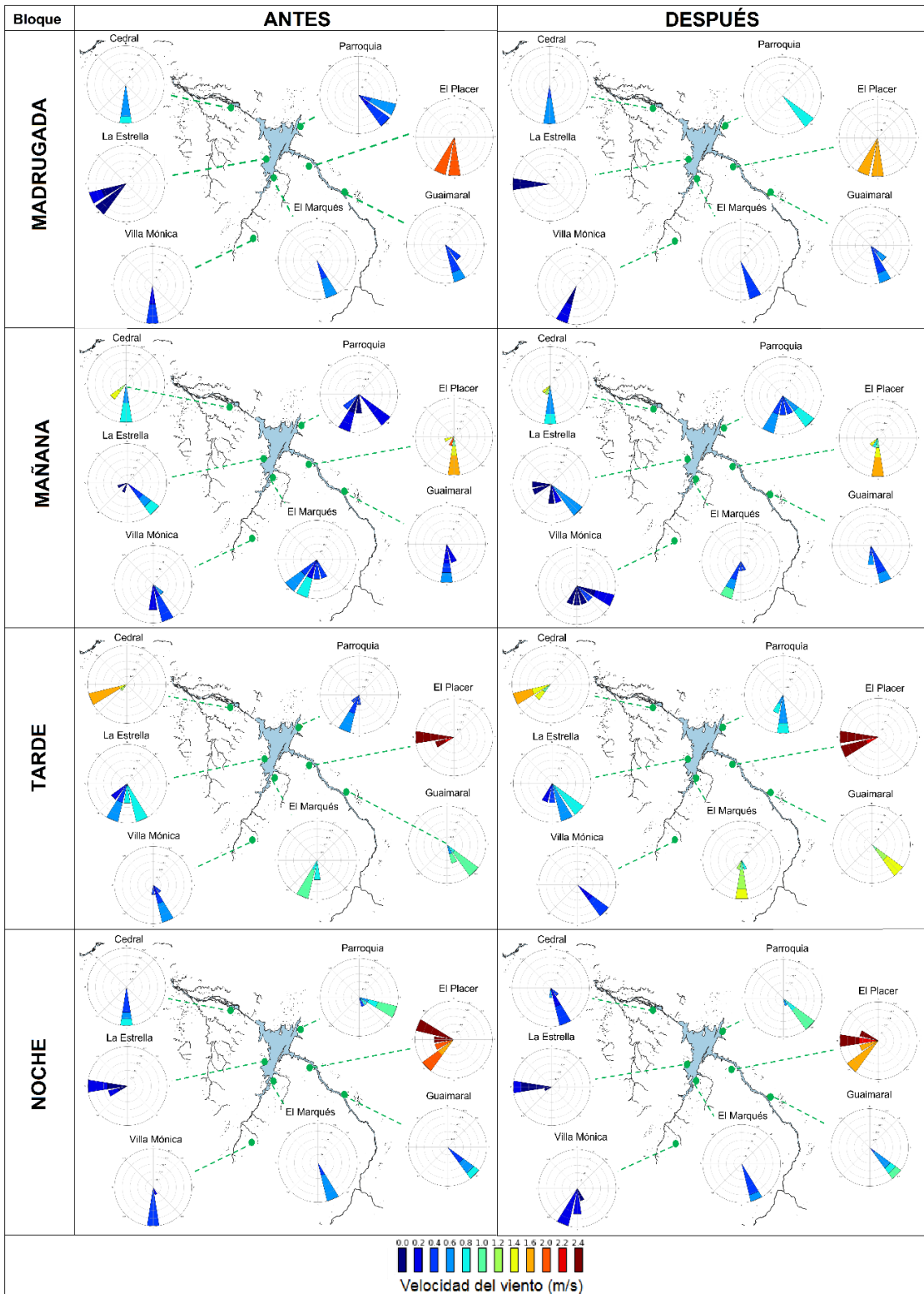


Figura 3.11. Rosas de vientos para las estaciones N/I en el área de influencia del embalse separadas para los periodos de Antes (2012-2013) y Después (2015-2018) del llenado del embalse, para diferentes momentos del día, separados en bloques de 6 horas: medianoche-6am (bloque Madrugada), 6am-miércoles (bloque Mañana), miércoles-6pm (bloque Tarde), y 6pm-medianoche (bloque Noche)

También se realizó una prueba estadística para la diferencia de medias en la velocidad del viento entre los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse en las estaciones N/I. Los resultados se pueden observar en la Figura 3.12. Como se mencionó, hay disminuciones de la velocidad del viento en Cedral, La Estrella y Villa Mónica, con valores de 0.1 m/s, 0.09 m/s y 0.19 m/s en promedio, respectivamente. Estas disminuciones son generalizadas para todos los momentos del día y, como se puede ver en la Figura 3.12, son estadísticamente significativas. Por su parte, en las estaciones Parroquia y Guaimaral se presentan aumentos estadísticamente significativos de la velocidad del viento en todos los momentos del día, del orden de 0.24 m/s y 0.2 m/s, respectivamente. Para la estación El Marqués se encontró que el cambio es diferenciado durante el día, pero se tiene un efecto neto de aumento en la velocidad del viento del orden de 0.05 m/s, el cual es estadísticamente significativo. Finalmente, la estación El Placer presenta una disminución que no es estadísticamente significativa.



Figura 3.12. Cambio en la velocidad del viento en (m/s) para las estaciones N/I en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo

3.3.4. Temperatura

La temperatura superficial del aire y la humedad relativa son dos variables hidrometeorológicas de gran importancia y directo impacto en el funcionamiento de los ecosistemas, el bienestar y confort de las poblaciones, y el estado y desarrollo de cultivos. La temperatura y la humedad dependen de los balances superficiales de energía y humedad, y por tanto están relacionadas con otras variables y flujos de superficie. En las siguientes subsecciones (1.3.4 y 1.3.5) analizamos en detalle las variaciones y posibles cambios en la temperatura y la humedad relativa, a través de métodos e interpretaciones en el marco de los cambios en otras variables (también involucradas en los balances de energía y humedad), tanto por cambios en cobertura (*Antes* y *Después* del llenado del embalse) como por variaciones asociadas a las diferentes fases del ENSO.

Cambios en los datos originales

Para analizar los posibles cambios en la temperatura, se calcularon las anomalías mensuales de cada estación con respecto a su propio promedio. En la Figura 3.13 se muestran las anomalías de temperatura para la estación de Guaimaral de N/I y la estación Palo Negro de NOAA, en las que se indican las franjas rojas y azules que representan la ocurrencia de evento ENSO. Los resultados muestran que durante el periodo entre 2012 y finales de 2014, durante el cual el ENSO exhibió condiciones neutras, las anomalías de temperatura oscilan alrededor de 0°C , alcanzando como máximo 1°C por encima o por debajo de la media. Además, se puede observar que cuando se presenta un evento ENSO (en sus dos fases), las anomalías positivas o negativas tienden a aumentar, según sea el caso: anomalías positivas durante El Niño y negativas durante La Niña. Esto último se puede ver más claramente en el caso de la estación Palo Negro para el evento El Niño 2009-2010 (Figura 3.13), que está precedido y sucedido por eventos La Niña. En este caso, las anomalías en esta estación muestran valores negativos antes de la ocurrencia del evento El Niño, con valores de hasta 1°C por debajo del promedio, mientras que las anomalías se vuelven positivas durante la ocurrencia de dicho evento, alcanzando valores de 2°C por encima del promedio, para luego hacerse negativas nuevamente al entrar en la siguiente fase La Niña.

Los registros de las estaciones NOAA capturan la ocurrencia de más eventos ENSO, debido a su extensión temporal, por lo que se logra identificar que la magnitud de las anomalías es similar entre los eventos El Niño 2009-2010 y El Niño 2015-2016 para las estaciones Camilo Daza (ver Figura 3.14), San Antonio del Táchira y Yariguies (ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). Esto es importante dado que El Niño 2009-2010 ocurrió en condiciones sin embalse mientras que El Niño 2015-2016 ocurrió pocos meses después de finalizar el llenado del embalse. Para las estaciones N/I, no se tiene registro de datos para el evento 2009-2010, por lo que no se podría afirmar que localmente ocurrió lo mismo, pero es importante tener en cuenta que esto sucedió en estaciones por fuera del área del embalse, pero ubicadas dentro de la misma región (ver Figura 3.1). Además, es posible que en el caso de la estación Palo Negro, las anomalías observadas durante el evento El Niño 2009-2010 sean menores a las del evento El Niño 2015-2016 debido a que la intensidad de este último evento fue mayor a la observada para El Niño 2009-2010 a nivel global (Figura 3.13).

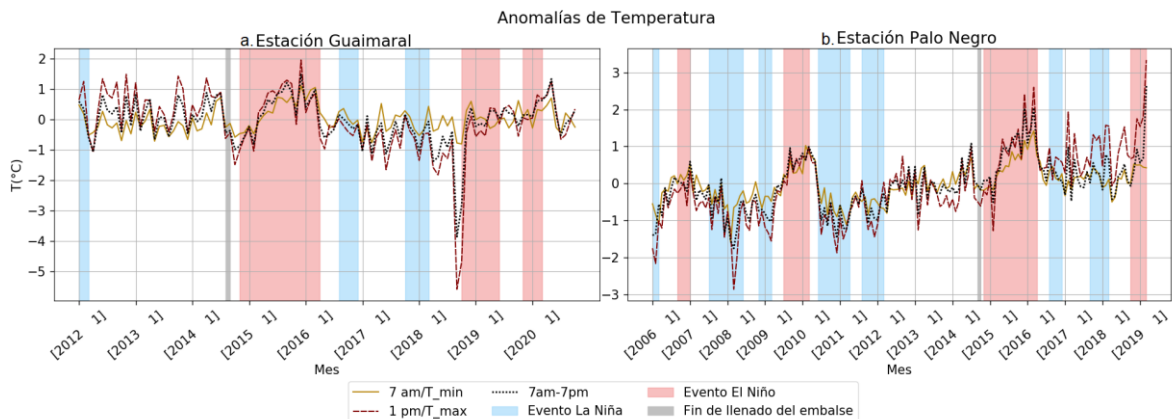


Figura 3.13. Anomalías de temperatura para la estación Guaimaral de N/I y la estación Palo Negro de NOAA. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

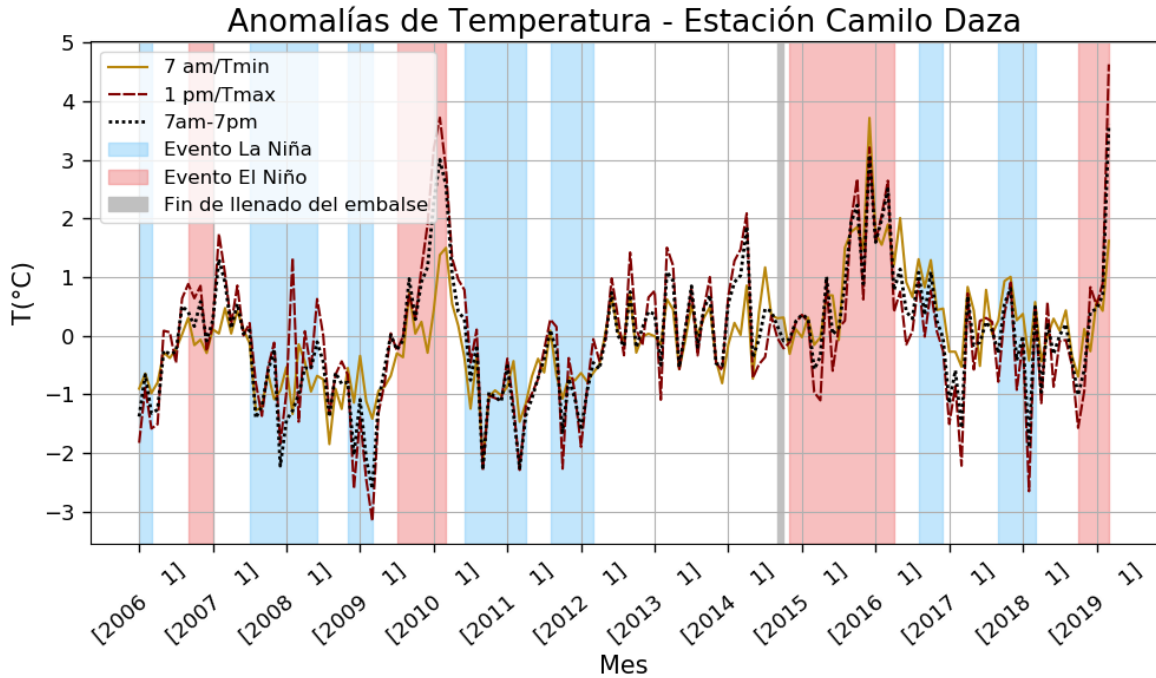


Figura 3.14. Anomalías de temperatura para la estación Camilo Daza. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

Para ilustrar lo que un fenómeno de gran escala como el ENSO puede generar en términos climáticos en diferentes ciudades del país, la Figura 3.15 muestra las anomalías mensuales en los aeropuertos de las ciudades de Bogotá, Cali y Medellín. Si bien la magnitud de las anomalías para estas estaciones no es la misma que para las estaciones ubicadas en cercanías del embalse Topocoro, cualitativamente se puede observar el mismo comportamiento destacado en los párrafos anteriores. En este sentido, anomalías positivas de temperatura (calentamiento) se observan durante El Niño mientras que anomalías de enfriamiento se observan durante La Niña. También se puede observar la similitud de las magnitudes entre los picos de anomalías para los eventos El Niño 2009-2010 y El Niño 2015-2016, que están cerca de los 2°C sobre el promedio, lo que pone en un contexto nacional la escala de ambos eventos.

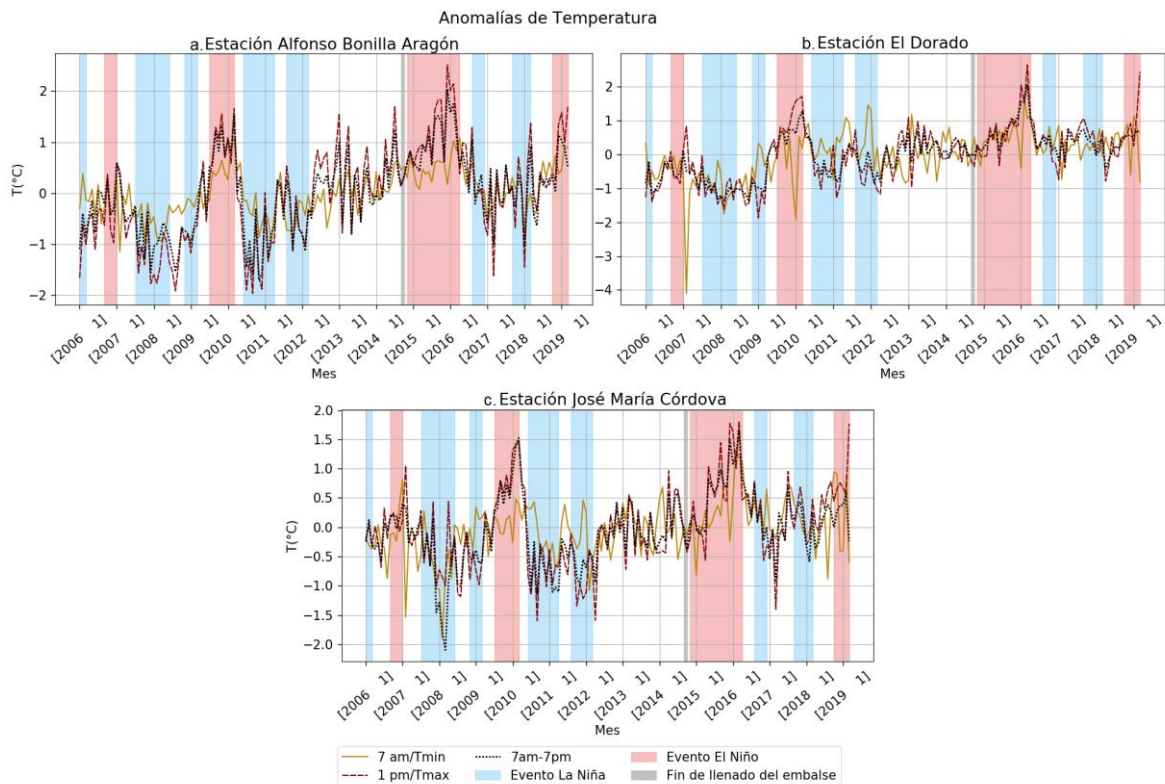


Figura 3.15. Anomalías de temperatura calculadas para aeropuertos de principales ciudades. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

Señal del ENSO en la temperatura

La ocurrencia de eventos El Niño se asocia a un aumento de la temperatura en la región de influencia del embalse, mientras que la ocurrencia de eventos La Niña se asocia con disminución de temperatura en la misma región. Esto es consistente en los dos grupos de estaciones analizadas, tanto para la escala local (estaciones N/I) como regional (estaciones NOAA). En la Tabla 3.4 se muestran las correlaciones entre las series de anomalías mensuales y los valores para el índice ONI, representativo de la ocurrencia de fenómenos ENSO. El sentido de las correlaciones en la Tabla 3.4 indica que cuando el índice ONI aumenta, las anomalías de temperatura también aumentan, y viceversa. Además, la magnitud de los valores da cuenta de la fuerte relación entre las variaciones en la temperatura superficial del aire en las estaciones y la ocurrencia del fenómeno. También se puede observar que en general, las correlaciones para las estaciones NOAA son más fuertes que para las estaciones N/I, lo que se puede deber a la mayor extensión temporal de las primeras, que permite capturar de mejor manera la relación de largo plazo entre el fenómeno y el comportamiento de la variable.

Dentro de los eventos ENSO que han ocurrido en el periodo de registro de las variables se encuentra El Niño 2015-2016, el cual se ha mencionado en las secciones anteriores por su gran magnitud y los aumentos generados en la temperatura superficial del aire, no solo en la región de influencia del embalse sino también a nivel nacional. La ocurrencia de este evento coincidió con los primeros meses después del llenado del embalse Topocoro, por lo que se hizo necesario identificar si los incrementos

de temperatura en la región de influencia del embalse observados después del llenado del mismo corresponden al efecto del evento El Niño en mención, o si estos incrementos estuvieron asociados a la presencia del embalse. Es por esto que se realizó un filtro de la variabilidad asociada al fenómeno ENSO de los registros de temperatura disponibles en la región del embalse, con el objeto de identificar cambios adicionales que no estén asociados a este fenómeno, como es el caso de los cambios asociados directamente al embalse Topocoro. Se debe recordar que para realizar el filtro de la señal del ENSO mediante análisis de componentes principales, se tomó el periodo entre 2012 y 2019 para las estaciones N/I, con la finalidad de usar los datos para la estación La Estrella, que presenta valores perdidos posteriores al año 2019, y que no se tuvieron en cuenta las estaciones Parroquia y El Marqués por la alta cantidad de datos faltantes.

Tabla 3.4. Correlaciones entre las series de tiempo de temperatura de los dos grupos de estaciones consideradas (NOAA y N/I) y el índice ONI del ENSO. La intensidad del color representa la magnitud de la correlación. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Serie completa											
	Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado	Cedral	La Estrella	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Índice ENSO	0,59	0,26	0,69	0,46	0,7	0,67	0,62	0,31	0,34	0,33	0,47	0,44

Luego de calcular las componentes principales, se calcularon las correlaciones entre las mismas y el índice ONI, las cuales se observan en la Tabla 3.5. Se puede ver que la primera componente principal de cada grupo de estaciones tiene una correlación alta (valores absolutos superiores a 0.4; ver Tabla 3.5) con el índice ONI del ENSO, por lo que esta componente es elegida para reconstruir la señal asociada al fenómeno ENSO, como se planteó en la Figura 3.2. Además, esta componente explica aproximadamente el 60% de la varianza que presentan las estaciones, con lo que se puede concluir que el ENSO está asociado al menos al 60% de la varianza identificada en las anomalías de temperatura superficial del aire alrededor del embalse Topocoro. Es decir, el ENSO está asociado a más del 50% de las variaciones que se identifican no solo a nivel local sino también regional (es decir, a escala de varios departamentos). Es importante resaltar que no se puede asegurar que el 40% de la varianza restante es estrictamente generada únicamente por procesos locales, pues como se mencionó anteriormente, dentro de esta variabilidad podría existir la influencia de otros fenómenos de gran escala o de escala regional.

Tabla 3.5. Correlaciones entre las componentes principales de las series de temperatura y el índice ONI del ENSO para los dos grupos de estaciones (NOAA y N/I). Colores igual que en la Tabla 3.4. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Componentes principales											
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Índice ENSO	0,65	0,02	-0,32	0,14	-0,04	0,01	0,03	-0,42	0,07	-0,26	-0,15	-0,03

Tabla 3.6. Correlaciones entre las series sin la señal del ENSO y el índice ONI. Colores como en Tabla 3.4. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Serie filtrada											
	Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado	Cedral	La Estrella	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Índice ENSO	0,02	-0,07	0,26	-0,23	0,3	0,24	0,19	-0,1	0,1	-0,24	0,06	0,16

Una vez identificada la señal asociada al ENSO, se realizó la sustracción de esta señal a cada una de las series de tiempo de anomalías de temperatura registradas por las estaciones disponibles, y se calculó nuevamente la correlación con el índice ONI (ver Tabla 3.6) para verificar que la señal ha sido eficientemente removida (comparar con los valores presentados en la Tabla 3.4). Los valores en la Tabla 3.6 indican una clara reducción de la correlación con el índice ONI para las series filtradas,

con respecto a las series originales, con lo que se puede decir que, si bien no es posible garantizar una atribución del 100% de la señal al fenómeno ENSO, se captó una buena parte de la misma.

La Figura 3.16 y la Figura 3.17 muestran una comparación entre la serie original y la serie filtrada para dos estaciones particulares, con la finalidad de ver las variaciones en las anomalías de temperaturas del aire debidas a la ocurrencia del fenómeno ENSO. En general, se busca destacar la información enmarcada en los recuadros rojos (para eventos El Niño) y los recuadros azules (para eventos La Niña). Además, se puede comparar una estación en el área de influencia del embalse (Guaimaral, Figura 3.16) y una que no está en el área de influencia (Palo Negro, Figura 3.17), con el objetivo de mostrar similitudes que se dan a una escala mayor que la del embalse. En general, a estas escalas mayores nos referimos como “escala regional”, e incluye escalas como la departamental y la nacional.

En la Figura 3.16 se puede observar la comparación entre las series para la estación Guaimaral de N/I. Si bien la amplitud de las variaciones en las anomalías de temperatura es más reducida para todo el rango temporal en la serie filtrada, se debe prestar especial atención al comportamiento de las series durante el evento El Niño 2015-2016 y los eventos La Niña posteriores a este. Para el primero, se observa cómo los picos de anomalías pasan de oscilar alrededor de un valor cercano a $+1^{\circ}\text{C}$ a hacerlo alrededor de 0°C . Aunque se siguen registrando anomalías positivas, estas no se alejan tanto de la media, con un valor máximo de aproximadamente $+0.4^{\circ}\text{C}$. Esto significa que las anomalías de temperatura asociadas con otros factores diferentes al ENSO son menores que las generadas por éste. Además, para los eventos La Niña ocurridos después de 2016, no solo se reduce la amplitud, sino que incluso cambia el signo de las anomalías asociadas a fenómenos diferentes al ENSO.

De manera similar a la estación Guaimaral (en la porción más alejada del área de influencia del embalse), la Figura 3.17 muestra esta comparación para la estación Palo Negro (no incluida en el área de influencia del embalse; datos de NOAA). Lo destacable de esta estación es que debido a su mayor cobertura temporal, es posible ver el comportamiento del filtro para una mayor cantidad de eventos ENSO. De manera general se puede identificar que la serie de tiempo filtrada tiene menor amplitud en los picos relacionados con los eventos ENSO. En algunos casos, como para los eventos La Niña y El Niño ocurridos entre 2007 y 2010, no solo se reduce la amplitud del pico de las anomalías, sino que cambia su signo sugiriendo que sin la influencia del fenómeno ENSO, dichos años habrían sido más cálidos que el promedio en el caso La Niña, o más fríos que el promedio en el caso de El Niño. Esto sería posible si se considera que los mecanismos que el fenómeno ENSO impone en la circulación no están activos, pero se hace énfasis en que el resultado presentado proviene de un filtro estadístico, por lo que no se está asegurando que el comportamiento resaltado necesariamente sería el ocurriente. Para La Niña 2010-2011 también se reduce la amplitud de las anomalías de temperatura. En el caso del evento El Niño 2015-2016, la amplitud se reduce en 1.5°C en el caso de los picos más grandes observados durante la ocurrencia de este evento. Lo anterior corrobora que la mayor parte de las anomalías observadas durante estos años se asoció a la ocurrencia de eventos ENSO.

Lo anterior permite plantear la hipótesis de que los cambios más fuertes en la temperatura del aire en el área de influencia del embalse podrían ser directamente conducidos por el fenómeno ENSO. Por ejemplo, en la Figura 3.16, entre finales de 2014 (después del llenado del embalse) y 2016, la temperatura que incluye ENSO (curva negra) aumenta más que la temperatura de la serie en la que se han filtrado efectos de ENSO (curva roja). Específicamente, la curva negra alcanza valores alrededor de $+1.3^{\circ}\text{C}$, mientras que la curva roja alcanza valores de $+0.5^{\circ}\text{C}$. Además, el mismo tipo

de comportamiento se observa en una estación que no está en el área de influencia del embalse, como lo es la estación Palo Negro (Figura 3.17).

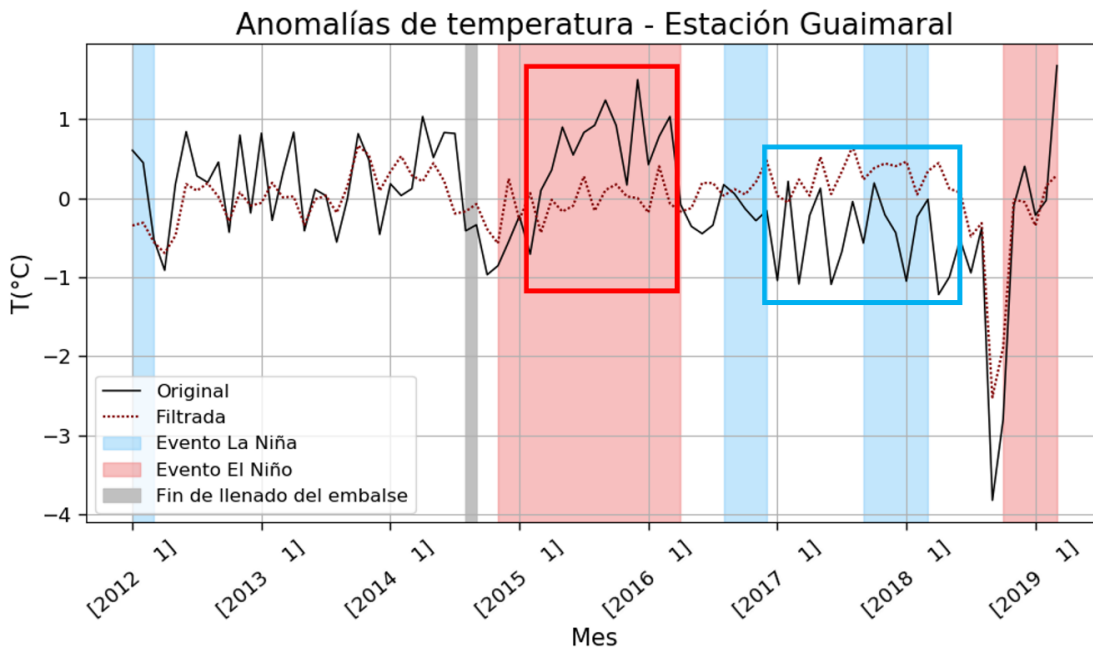


Figura 3.16. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para una estación N/I. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

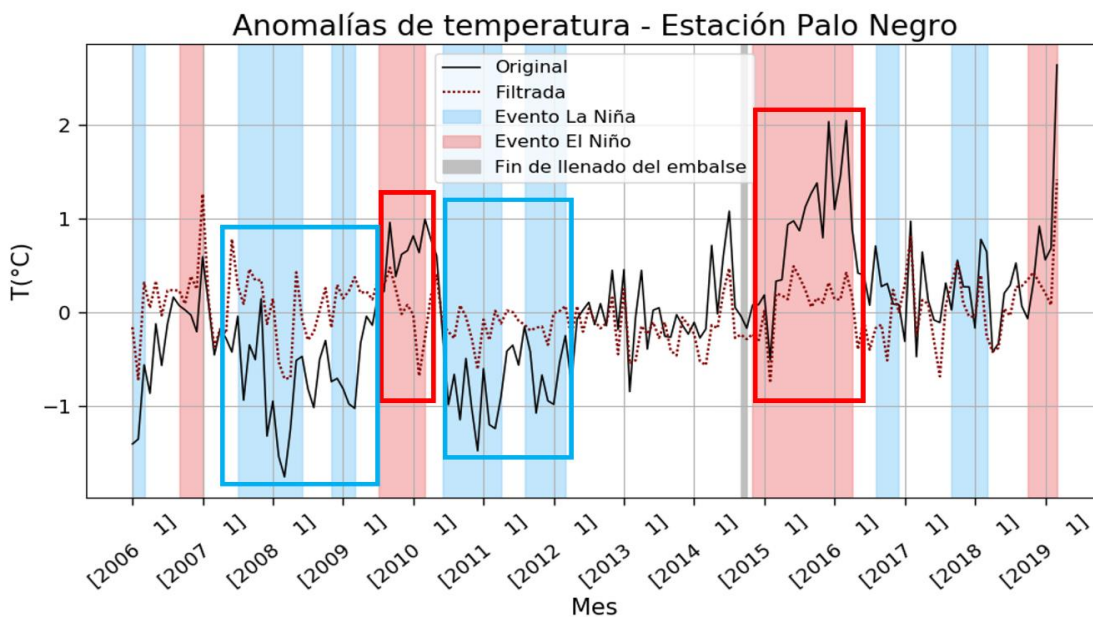


Figura 3.17. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para una estación NOAA. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

La Figura 3.18 presenta el resultado para las pruebas de significancia estadística de diferencia en los valores medios entre los periodos *Antes* y *Después* para los datos medidos directamente por las estaciones, así como para los valores filtrados (recordando que los datos para El Marqués y La Parroquia no se filtraron debido a la gran cantidad de valores perdidos). Debido a que los valores para los datos filtrados no tienen un significado físico, entre paréntesis se indica la diferencia entre los valores medios, para dar una idea de la magnitud del cambio. Como se puede observar, la amplitud de los cambios disminuye en el caso de las estaciones La Estrella, donde la diferencia entre los valores medios para los periodos *Antes* y *Después* pasa de ser de 1.64°C de aumento a 0.54°C de aumento, y Villa Mónica, donde pasa de ser de 0.4°C de aumento a 0.36°C de aumento, indicando que sin el impacto del ENSO, el aumento en la temperatura que se identifica en estas estaciones sería de menor magnitud, aunque mantiene la significancia estadística. En las estaciones Cedral y El Placer se tiene una diferencia en el signo del cambio luego del filtrado, lo que sugiere que sin la influencia del ENSO, en estas estaciones se tendría una disminución (también significativa) en la temperatura en vez de un aumento. Finalmente, en la estación Guaimaral se pasa de un aumento sin significancia estadística a una disminución sin significancia estadística luego del filtro, sugiriendo que las temperaturas en la estación se han mantenido estables. En general, se puede ver que sin el efecto del ENSO, la amplitud de los cambios se reduce.

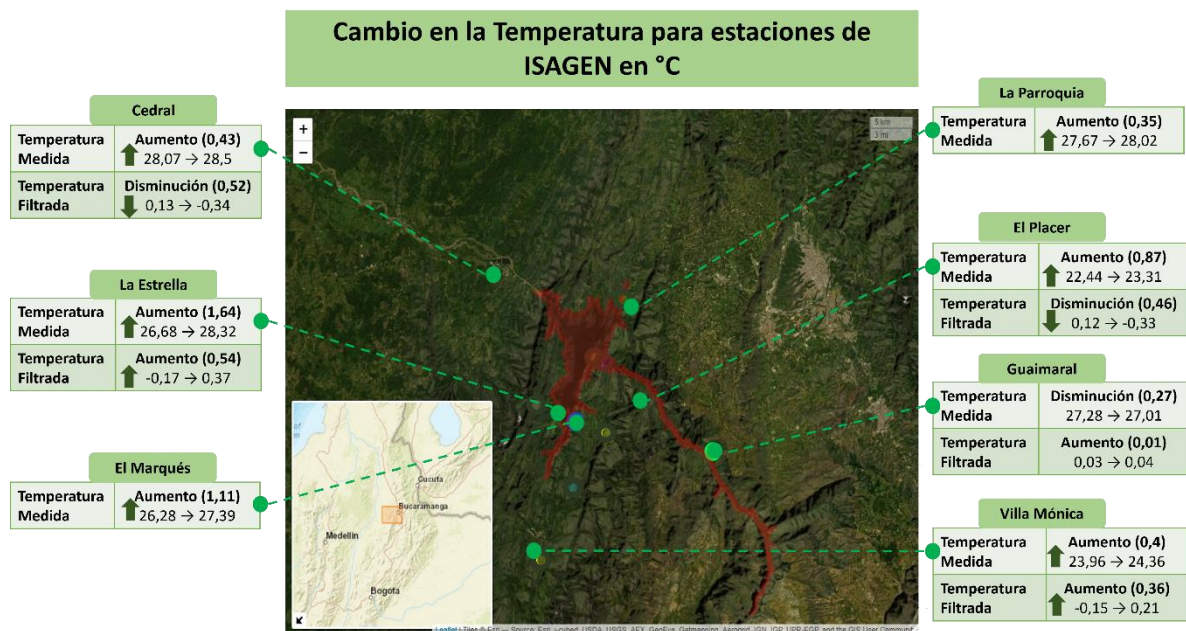


Figura 3.18. Cambio en la temperatura medida y la temperatura filtrada para las estaciones N/I en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

3.3.5. Humedad relativa

Cambios en los datos originales

De la misma manera que para las otras variables, se realizó el cálculo de las anomalías mensuales de humedad relativa para cada estación con respecto a su propio promedio. En la Figura 3.19 se pueden observar las anomalías para las estaciones Guaimaral y Palo Negro (similar a Figura 3.13). Para esta

variable también es posible identificar una relación entre la ocurrencia de los fenómenos ENSO con las variaciones de la misma, aunque para este caso la relación es contraria a la descrita para la temperatura, es decir, valores negativos en las anomalías de la humedad relativa se relacionan con la ocurrencia de eventos El Niño, mientras que valores positivos con la ocurrencia de eventos La Niña. Para meses entre 2012 y 2014, en que las condiciones del ENSO eran neutras, las variaciones en la estación Guaimaral oscilaron entre +5% y -5%, mientras que para meses de El Niño 2015-2016 se mantienen en valores negativos del 5%, aproximadamente. El comportamiento es más claro en las anomalías para la estación Palo Negro, pues se pueden ver los eventos El Niño para finales de 2006 y finales de 2009, que se encuentran precedidos y sucedidos por eventos La Niña, y es claro como en El Niño los valores pasan a estar por debajo de la media, mientras que al estar en La Niña se tienen valores por encima de la media.

El comportamiento descrito se ve claramente en todas las estaciones NOAA, como se puede ver en la Figura 3.20 para el caso de la estación Camilo Daza (para las demás estaciones ver Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3). Nuevamente se resalta la importancia de este comportamiento, pues las disminuciones en los valores de humedad relativa para lo eventos El Niño a finales de 2006 y finales de 2009 tienen valores similares en magnitud a los del evento 2015-2016, con la diferencia de que estos ocurrieron en momentos en que no se tenía el embalse Topocoro y que ocurren tanto en estaciones por fuera del área de influencia del embalse, pero en la misma región (por ejemplo Camilo Daza en Figura 3.20), como en otras partes del país, como El Dorado, en Bogotá (ver Figura 3.21). En general, la disminución en la humedad relativa durante eventos El Niño y el aumento durante eventos La Niña se nota tanto en las estaciones locales N/I como en las regionales NOAA. Este parecido corrobora la robustez de las características identificadas en las estaciones locales (i.e. las N/I) pese a el limitado intervalo temporal que cubren.

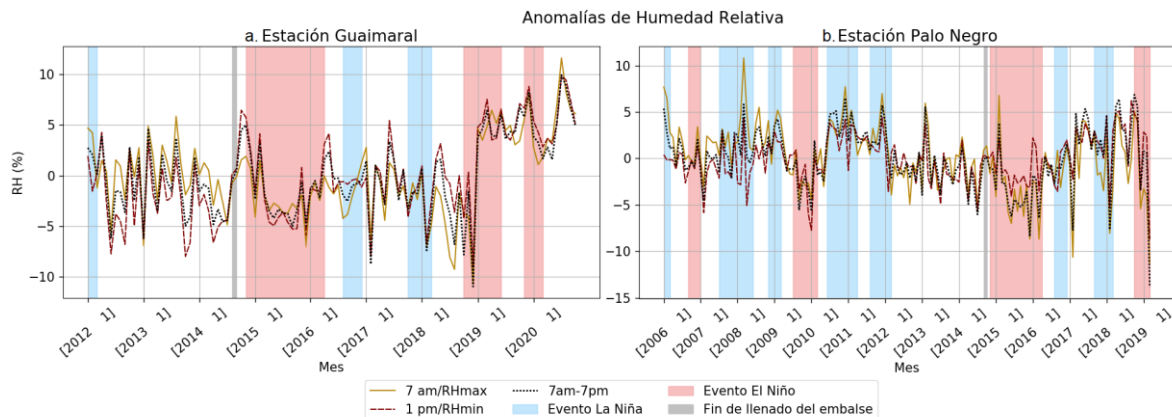


Figura 3.19. Anomalías de humedad relativa para la estación Guaimaral de N/I y la estación Palo Negro de NOAA. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

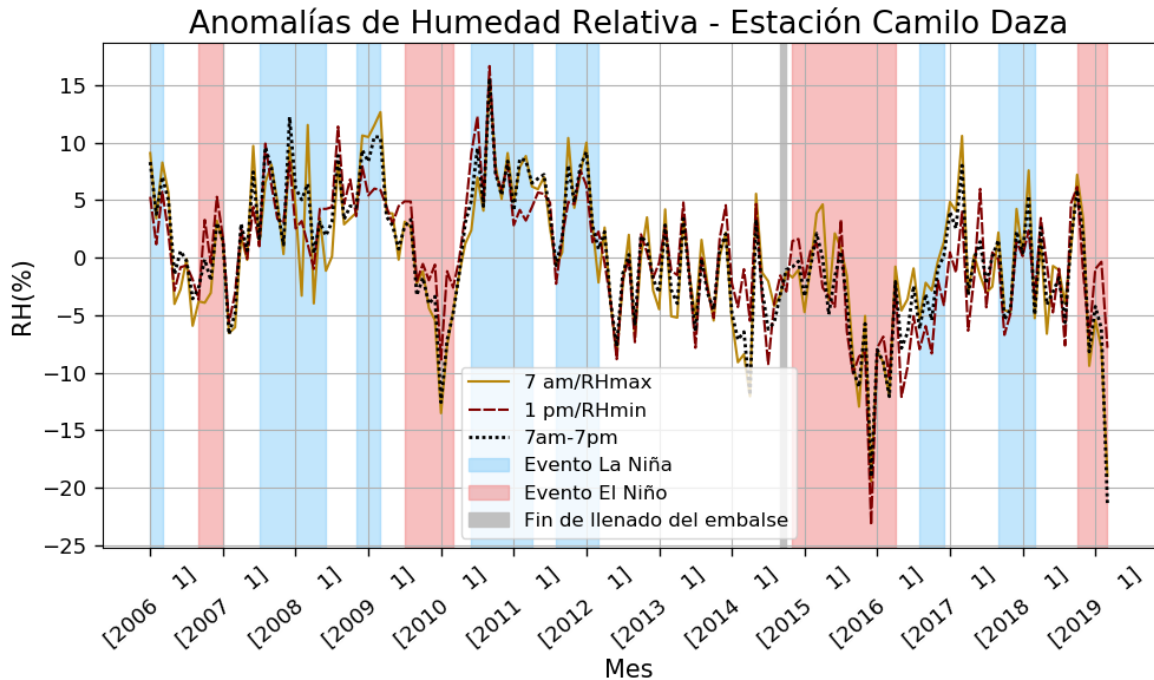


Figura 3.20. Anomalías de humedad relativa para la estación Camilo Daza. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

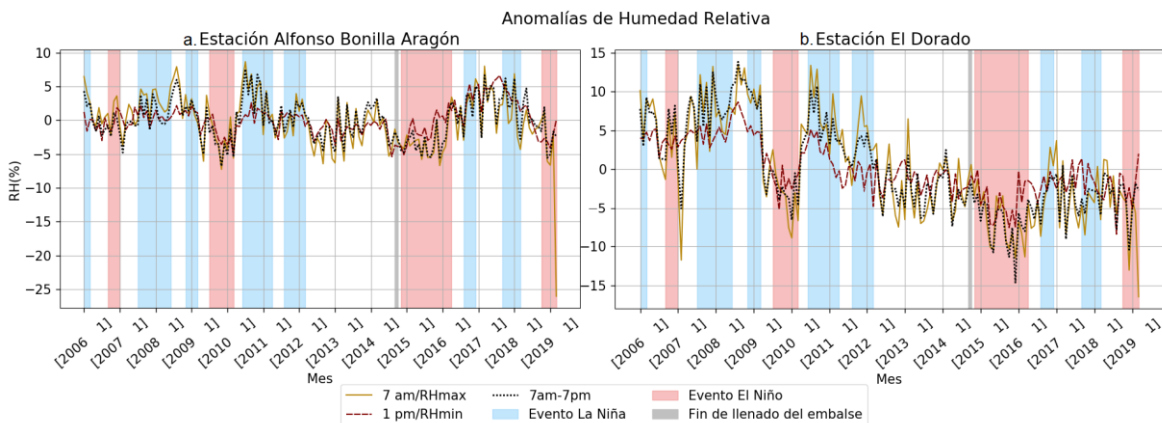


Figura 3.21. Anomalías de humedad relativa calculadas para aeropuertos de principales ciudades. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

Señal del ENSO en la humedad relativa

La Tabla 3.7 presenta las correlaciones entre las anomalías mensuales de humedad relativa y el índice ONI para el ENSO. El sentido de las correlaciones para las estaciones consideradas indica que cuando el índice ONI aumenta, las anomalías disminuyen, y viceversa, lo que concuerda con el comportamiento que se ha descrito en la sección anterior. Además, dado a que las correlaciones son

fuertes, se realizó el procedimiento de filtrado de la señal ENSO mediante el método PCA. Para realizar el filtro de esta variable fue necesario descartar las estaciones N/I El Marqués y La parroquia, debido a la gran cantidad de datos faltantes.

Tabla 3.7. Correlaciones entre las series de tiempo de humedad relativa de los dos grupos de estaciones consideradas (NOAA y N/I) y el índice ONI del ENSO. La intensidad del color representa la magnitud de la correlación. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Serie completa							Serie completa				
	Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado	Cedral	La Estrella	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Índice ENSO	-0,56	-0,17	-0,47	-0,22	-0,54	-0,41	-0,57	-0,31	-0,33	-0,18	-0,39	-0,44

El análisis para las componentes principales muestra nuevamente que la primera componente de cada grupo de estaciones es la que se correlaciona más fuertemente con el índice ONI para el ENSO, como se puede ver en la Tabla 3.8 con las correlaciones para la PC1, con un valor absoluto de 0.55 para NOAA y de 0.41 para N/I. En este caso, la primera componente principal explica aproximadamente el 56% de la varianza presente en las estaciones NOAA, mientras que para las estaciones N/I, la primera componente principal explica aproximadamente el 65%, con lo que se puede decir que la varianza identificada en las anomalías para la humedad relativa en el área de influencia del embalse está explicada por encima del 50% por el fenómeno ENSO. Así, tenemos también que las variaciones en la humedad relativa, como en el caso de la temperatura superficial, son dominadas en más de un 50% por la ocurrencia de eventos ENSO. Además, se hace énfasis en que el porcentaje restante de varianza para la humedad relativa no estaría explicado sólo por efectos locales como el embalse, sino que conserva la señal tanto de efectos locales (asociados por ejemplo a cambios de coberturas) como de otros efectos de gran escala.

Tabla 3.8. Correlaciones entre las componentes principales de las series de humedad relativa y el índice ONI del ENSO para los dos grupos de estaciones (NOAA y N/I). Colores igual que en la Tabla 3.7. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Componentes principales							Componentes principales				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5			PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Índice ENSO	0,55	0,22	-0,22	0,06	0,01	0,19	0,06	-0,41	-0,06	0,24	-0,03	-0,18

Luego de identificar la componente principal que se puede asociar con el ENSO (en este caso la primera PC tanto para estaciones NOAA como N/I), se realizó la sustracción de la señal ENSO para cada una de las estaciones y se calculan nuevamente las correlaciones entre las series filtradas resultantes y el índice ONI (ver Tabla 3.9). Estas correlaciones con la serie filtrada (Tabla 3.9) son luego comparadas con las correlaciones basadas en la serie original (Tabla 3.7): si las correlaciones para la serie filtrada son menores que para la serie original, esto sugiere una remoción efectiva de la señal ENSO, con lo cual podemos estudiar de la serie filtrada las variaciones asociadas a otros procesos.

Los resultados muestran que la remoción de la señal es bastante efectiva para las estaciones N/I. En la Tabla 3.9 se puede observar que la correlación es eliminada para todas las estaciones N/I (con excepción de Villa Mónica, donde a pesar de existir correlación no es substancial), obteniendo correlaciones del orden de 10^{-2} . En la Tabla 3.9 también se puede observar que la magnitud de la correlación para la estación San Antonio del Táchira, tanto para la serie original como para la serie filtrada, es aproximadamente de la misma magnitud (la cual de todos modos no es estadísticamente significativa), pero cambia de signo. Para las demás estaciones NOAA, las correlaciones con las series

filtradas son mucho menores que para las series originales, especialmente en el caso de la estación José María Córdova, para la cual la correlación virtualmente se elimina por completo.

Tabla 3.9. Correlaciones entre las series sin la señal del ENSO y el índice ONI. Colores como en Tabla 3.7. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

	ESTACIONES NOAA							ESTACIONES N/I				
	Serie filtrada							Serie filtrada				
	Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado	Cedral	La Estrella	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Índice ENSO	-0,1	0,07	-0,11	0,27	-0,23	0,01	-0,22	0,09	-0,02	0,09	-0,02	-0,22

En la Figura 3.22 y Figura 3.23 se puede ver la comparación entre las series de anomalías originales (i.e. medidas) y las series generadas con el proceso de filtrado, para una estación en el área de influencia del embalse (Guaimaral, Figura 3.22) y una estación en la escala regional (Palo Negro, Figura 3.23). La finalidad de estas figuras es observar las similitudes y diferencias en el comportamiento entre las estaciones dentro y fuera del área de influencia del embalse, lo cual provee información a diferentes escalas. El comportamiento de las series durante los eventos El Niño y La Niña es de particular interés.

En la Figura 3.22 se puede ver que la serie original y la filtrada para la estación Guaimaral mantienen una amplitud similar en las variaciones para el periodo entre 2012 y 2014, cuando ocurrieron condiciones neutras, antes del llenado del embalse. Posterior a esto, para el evento El Niño 2015-2016 (resaltado en el recuadro rojo) se puede ver que la amplitud de las anomalías aumenta para la serie filtrada e incluso cambia de signo, con aumentos en la humedad relativa cercanos al 2%, mientras que la serie original, que incluye la señal ENSO, muestra disminuciones hasta del 4%. De manera similar, se puede ver cómo para un periodo comprendido entre dos eventos La Niña (recuadros azules entre 2016 y 2018), las variaciones en la serie filtrada tienen una amplitud menor comparada con la original, y alcanzan anomalías más negativas durante una mayor parte del tiempo que las de la serie original. Esto sugiere que al remover el efecto ENSO, la humedad relativa entre 2017 y 2018 estuvo principalmente por debajo de su promedio, mientras que en la serie original, el efecto de ENSO genera valores de hasta +5% por encima del promedio. Las anomalías de las series original y filtrada durante diferentes fases de ENSO pueden tener comportamientos incluso opuestos, con años El Niño durante los cuales se observa mayor humedad relativa para la serie filtrada con respecto al promedio, y años La Niña con menor humedad relativa que el promedio. Se hace la aclaración de que este comportamiento es sugerido por el filtro estadístico, podría suceder teniendo en cuenta que los mecanismos que las fases ENSO imponen en la circulación no ocurren, pero no se asegura que, sin el efecto de ENSO, el comportamiento se de como lo sugiere el filtro. Teniendo esto en cuenta, los comportamientos de la serie filtrada estarían sobre todo asociados a procesos diferentes a ENSO, incluyendo factores locales como el embalse, dinámicas locales de usos del suelo (como pequeños cambios de cobertura y manejo de los cultivos), y dinámicas locales de circulación.

En la Figura 3.23 se compara la serie original (medida) y la filtrada para la estación Palo Negro (de las estaciones NOAA). Nótese que para esta estación, el periodo de análisis es mayor que para las estaciones N/I (incluyendo Guaimaral, Figura 3.22). En general la comparación entre la serie original y la filtrada para Palo Negro muestra las mismas características que las descritas para Guaimaral (estación en el área de influencia del embalse, Figura 3.22), incluyendo su comportamiento casi opuesto durante los eventos El Niño y La Niña (ver recuadros rojos y azules, respectivamente). Este comportamiento se observa incluso antes de 2012 (momento de inicio de los registros N/I en el área de influencia del embalse).

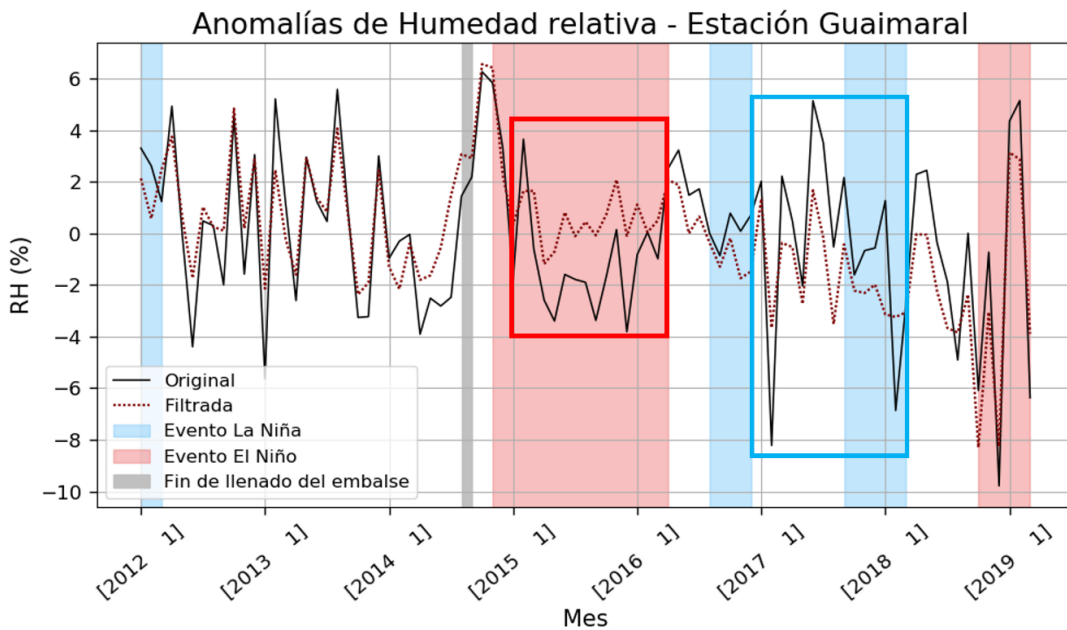


Figura 3.22. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para una estación N/I. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

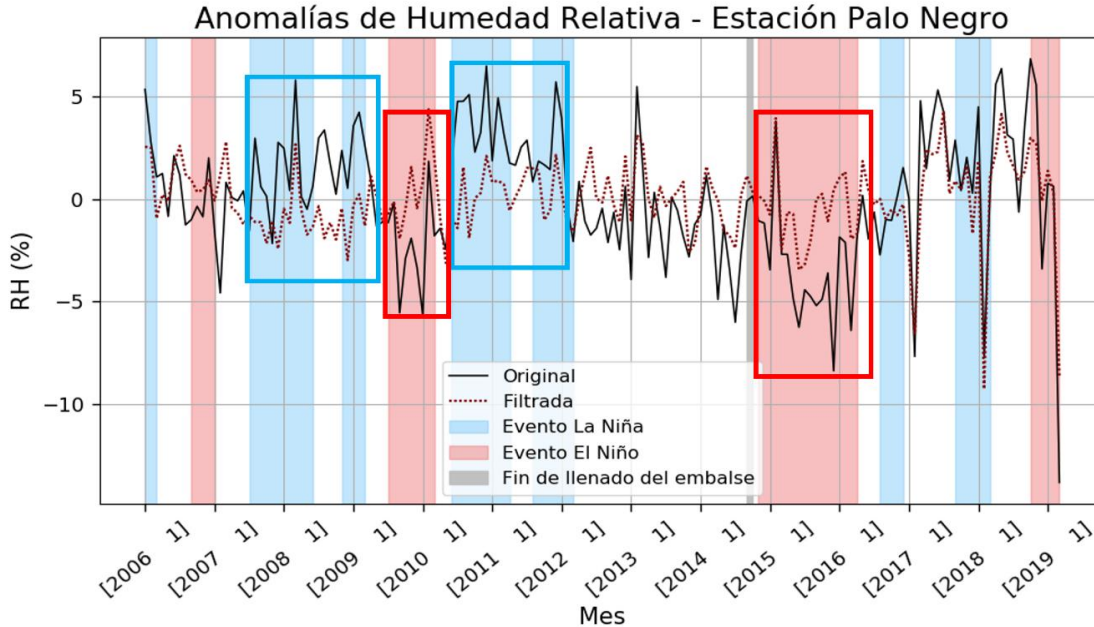


Figura 3.23. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para una estación NOAA. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

Después de identificar las diferencias más robustas entre las series originales y aquellas en las que se removió ENSO a lo largo de los periodos de registro, calculamos los cambios en los valores medios en la humedad relativa según ambos tipos de series entre el Antes y el Después del llenado del embalse (Figura 3.24). En varias de las series originales (Humedad Medida) se registraron aumentos estadísticamente significativos en los valores medios en varias estaciones (Cedral, La Parroquia, El Placer, Guaimaral), entre 2 y aproximadamente 8%. En las otras tres estaciones se vieron disminuciones en las series originales, con cambios estadísticamente significativos en dos de ellas (La Estrella y Villa Mónica). Por otra parte, las series filtradas (Humedad Filtrada) muestran aumentos en tres estaciones, los cuales son significativos sólo en una estación, y en todos los casos estos cambios tienen una magnitud menor que la observada en las series originales (ver Cedral, Guaimaral y Villa Mónica), o se tiene un cambio en sentido opuesto (como en La Estrella y El Placer).

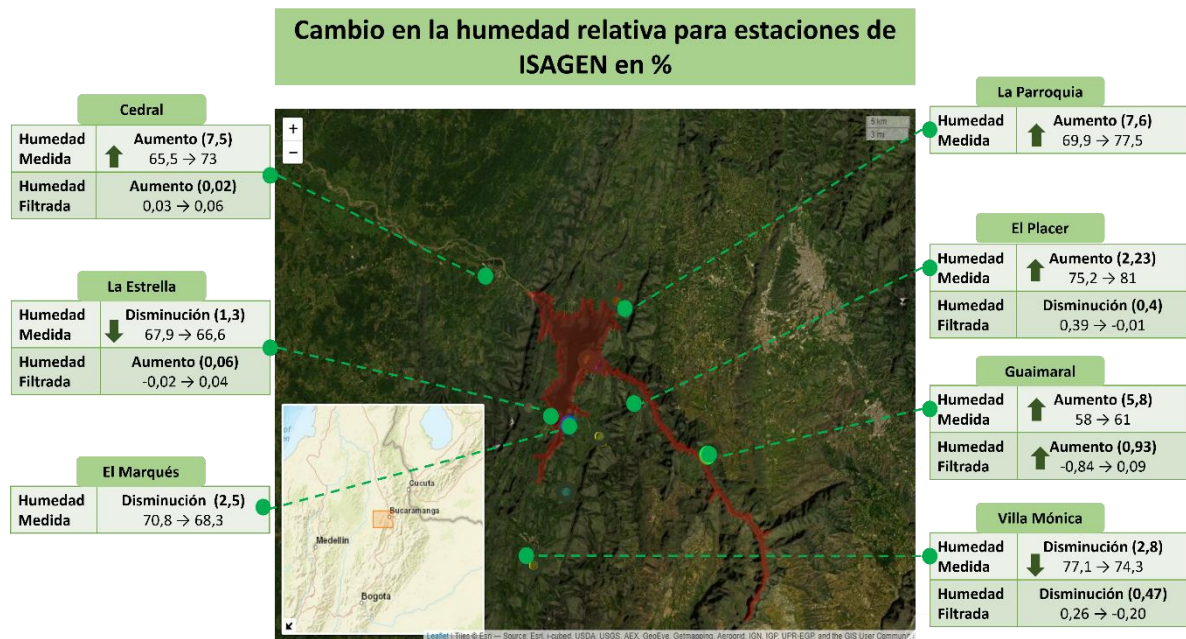


Figura 3.24. Cambio en la humedad relativa medida y la humedad relativa filtrada para las estaciones N/I en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo. Los cálculos se realizaron usando los datos entre 7 am y 7 pm hora local, por lo que representan estrictamente lo que ocurre durante el día

3.3.6. Rango diario de temperatura

El rango diario de temperatura (DTR por sus siglas en inglés) es la variable que representa la diferencia entre la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura mínima (T_{min}) de un día, de la siguiente forma:

$$DTR = T_{max} - T_{min} \quad (3.3)$$

Este cálculo se realiza para la temperatura medida en cada día. Por su naturaleza, T_{max} es una variable que se encuentra más influenciada por la radiación de onda corta incidente, mientras que T_{min} es una variable que se encuentra influenciada por los flujos de onda larga (Lewis & Karoly, 2013). Así, diferentes procesos y fenómenos que afecten estos flujos de radiación, por ejemplo, un cambio de

cobertura como el llenado del embalse, podrán influenciar el DTR. Es por esta razón que el DTR, además de dar la idea de qué tanto cambia la temperatura a lo largo de un día, puede entregar información sobre otros procesos cuando se analizan sus cambios en el tiempo a la par con los de la temperatura máxima y mínima.

En la Figura 3.25 se presenta el DTR calculado a partir de los datos diarios y posteriormente promediado para cada mes, para dos estaciones N/I. Se aclara que los datos presentados son datos originales sin ningún proceso de filtro debido a su cálculo desde la escala diaria. Como se puede ver, al hacer los cálculos con los datos diarios y posteriormente realizar el promedio mensual, se conserva la información para el ciclo anual que se identifica en los picos para la variable a mitad y final de cada año. En la Figura 3.25 se puede identificar que para la estación El Placer, el DTR sugiere una tendencia al aumento para el periodo después del llenado del embalse, es decir, posterior al año 2014 (este comportamiento también se aprecia en la estación Villa Mónica y Cedral). Por otra parte, para la estación La Parroquia se sugiere una disminución del DTR posterior al llenado del embalse (similar en Guaimaral). Naturalmente, para indagar de mejor manera en este comportamiento observado se analizaron las variaciones en las temperaturas máxima y mínima.

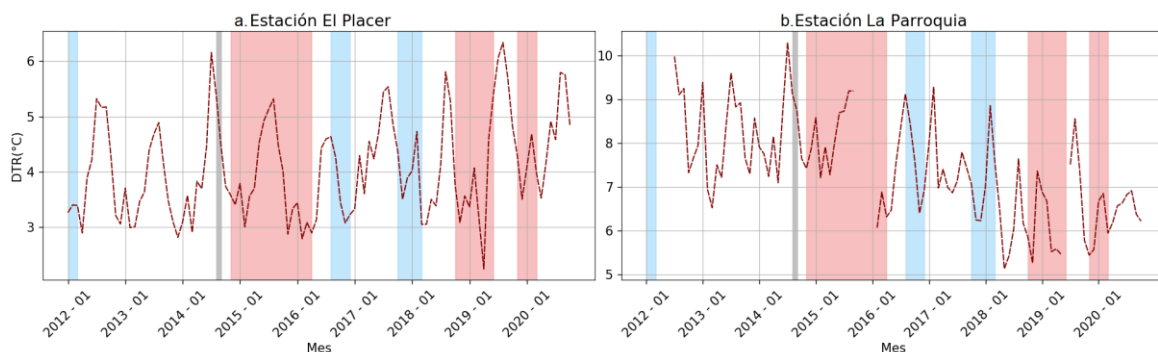


Figura 3.25. Rango Diurno de temperatura (DTR) para dos estaciones N/I. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

Como se mostró en la sección 3.3.4 para la temperatura, la temperatura promedio a lo largo del día, tanto en el área de influencia del embalse como el país, se encuentra influenciada en gran parte por el fenómeno ENSO. Para identificar si el comportamiento del ENSO tiene gran influencia en las variaciones para la temperatura máxima y mínima, y por ende en el comportamiento identificado del DTR se calcularon las correlaciones entre el índice ONI y las anomalías mensuales de las temperaturas mínima y máxima, para las estaciones N/I y las estaciones NOAA, las cuales se pueden ver en la Tabla 3.10 y Tabla 3.11, respectivamente. En general, las correlaciones para estas variables y el índice representativo del ENSO son bastante fuertes en las estaciones NOAA, con correlaciones que se encuentran por encima de 0.5 en la mayoría de las estaciones, tanto para la temperatura mínima como para la temperatura máxima. Por otra parte, las correlaciones para las estaciones N/I son más débiles y en general todas se encuentran por debajo de 0.4, tanto en la temperatura máxima como en la mínima. Para las estaciones N/I, en el caso de la temperatura mínima se tienen correlaciones más fuertes que para la temperatura máxima, siendo las más altas para las estaciones Villa Mónica y Parroquia, con 0.39 y 0.38, respectivamente, mientras que en la temperatura máxima la correlación más alta es de 0.31 para Villa Mónica. Una de las razones para que las correlaciones de N/I con el índice ONI sean más bajas que las de las estaciones NOAA podría ser la extensión temporal de las

mismas, como se había mencionado en la sección 3.3.4, pero incluso en ese caso, las correlaciones para las estaciones N/I presentaban valores por encima de 0.4 en algunas de las estaciones, con lo que se podría concluir que el ENSO no explica tanto la varianza para las temperaturas máxima y mínima, como lo hace para la temperatura promedio a lo largo del día, teniendo un poco más de influencia en la temperatura mínima que en la máxima por la magnitud de las correlaciones. Así, es posible considerar que las temperaturas con las que se calcula el DTR pueden tener influencia por procesos en una escala más local. Sin embargo, es necesario seguir investigando sobre los procesos particulares que dan lugar a este comportamiento.

Tabla 3.10. Correlaciones entre las series de tiempo de temperatura mínima de los dos grupos de estaciones consideradas (NOAA y N/I) y el índice ONI del ENSO. La intensidad del color representa la magnitud de la correlación

		Estaciones NOAA						
		Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado
Tmin-ENSO		0,67	0,49	0,74	0,62	0,65	0,45	0,24
		Estaciones N/I						
		Cedral	La Estrella	El Marqués	La Parroquia	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Tmin-ENSO		0,31	0,24	0,32	0,38	0,36	0,35	0,39

Tabla 3.11. Correlaciones entre las series de tiempo de temperatura máxima de los dos grupos de estaciones consideradas (NOAA y N/I) y el índice ONI del ENSO. Colores como en la tabla 3.10

		Estaciones NOAA						
		Camilo Daza	Yariguies	Palo Negro	San Antonio del Tachira	Alfonso Bonilla Aragón	José María Córdova	El Dorado
Tmax-ENSO		0,58	0,39	0,65	0,54	0,73	0,7	0,63
		Estaciones N/I						
		Cedral	La Estrella	El Marqués	La Parroquia	Guaimaral	El Placer	Villa Mónica
Tmax-ENSO		0,11	0,27	0,26	0,25	0,1	0,24	0,31

Continuando con la interpretación del comportamiento sugerido para el DTR que se puede ver en la Figura 3.25 y teniendo en cuenta que las variaciones en Tmax y Tmin podrían estar menos influenciadas por un fenómeno de gran escala como el ENSO, se realizaron las pruebas de diferencias de medias para el DTR, la temperatura máxima y la mínima entre los periodos de *Antes* y *Después* del llenado del embalse. Los resultados se pueden observar en la Figura 3.26. Como se puede ver, el DTR presenta disminuciones significativas en las estaciones La Parroquia y Guaimaral, así como aumentos significativos en El Placer y Villa Mónica, tal como lo sugería la Figura 3.25, mientras que el cambio en el DTR para las otras estaciones no es significativo, es decir, permanece aproximadamente igual, por lo menos desde el punto de vista estadístico. Para las estaciones El Placer y Villa Mónica, la Figura 3.26 permite identificar que el comportamiento del DTR se debe a que Tmin y Tmax aumentan significativamente (con excepción de Tmin en Villa Mónica), pero el aumento en Tmax es más grande que el aumento en Tmin, por lo que el comportamiento final del DTR es un aumento. Algo similar es lo que ocurre en las estaciones Cedral, La Estrella y El Marqués, donde ambas temperaturas aumentan significativamente (con excepción de Tmax en Cedral), pero el cambio mantiene una proporción en la que el DTR no se ve modificado estadísticamente. Por otra parte, con el análisis presentado en la Figura 3.26 también se puede ver que para las estaciones La Parroquia y Guaimaral, la disminución en el DTR se debe a un aumento en Tmin en La Parroquia (en Guaimaral aumenta, pero no es estadísticamente significativo) y a una disminución de Tmax en el caso de Guaimaral (en La Parroquia también disminuye, pero sin significancia estadística). Este caso es de particular interés, pues debido a la inercia térmica del agua, se esperaría que la temperatura sobre el cuerpo de agua esté más baja que en los alrededores durante el día y en los momentos en que se presenta la temperatura máxima, pero más cálida durante la madrugada y la mañana que es cuando se presenta la temperatura mínima, este dato relacionado con el flujo de los vientos en el área de influencia permitiría mencionar la hipótesis de que los vientos puedan transportar algo de ese aire con

una temperatura diferente a las localizaciones de las estaciones mencionadas (sobre esto en particular se hablará nuevamente en el capítulo 6). Este transporte de temperaturas más cálidas en la madrugada y mañana podría estar relacionado, además, con el hecho de que la temperatura mínima presenta aumentos estadísticamente significativos en todas las estaciones, con excepción de Guaimaral y Villa Mónica.

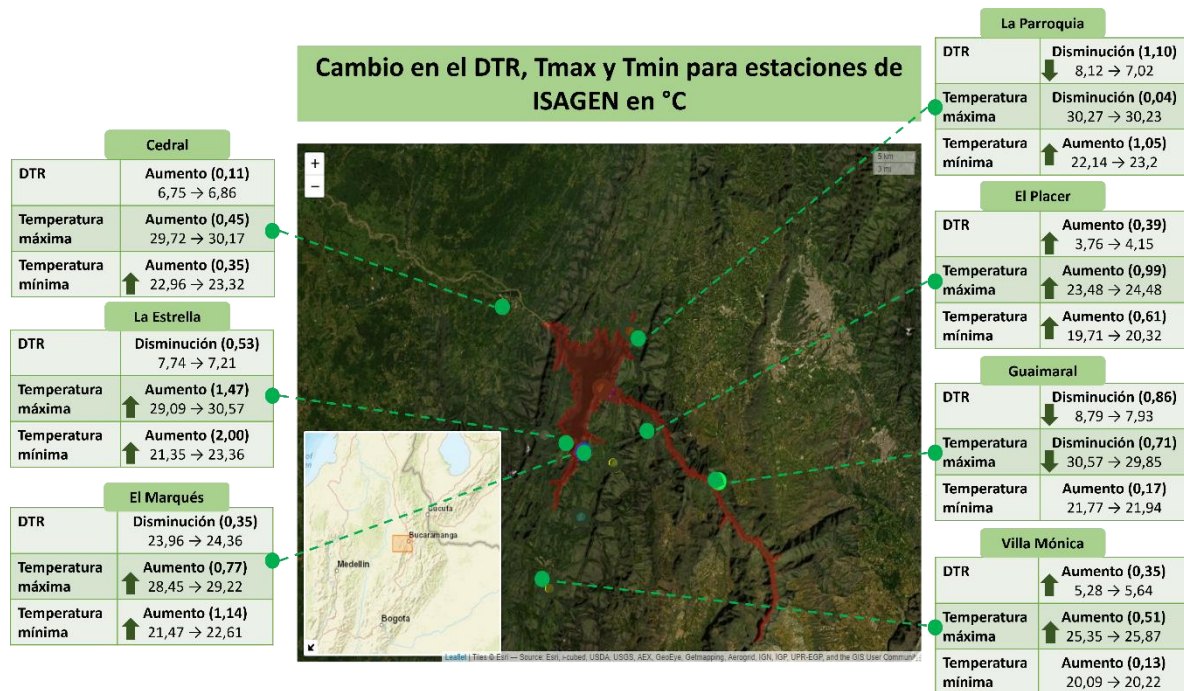


Figura 3.26. Cambio en el Rango Diurno de temperatura, la temperatura máxima y la temperatura filtrada para las estaciones NI en el área de influencia del embalse entre el periodo antes y después del llenado del embalse. Las flechas representan un cambio estadísticamente significativo

3.4. Discusión y conclusiones

Con el análisis realizado para las variables meteorológicas en el área de influencia del embalse Topocoro, específicamente para las variables radiación incidente, precipitación y dirección de los vientos, no se identificaron patrones de cambio homogéneos en toda el área de influencia que se puedan relacionar con el llenado del embalse. Tanto para la radiación incidente como para la precipitación no se identifican cambios significativos en la mayoría de las estaciones y, particularmente, la única estación que presenta un cambio significativo en estas dos variables es Cedral, que se encuentra al otro lado de la represa, más alejada del cuerpo de agua. Sus cambios representan un aumento del 6.8% en radiación incidente (La Estrella y Guaimaral tienen una disminución significativa de magnitud similar) y un aumento del 55% en precipitación (similar para La Parroquia) para el periodo *Después* del llenado del embalse con respecto al periodo *Antes*. Estos cambios tan puntuales no parecen obedecer a un efecto generalizado del embalse sobre estas variables en el área de influencia, dado que para el resto de las estaciones los cambios no son estadísticamente significativos.

Así, si se consideran esos cambios en el contexto del balance de energía, se tiene que la radiación incidente aumenta en Cedral, y es constante en El Marqués, La Parroquia y Villa Mónica. Si se asume que el balance de radiación de onda larga es constante, y se asume una disminución en el albedo (lo

que no es tan alejado de la realidad, como se detalla en el capítulo 4), se tendría un aumento de la radiación neta para esas estaciones. Por otra parte, la precipitación ha aumentado en Cedral y La Parroquia, con lo que en estas dos estaciones habría más humedad disponible que podría aumentar los flujos de calor latente.

Por otra parte, se identificaron variaciones heterogéneas estadísticamente significativas en la velocidad de los vientos sobre el área de influencia del embalse. Para las estaciones El Marqués, La Parroquia y Guaimaral, se tienen aumentos significativos de la velocidad del viento de 7.14%, 42.8% y 26.15%, respectivamente. Esto indica que el cambio relativo más grande en los vientos entre *Antes* y *Después* del llenado del embalse ocurre en la estación La Parroquia. Por esto, se plantea la hipótesis de que el cuerpo de agua, al ser una cobertura que genera menos fricción y que está más elevada con respecto a las coberturas originales en el territorio, puede ser el causante de las aceleraciones identificadas para algunas de las estaciones.

La dirección de los vientos en la estación Parroquia concuerda con esta hipótesis planteada, dado que es una estación en la que los vientos fluyen desde la zona del embalse hacia la zona de la estación en varios momentos del día. Para el caso de El Marqués y Guaimaral, si bien las direcciones observadas no registran momentos en que el viento fluya directamente desde el cuerpo de agua hacia la zona de las estaciones, sí se tiene viento en dirección desde la zona de la estación hacia el cuerpo de agua, con lo que los cambios de velocidad sobre el cuerpo de agua (corriente abajo) podrían afectar la velocidad en estas estaciones (i.e. modificando el flujo corriente arriba). Según Shuttleworth (2012), un cambio en el viento superficial puede ser uno de los factores que influye en flujos de superficie como la evaporación, con lo que en las estaciones El Marqués, La Parroquia y Guaimaral se podrían tener aumentos de evaporación y/o transpiración, aumentando los flujos de calor latente. En las estaciones Cedral, La Estrella, y Villa Mónica se tienen disminuciones en la velocidad del viento de 10%, 22.5% y 43%, respectivamente. De estas disminuciones, la más alta ocurre en Villa Mónica, la estación más alejada del cuerpo de agua, por lo que este cambio podría estar asociado con modificaciones en la vegetación cerca de la zona de la estación. Esta consideración sobre los cambios en la vegetación cerca a la zona de cada estación no es excluyente con la hipótesis planteada sobre la disminución en rugosidad para el cuerpo de agua, y ambas podrían estar ocurriendo al mismo tiempo.

A partir del análisis realizado para los datos de las diferentes estaciones meteorológicas en el área de influencia del embalse y en otras regiones (es decir en la escala local, departamental y regional) se logró identificar que las mayores variaciones en las variables temperatura y humedad relativa se encuentran explicadas en gran parte por la ocurrencia del fenómeno ENSO. Para esto, fue crucial el análisis de las anomalías, para identificar que el ENSO se correlaciona significativamente con las variables temperatura y humedad relativa para los dos grupos de estaciones analizadas y que el sentido de las variaciones asociadas con este fenómeno es el mismo tanto en el área de influencia del embalse como en otros lugares por fuera de dicha área y que no están cerca de cuerpos de agua. Específicamente para las estaciones en el área de influencia, se tiene para los valores medidos (es decir, los que contienen la influencia del ENSO) que el cambio más elevado en temperatura se da para La Estrella, con un aumento de 1.64°C entre los valores medios para los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse, pero luego de aplicar el filtro, el aumento es de 0.54°C, mientras que el cambio más elevado en humedad relativa se da en La Parroquia con un aumento promedio de 7.6%. Se recuerda que esta estación no contaba con la cantidad de datos suficiente para filtrar la señal del ENSO. Por esto, se destaca el comportamiento de Cedral, que sigue a La Parroquia con un aumento promedio de 7.5%, que luego del filtro resulta en un aumento promedio de 0.02%. Además, los datos filtrados sugieren que sin el efecto del ENSO, los cambios en algunas de las estaciones podrían ser incluso en un sentido diferente al observado, como en Cedral, El Placer y Guaimaral. En el caso de la temperatura, Cedral y El Placer (Guaimaral) presentan un aumento (disminución), pero

la temperatura filtrada registra una disminución (aumento) de los valores medios entre los periodos *Antes* y *Después* de llenar el embalse.

Además, el análisis de componentes principales (PCA) permitió identificar una influencia importante del ENSO sobre el comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa, para todas las estaciones analizadas. Lo anterior se soporta en que nuestros resultados muestran que el modo de variabilidad asociado al ENSO explica más del 50% de la varianza de las series originales para los diferentes periodos de registro con que cuentan las estaciones. Se debe tener en cuenta que el proceso de filtrado con PCA no garantiza la remoción completa de la señal del ENSO, y que la varianza restante no se debe completamente a los procesos locales. Sin embargo, el porcentaje de varianza asociado con el ENSO es una señal de que este modo domina el comportamiento de las variables y que los efectos de otros fenómenos de gran escala y locales tendrían un efecto más pequeño en el comportamiento de las variables.

Por otra parte, se evaluó el comportamiento de la temperatura mínima (T_{min}), la temperatura máxima (T_{max}) y el rango diurno de temperatura (DTR). En general, el comportamiento del DTR se encuentra mezclado, pero llama la atención lo encontrado para las estaciones La Parroquia y Guaimaral, con disminuciones del 13.5% y 10.8%, respectivamente. Esta disminución resulta interesante debido al comportamiento de T_{max} y T_{min} que lleva a dicha disminución. Los cambios identificados en T_{min} corresponden a aumentos del 4.7% en Parroquia y 0.8% en Guaimaral, lo que se explica debido a que el aumento en La Parroquia es significativo, pero en Guaimaral no, mientras que el cambio en T_{max} corresponde a una disminución de 0.13% en La Parroquia y 2.4% en Guaimaral. Este comportamiento se podría relacionar con el cambio esperado sobre el cuerpo de agua debido a su inercia térmica, que generaría una superficie más cálida que sus alrededores en horas de la noche y madrugada, pero más fría que sus alrededores durante el día. Este hecho, además del comportamiento identificado en los vientos, permitiría plantear la hipótesis de una advección de esas temperaturas más frescas y/o cálidas desde la zona del embalse hacia la zona de las estaciones (esto se analizará con más detalle en el capítulo 6).

Finalmente, se debe mencionar que un adecuado seguimiento del comportamiento de estas variables requiere información de cada uno de los términos de los balances de energía y humedad, por lo que hasta este punto no es posible establecer más que suposiciones sobre sus posibles cambios. Así, para complementar la información de observaciones, se estimó del albedo en la región a partir del producto de MODIS, según se presenta en el capítulo 4, y además se realizaron experimentos de simulación con el modelo WRF, con el objeto de hacer un seguimiento más detallado de cada una de las variables para escenarios con y sin embalse, según se presenta en los capítulos 5 y 6.

Capítulo 4: Albedo desde sensores remotos

4.1. Introducción

El albedo α es una de las variables involucradas en el cálculo de la radiación neta R_n (como se puede ver en la ecuación 3). Este depende de características de la superficie como el color y la textura, así como del ángulo en que se encuentre el sol en el cielo. Por esto último, el albedo puede variar a lo largo del día, alcanzando sus valores máximos en las horas del mediodía (e.g. Shuttleworth, 2012). El albedo representa la cantidad de radiación de onda corta incidente que puede ser reflejada, y es expresado en valores entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 0 indican que se refleja una fracción más pequeña de la radiación incidente, y los valores cercanos a 1 indican que se pueden reflejar fracciones más grandes de la radiación incidente, siendo el máximo 1, indicando que se refleja todo lo que incide (el albedo también puede ser expresado en porcentajes entre 0% y 100%).

El albedo es una de las características de la superficie que se puede ver modificada por los cambios de cobertura de origen antrópico, como el llenado del embalse de interés para este Trabajo de Investigación. Así, las modificaciones en el albedo podrían modificar la energía disponible para los flujos en el balance de energía (ecuación 1) y terminar afectando los valores de, por ejemplo, la temperatura superficial. Es por eso que, en este capítulo se usaron diferentes fuentes de datos para identificar los contrastes del albedo entre las diferentes coberturas en la zona de estudio, así como la identificación de las variaciones temporales de albedo en las zonas de las estaciones meteorológicas para establecer una posible conexión entre las variaciones identificadas, principalmente en la temperatura, en el capítulo 3 y las variaciones para el albedo en la zona de estudio.

4.2. Datos y metodología

4.2.1. Albedo de ERA5

El reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2018), producto del Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF, por sus siglas en inglés), es el más reciente reanálisis generado por dicho centro y es producido mediante el uso del modelo “*Integrated Forecasting System*” (IFS), el cual corre simulaciones para todo el globo. Por esto, representa el estado del arte y es un producto de referencia para una gran cantidad de variables para las cuales es difícil obtener observaciones e información continua en el espacio, teniendo datos para variables en la vertical a una resolución aproximada de 30 km horizontales, y para variables en la superficie a 9 km. Por su naturaleza, el modelo empleado para producir ERA5 no representa con detalle los diferentes tipos de cobertura ni la complejidad de las interacciones entre tales coberturas y las diversas componentes del sistema climático. Debido a esto, surge la necesidad de simplificar algunas de dichas componentes, entre las que se encuentran la cobertura de cuerpos continentales de agua (lagos, embalses, ríos, etc.) y el albedo relacionado con estas. Específicamente, para la cobertura de cuerpos continentales de agua, el ECMWF emplea un algoritmo que identifica cuerpos de agua desconectados del océano (IFS Documentation, 2018), actualizando únicamente la información de ubicación de lagos para algunos

lugares de interés específicos seleccionados (Choulga et al., 2019). Por esta condición, el modelo empleado en el reanálisis ERA5 no incluye el cambio de cobertura asociado al llenado del embalse Topocoro, ni de ningún otro embalse que no sea de interés particular para ECMWF. Para el albedo de superficies descubiertas de nieve, este modelo considera un albedo promedio calculado a partir de 5 años de datos provenientes de MODIS, los cuales sólo son modificados por el modelo sobre superficies de nieve, hielo, y agua (IFS Documentation, 2018). Así, el albedo de ERA5 no representa una herramienta útil para evaluar las variaciones temporales del albedo en el área de estudio ni identificar los efectos de este cambio en las variables climáticas de la región. Sin embargo, permite hacer una diferenciación inicial entre el albedo para los cuerpos de agua que sí están representados por el modelo en el país y otro tipo de coberturas terrestres en el territorio nacional, y en el área de influencia del embalse. Específicamente, en el territorio colombiano se identifica una zona de albedo bajo relacionada con la región de La Mojana en la depresión Momposina, por lo que esta es seleccionada para el análisis y la comparación del albedo de diferentes coberturas terrestres.

4.2.2. Albedo de MODIS

Para ampliar la cobertura espacial y temporal del análisis, utilizamos el albedo medido desde sensores remotos para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de mayo de 2021. Para este estudio los datos fueron descargados del sensor “*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*” (MODIS) (Schaaf & Wang, 2015), ubicado a bordo de los satélites Terra y Aqua, y operados por la NASA. Específicamente, para la variable albedo, se debieron descargar tres productos diferentes que al procesarse permiten calcular el albedo superficial, según la ecuación 4.1, planteada en estudios como Wang et al. (2017):

$$\alpha_{blue-sky} = \rho_{AOD} * \alpha_{white-sky} + (1 - \rho_{AOD}) * \alpha_{black-sky} \quad (4.1)$$

Esta relación expresa el albedo real ($\alpha_{blue-sky}$) en función de dos componentes teóricas en las que la radiación se puede descomponer (Figura 4.1), llamadas albedo de cielo negro y cielo blanco ($\alpha_{black-sky}$ y $\alpha_{white-sky}$, respectivamente). El albedo de cielo negro ($\alpha_{black-sky}$; panel c en la Figura 4.1) supone que toda la radiación es reflejada especularmente, es decir, en el mismo ángulo con que incide la radiación solar. Por su parte, el albedo de cielo blanco ($\alpha_{white-sky}$; panel b en la Figura 4.1) supone que no hay componente especular y que la radiación se refleja de manera isotrópica, es decir, con igual intensidad en todas las direcciones. De esta manera, el albedo real ($\alpha_{blue-sky}$; panel a en la Figura 4.1) presenta un valor ubicado entre los albedos anteriores y depende también de la cantidad de energía que logra llegar a la superficie sin interactuar con los gases y aerosoles de la atmósfera. Estos gases y aerosoles son incluidos en la variable ρ_{AOD} , que representa una aproximación de los obstáculos que impondría la atmósfera para la radiación antes de llegar a la superficie. Específicamente, esta interferencia se representa mediante la variable Espesor Óptico de Aerosol (AOD, por sus iniciales en inglés), medida en la banda espectral de 550nm.

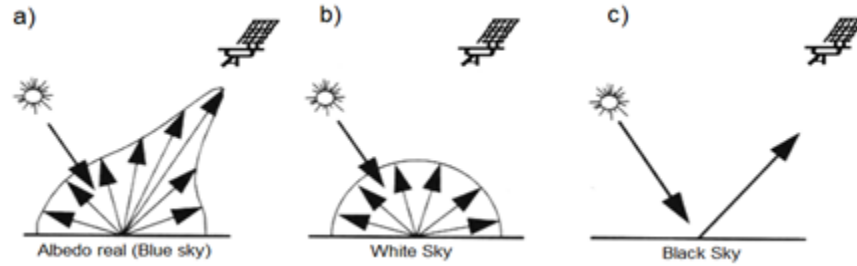


Figura 4.1. Conceptualización de la descomposición del albedo real (A) en sus componentes difusa (B) y especular (C). Modificado de: <http://resources.mpi-inf.mpg.de/departments/d4/teaching/ws200708/cg/slides/CG07-Brdf+Texture.pdf>

Tabla 4.1. Características de los datos satelitales usados para el cálculo del albedo real

Variable	Descripción	Característica
Albedo de cielo blanco y negro	Colección	Terra aqua combinados MODIS colección 6
	DOI	10.5067/MODIS/MCD43A3.0 06
	Extensión temporal	2000-02-24 al presente
	Extensión espacial	Global
	Resolución temporal	Diaria
	Resolución espacial	500 x 500 m
Espesor óptico de aerosoles en la banda de 550nm	Colección	Terra MODIS colección 6.1
	DOI	10.5067/MODIS/MOD08_D3. 061
	Extensión temporal	2000-02-24 al presente
	Extensión espacial	Global
	Resolución temporal	Diaria

	Resolución espacial	1 x 1 grados
--	---------------------	--------------

Las variables requeridas para la estimación del albedo real se encuentran en productos distintos de MODIS (como se puede ver en la Tabla 4.1). Los albedos de cielo blanco y negro se derivan de la combinación de datos de los satélites Terra y Aqua y se encuentran específicamente en el producto MCD43A3 de variables en superficie. Cuentan con una resolución espacial de 500m x 500m y una resolución temporal diaria. Dicho paquete de variables en superficie se encuentra disponible para la descarga a través del complemento MODISTsp para R descrito en Busetto & Ranghetti (2016), por lo que la descarga se hace empleando dicha herramienta.

La variable relacionada con la interferencia de la atmósfera (ρ_{AOD}) es un producto del satélite MODIS Terra y se encuentra en el producto atmosférico MOD08D3. Cuenta con una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 1° x 1°. Este producto no se encuentra disponible para descarga en el paquete de R mencionado anteriormente, por lo que la descarga se realiza a través la página “The Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC)” (ver <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>).

4.2.3. Comparación de albedo in-situ con albedo MODIS

Se realizó una comparación de los valores del albedo calculados a partir de MODIS con datos de albedo medidos en campo. Esto con la finalidad de identificar si MODIS captura la variabilidad del albedo entre las diferentes coberturas en el área de influencia, incluyendo la diferencia entre las coberturas terrestres y el agua. Las mediciones de albedo en campo se realizaron por 5 estaciones con radiómetros Arable Mark, ubicados en la zona de influencia del embalse gracias al convenio 33/73 entre la Universidad de Antioquia e ISAGEN. En la Figura 4.2 se observa la ubicación de las estaciones. Cuatro de las estaciones Arable Mark tienen un registro temporal entre octubre de 2020 y mayo de 2021 (estaciones fijas en Figura 4.2), con lo que la comparación entre los datos de MODIS y los datos medidos por estas se realiza para este rango temporal con los datos en escala mensual. Por otra parte, la quinta estación se movió entre 5 coberturas diferentes y estuvo en ellas entre uno y dos meses (estaciones móviles en Figura 4.2). Como se puede notar, este es un periodo de tiempo completamente después del llenado del embalse, con lo que no se pueden comparar los datos de MODIS de antes del llenado del embalse, pero las estaciones Arable Mark se ubicaron de manera que permiten contrastar el albedo de diferentes coberturas representativas del área de influencia, entre ellas el embalse Topocoro. Así, con esta comparación se buscó identificar la capacidad de MODIS para diferenciar el albedo de las diferentes coberturas y poder usar los datos de manera cualitativa con confianza.

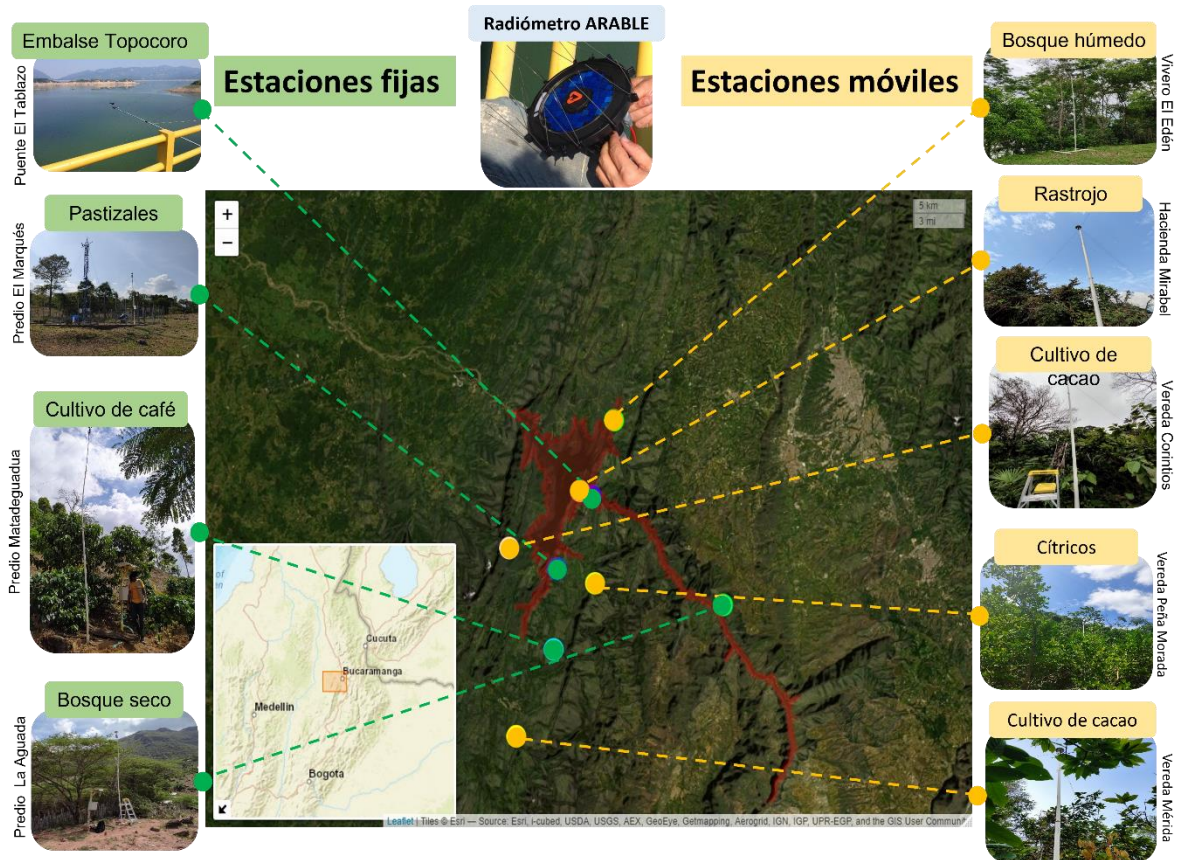


Figura 4.2. Estaciones de monitoreo fijas y móviles en el área de influencia del embalse Topocoro. La estación Pastizales comparte ubicación con la estación El Marqués de N/I. La estación “Bosque seco” comparte ubicación con la estación Guaimaral de N/I. Tomado del informe final para el convenio 33/73 entre la UdeA e ISAGEN

Primero, se realizó una comparación para los valores mensuales de los píxeles de MODIS en las localizaciones de las estaciones instaladas en campo y los datos de los sensores Arable Mark (también se tuvo en cuenta el valor promedio del albedo de ERA5 como un valor de referencia adicional). Esta comparación se realizó estación por estación para las 4 estaciones fijas mediante diagramas de caja y bigote. Según Liang et al. (2002), una comparación “punto a punto” no es suficiente para realizar una validación completa, mucho menos en un territorio complejo como lo es el área de influencia del embalse Topocoro. Sin embargo, el principal interés no es que los valores para un punto específico estén bien representados. Como se mencionó, el interés principal está en identificar si MODIS captura la variabilidad del albedo entre las diferentes coberturas, por lo que se hace esta primera comparación para identificar si los datos hacen parte del mismo conjunto de datos (en términos estadísticos) y si tienen estadísticos similares, es decir, si la distribución de los datos es similar o si hay desfase entre ellos.

Finalmente, se incluyeron los datos para todas las estaciones (móviles y fijas) y los respectivos datos para el pixel donde estas se ubican por parte de MODIS, en un gráfico de dispersión para identificar si los contrastes espaciales de albedo descritos por los datos satelitales y las mediciones in situ son consistentes.

4.3. Resultados y análisis

4.3.1. Albedo de ERA5 y cuerpos de agua

La Figura 4.3 muestra el promedio de los datos mensuales de albedo provenientes del reanálisis ERA5 durante el periodo 1981-2019. En general, se pueden observar las diferencias en el albedo sobre diferentes regiones del país. Por ejemplo, la región Caribe, así como la zona del piedemonte de la cordillera oriental, presentan los valores de albedo más altos, lo que significa que estas superficies tienen la capacidad de reflejar una mayor cantidad de radiación solar incidente, en comparación con superficies de menor albedo. Por ejemplo, en el recuadro azul en la Figura 4.3 se identifica la zona de ciénagas de La Mojana sobre la que se observan valores de albedo entre 0.06 y 0.10 (ver también Figura 4.4), indicativo de superficies de agua continental. Lo anterior significa que estas superficies de agua absorben una mayor cantidad de radiación solar incidente en comparación con otras superficies. Valores similares a los observados en esta región de ciénagas corresponden a los valores esperados para el albedo en la zona donde se ubica el embalse Topocoro. Además, en el recuadro negro en la Figura 4.3 se enmarca el departamento de Santander, que tiene una distribución espacial para el albedo diferenciada entre las zonas este, oeste y centro. La zona este muestra valores de albedo aproximadamente entre 0.10 y 0.16, mientras que las partes oeste y centro tienen valores entre 0.16 y 0.18. Esto significa que las zonas oeste y centro (donde se encuentra ubicado el embalse) son las regiones del departamento que más capacidad tienen para reflejar la radiación solar incidente.

La Figura 4.4 muestra una zona de ciénagas para la que se observa el contraste entre regiones con valores de albedo entre 0.06 y 0.10, y regiones aledañas con valores mayores, entre 0.10 y 0.22, aproximadamente, es decir, corresponden a superficies que reflejan más radiación solar incidente con respecto a los cuerpos de agua. Estos valores más altos se pueden asociar a otros tipos de coberturas como suelo desnudo y cultivos, y bosques (ver Tabla 2.1).

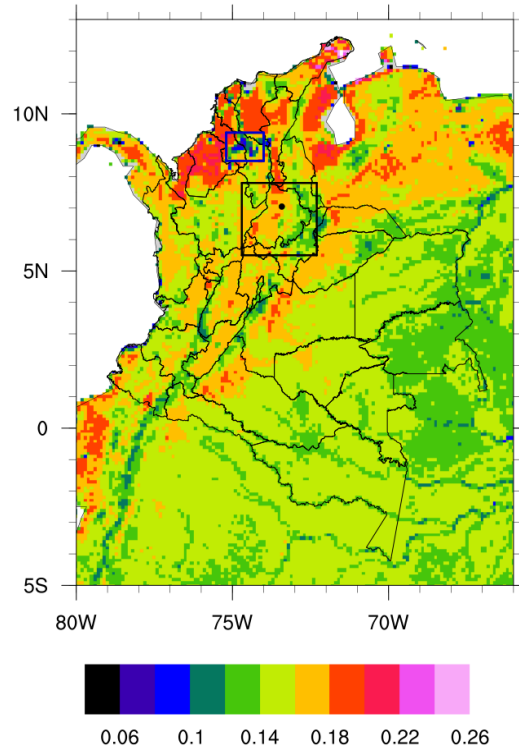


Figura 4.3. Albedo climatológico (promedio mensual de 1981 a 2019) según datos de ERA5. El recuadro negro muestra la región de interés del departamento de Santander. El punto negro indica la ubicación del embalse Topocoro. El recuadro azul enmarca una zona de ciénagas cuyo albedo es similar al de una superficie tipo embalse

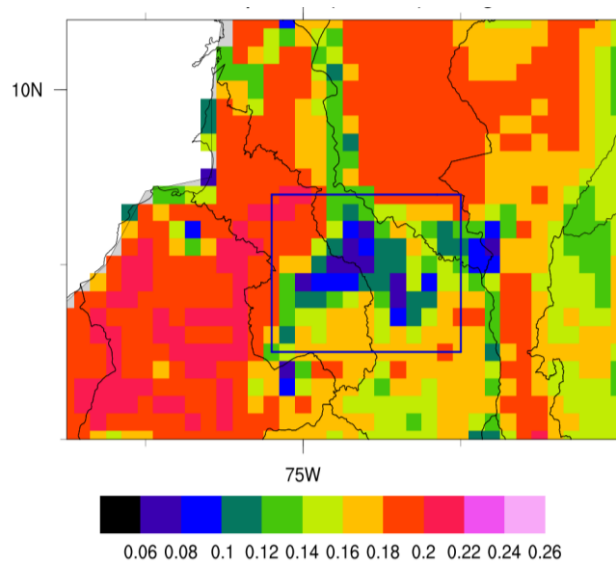


Figura 4.4. Albedo climatológico (promedio mensual de 1981 a 2019) según datos de ERA5. Se hace un zoom al recuadro azul mostrado en la Figura 4.3, detallando más claramente la distribución espacial del albedo en la zona de ciénagas

4.3.2. Albedo de MODIS y de Observaciones In Situ

Los valores de albedo medidos a partir de las estaciones in situ (sensor Arable Mark) vs. las observaciones desde el satélite MODIS, para el mismo periodo de tiempo, se muestran en la Figura 4.5. Ambas mediciones presentan diferencias entre sí para la misma cobertura medida, pero también presentan rangos diferentes de valores para coberturas distintas. Por ejemplo, pese a que MODIS reporta valores más altos de albedo para el embalse que el instrumento Arable, las dos mediciones de albedo del embalse son claramente diferentes y menores que las mediciones de albedo para el cultivo de café. El caso contrario se da en las otras estaciones, donde es el instrumento Arable el que reporta valores más altos que MODIS. Además, algo destacable es que la dispersión de los datos reportada por ambas fuentes es similar, por ejemplo, para el Embalse Topocoro los valores de albedo tienen poca dispersión tanto en Arable como en MODIS, mientras que, en el cultivo de café, ambas bases de datos presentan una dispersión mayor.

También, las mediciones de los instrumentos son inferiores al albedo del reanálisis ERA5. Como se había mencionado, las medias de ERA5 se encuentran entre 0.16 y 0.18, y la única estación en que estos valores hace parte de la distribución para los valores medidos in situ es en cultivo de café, donde hace parte de los valores registrados por el sensor Arable Mark, mientras que en el resto de las estaciones los datos de Arable y de MODIS son inferiores a los del reanálisis. Además, se puede notar la gran diferencia para el Embalse Topocoro, donde ERA5 sigue teniendo las coberturas originales con una media cercana a 0.16, mientras que la de las bases de datos se encuentra entre 0.04 y 0.06.

Por otra parte, las diferencias entre las mediciones de Arable y MODIS son esperadas, ya que las primeras son observaciones locales y de alta resolución en el tiempo, mientras que las segundas son observaciones de satélite con resolución espacial y temporal menores. A partir de los sensores Arable se calcula el albedo mediante la proporción entre la radiación de onda corta reflejada e incidente, para una huella de medición de aproximadamente 16 m, mientras que, con MODIS, el cálculo se hace mediante la metodología expuesta en la sección 4.2.2. Albedo de MODIS, para una huella de medición de 500 m. Así, los datos calculados a partir del satélite tienen un área mayor y pueden perder detalle con respecto al sensor ubicado en campo. Sin embargo, los resultados mostrados en la Figura 4.5 y la Figura 4.6 indican que las mediciones de MODIS tienen la misma capacidad de distinción de albedo entre coberturas que las mediciones in situ con el instrumento Arable. En general, para ambos métodos de observación, el embalse presenta los valores más bajos de albedo, mientras que las demás coberturas están en los rangos más altos de valores (Figura 4.6). En particular, en la Figura 4.6 se puede observar que la nube de puntos para las estaciones en ubicaciones terrestres se diferencia tanto para MODIS como para ARABLE, de las mediciones sobre el embalse, pese a que sus valores medios no son similares. También se nota que, las mediciones para la estación “Rastrojo” se representan como agua en MODIS. Esto se debe a que estas mediciones se realizan en una zona de tierra dentro del embalse, la cual no es identificada por MODIS debido a su resolución. Por esto, se realizó el ajuste lineal entre los datos de MODIS y ARABLE con y sin la información de la estación “Rastrojo”. Como se puede ver en la Figura 4.6, al omitir los datos para “Rastrojo” se tienen un “R cuadrado” y correlación (r) más altos. De esta manera, el conjunto de observaciones de satélite, con mediciones desde el año 2010, permite hacer seguimiento de los cambios de albedo tanto de las coberturas terrestres, como del área del embalse en el tiempo.

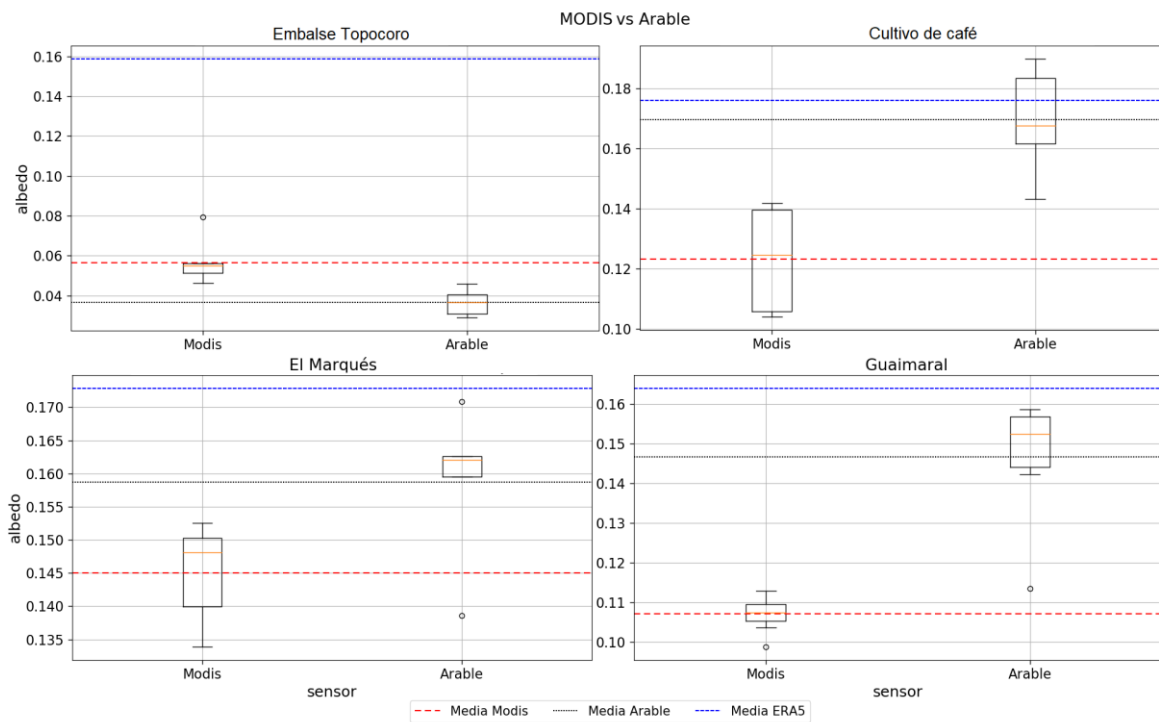


Figura 4.5. Comparación de los datos de albedo de MODIS con los datos de albedo medidos in situ con los sensores Arable en las estaciones fijas

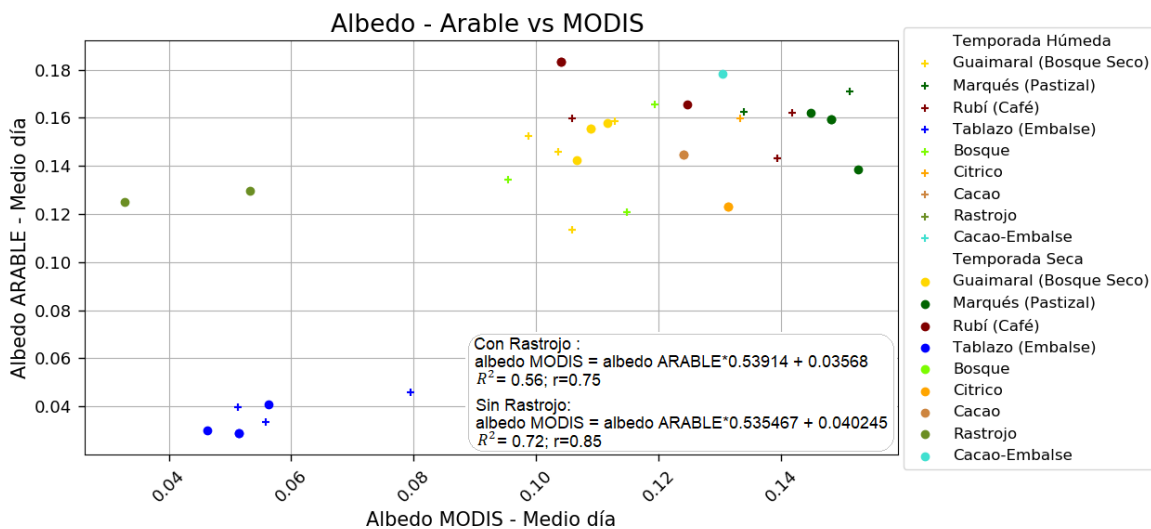


Figura 4.6. Comparación del albedo medido con sensores remotos de MODIS y las mediciones en campo con el instrumento ARABLE, teniendo en cuenta el albedo en temporada de lluvia (húmeda) y temporada seca

4.3.3. Evolución temporal del albedo de MODIS en el área de influencia

Para cuantificar los cambios en albedo en años anteriores y posteriores al llenado del embalse se comparan las mediciones de albedo de MODIS para los periodos 2010-2013 (antes del llenado) y 2015-2021 (después del llenado) (ver Figura 4.7). En general, antes del llenado los valores de albedo se encuentran entre 0.10 y 0.16 (representados por tonos verde oscuro y verde claro en la Figura 4.7), que corresponden a valores de albedo típicos para bosque y cultivos (Shuttleworth, 2012), lo cual concuerda con el tipo de coberturas que se observan en el área de influencia del embalse. Para el periodo después del llenado del embalse (2015-2021), se observa un cambio en los valores de albedo, con disminuciones en la región inundada, con valores entre 0.04 y 0.10 (representados mediante colores negro y azul en la Figura 4.7), y que son típicos para cuerpos de agua. Los cambios están localizados, casi exclusivamente, en el área inundada. Para identificar el cambio temporal del albedo en según la distancia al embalse, se analizó el albedo promediado por transectos en dirección norte-sur y este-oeste (cuadros en la Figura 4.7). Estos transectos se conforman por recuadros de 2 km x 2 km que se interceptan en el centro del embalse, resaltando en color rojo los que corresponden específicamente a áreas inundadas, y que presentan los mayores cambios en el valor de albedo, entre antes y después del llenado del embalse.

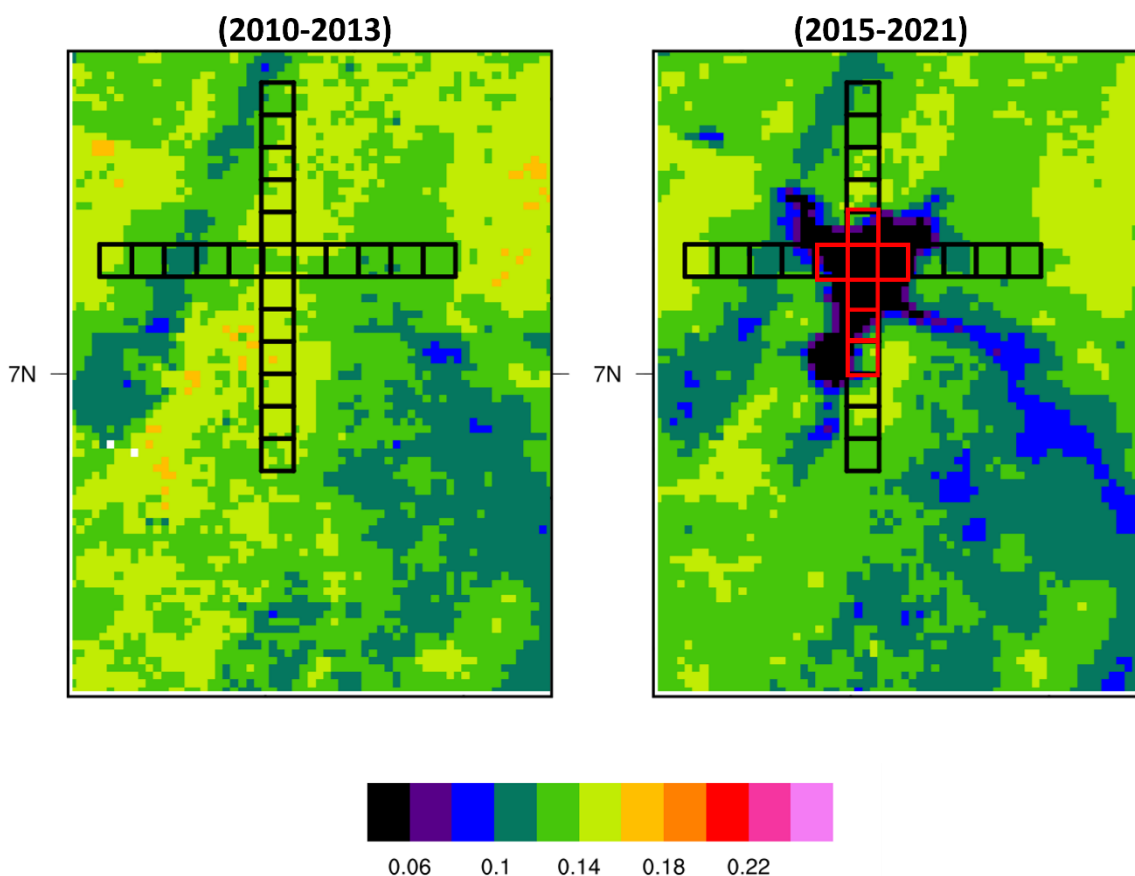


Figura 4.7. Albedo promedio a partir de los datos de MODIS para el área de influencia del embalse en el periodo antes del llenado (2010-2013, izquierda) y después del llenado (2015-2021, derecha). Los cuadrados negros corresponden a transectos de 4 km² en el área de influencia del embalse

Al analizar el cambio temporal de albedo para los transectos de la Figura 4.7, se observa que en 6 casos, correspondientes a la zona inundada (píxeles marcados en rojo), el albedo presenta una disminución evidente a partir del año 2014, correspondiente, precisamente al llenado del embalse (Figura 4.8). Para los recuadros en dirección este-oeste que se ubican a 8km del recuadro central, se identifica una disminución de albedo durante el periodo entre 2014 y 2019 (con valores entre 0.10 y 0.12), con respecto a los valores observados durante el periodo entre 2010 y 2014 (valores entre 0.12 y 0.14). Aun así, el cambio observado en estos recuadros no es tan marcado como para los recuadros resaltados en rojo en la Figura 4.7 (píxeles con 100% de agua después del llenado), donde los valores pasan de estar entre 0.10 y 0.16 a estar entre 0.04 y 0.10. Este cambio se puede deber a que en estos recuadros se considera un área que incluye una sección del cuerpo de agua y superficie no inundada, lo que hace que el promedio espacial del albedo disminuya con respecto al antes del llenado del embalse. Sin embargo, debido a que el agua no ocupa todo el recuadro, el valor no disminuye de la misma manera que en los recuadros que corresponden a regiones totalmente inundadas. Para el resto de los recuadros que se encuentran más alejados del cuerpo de agua, no se logra identificar una variación asociada al llenado del embalse, reforzando que este no podría cambiar el albedo más que en los lugares que fueron inundados por el cuerpo de agua. Así, la interacción de la superficie con la radiación solar incidente debería cambiar únicamente en las regiones donde se ubica el cuerpo de agua, o en regiones que hayan sufrido cambios de cobertura derivados de otras actividades.

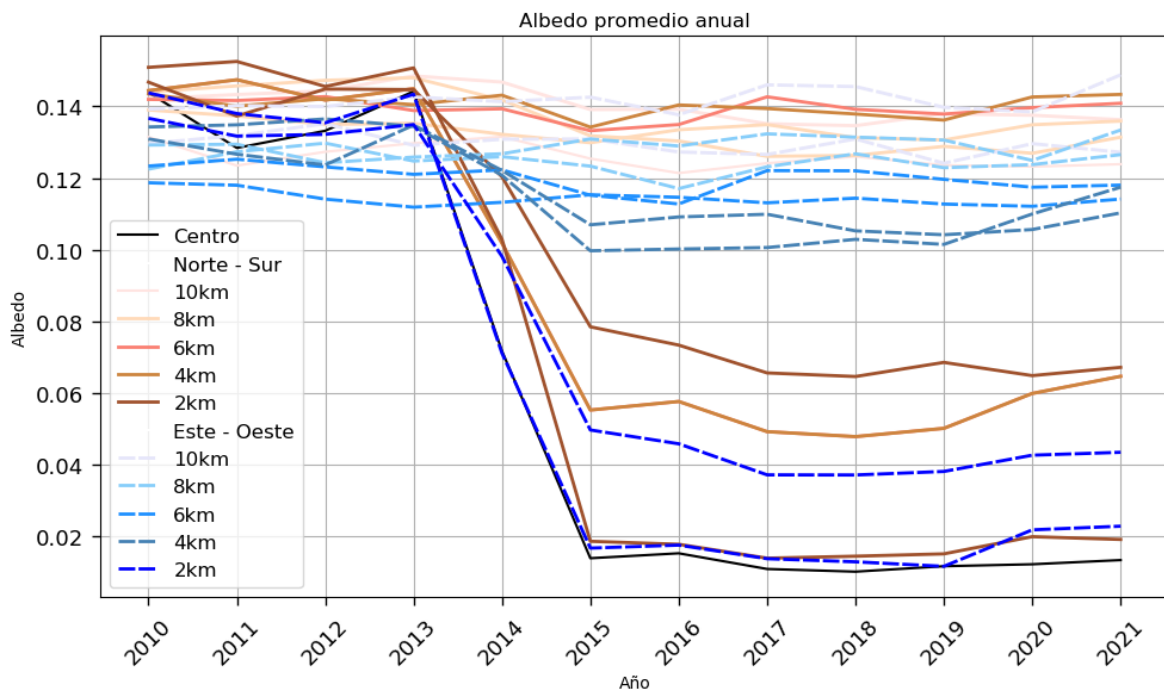


Figura 4.8. Cambio temporal del albedo anual en los transectos presentados en la Figura 4.7

Para ver con más detalle las variaciones del albedo en la zona de influencia del embalse, se realizó un análisis del albedo sobre las ubicaciones de las estaciones meteorológicas de ISAGEN operadas por la fundación Natura (N/I de acá en adelante). Para esto, se tomaron las mediciones de albedo promedio mensual estimado del producto MODIS sobre un píxel centrado en la coordenada de ubicación de la estación meteorológica de interés. A pesar de la frecuente ocurrencia de datos faltantes en los datos de albedo de MODIS (que generalmente corresponde a las temporadas lluviosas que dificultan el registro de la superficie desde satélite), los datos son suficientes para capturar la variación

temporal del albedo en estos sitios y para todo el periodo de análisis (Figura 4.9). Según los datos, únicamente la estación La Estrella presenta una variación consistente con la observada para el área inundada, con un cambio en valores de 0.16 a 0.08 (Figura 4.9). Esto se debe a que, por su cercanía al embalse y la resolución de los datos de MODIS, el píxel correspondiente a esta estación captura parte del área inundada. Por esto, analizamos además un sitio próximo cuyo píxel no incluya cobertura de agua (serie La Estrella AUX en la Figura 4.9, que se ubica 500m al norte de la ubicación de la estación y que conserva las coordenadas longitudinales). Tanto en este como en los demás sitios, se observan variaciones estacionales en el Albedo y algunas asociadas con, posiblemente, cambios en el uso del suelo, pero ninguna presenta un decrecimiento de albedo tan marcado como el registrado en la zona inundada.

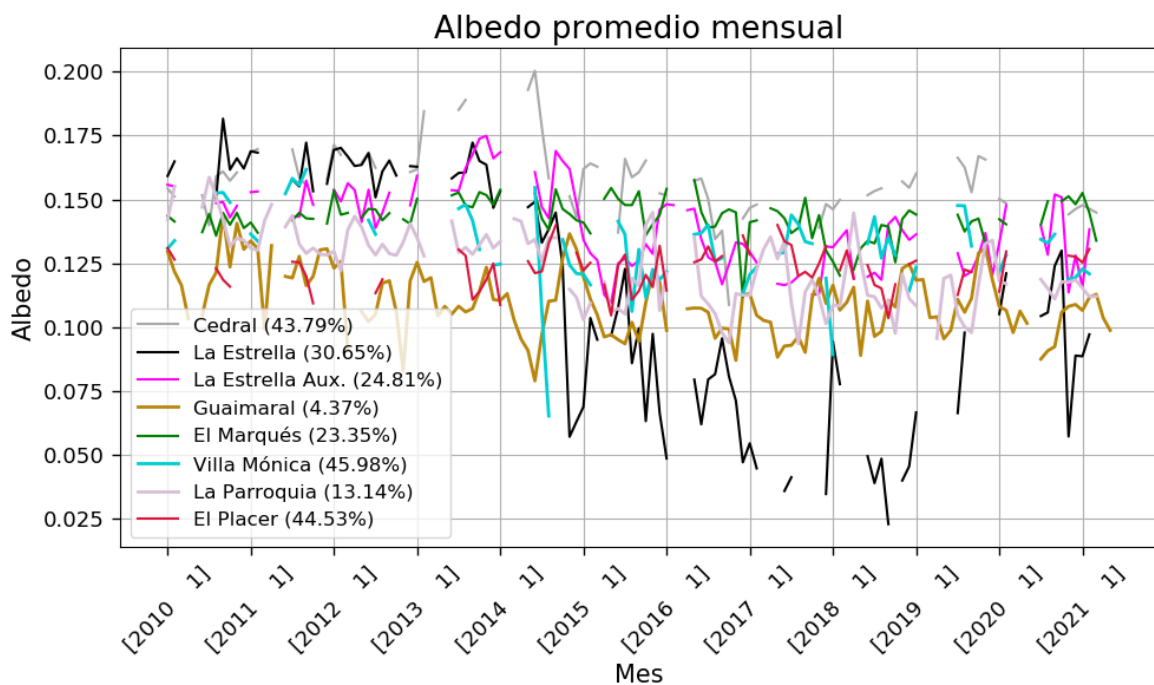


Figura 4.9. Cambio temporal del albedo mensual en las estaciones meteorológicas N/I

4.3.4. Variaciones temporales del albedo de MODIS y la temperatura

Con la finalidad de integrar los resultados del proceso de filtro de la tendencia y de la señal del fenómeno ENSO (que se presenta en el capítulo 3 de este informe) con el análisis del albedo de MODIS para la zona de influencia, se realizaron pruebas estadísticas de diferencia de medias entre los periodos de antes y después del llenado del embalse para la temperatura de las estaciones (tanto para el dato original medido por la estación, como para los datos luego del proceso de filtro) y el albedo. En la Figura 4.10 se presenta un resumen de los cambios en estas dos variables para las estaciones meteorológicas N/I. En todos los casos, excepto en la estación El Placer, el albedo presenta una disminución estadísticamente significativa. No obstante, sólo para La Estrella se nota un cambio realmente substancial en albedo (de 0.16 a 0.07), el cual, como se explicó antes, se relaciona con que

el pixel de MODIS representando esta estación está parcialmente cubierto con agua del embalse en el periodo posterior al llenado.

La temperatura observada (antes de filtrar) aumenta significativamente en todas las estaciones (Figura 4.10), con excepción de la estación Guaimaral, donde se tiene una disminución no significativa. Luego de remover la señal del ENSO se siguen identificando cambios en los valores medios entre el antes y el después para los valores de temperatura, con aumentos de temperatura en algunas estaciones y disminuciones en otras. Debido a que se ha removido tanto el efecto del ciclo anual como el del ENSO y la tendencia de largo plazo de la serie, se espera que estos cambios sean debido a particularidades más locales del área de estudio, entre las que se encuentra, potencialmente, la presencia del cuerpo de agua. También se debe notar que, con excepción de Guaimaral (que presenta un aumento no significativo), todas las estaciones tienen un aumento estadísticamente significativo del valor medio de la temperatura filtrada, con excepción de El Placer y Cedral, donde los valores medios después del llenado son más bajos. En general, la magnitud de los cambios sugiere que sin la presencia del ENSO, el cambio en la temperatura para las estaciones sería menor.

Recordando la ecuación para el balance de energía en superficie: $R_n = G + H + \lambda E$, se tiene que una disminución en el albedo significa que se está absorbiendo más energía proveniente del sol y así puede aumentar el término de radiación neta (R_n), lo que supone más energía disponible, que, dependiendo de las características superficiales, podría aumentar el término de los flujos de calor sensible (H) y finalmente aumentar la temperatura. En general, el sentido de los cambios parece soportar la relación “menor albedo \rightarrow mayor temperatura” (con excepciones en El Placer y Guaimaral). Sin embargo, esta relación no tiene que ser directa, debido a todos los términos involucrados en el balance de energía. Con el fin de identificar qué tan directa puede ser la relación entre la temperatura y el albedo, se analizan los diagramas de dispersión construidos con los diferentes valores de ambas variables para un par de estaciones (Figura 4.11). La relación directa más simple se apreciaría como una relación lineal en estos diagramas de dispersión.

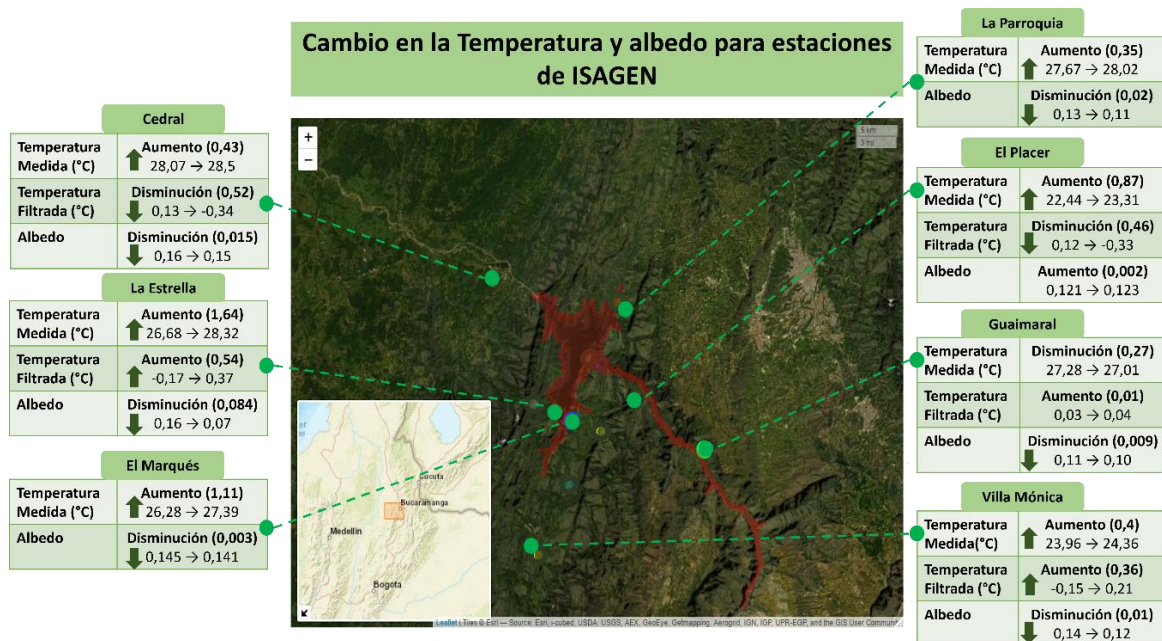


Figura 4.10. Cambios de albedo y temperatura en las estaciones meteorológicas N/I. Las flechas indican un cambio significativo en la variable, indicando el aumento o disminución con la dirección de estas.

La Figura 4.11 muestra los diagramas de dispersión para las estaciones La Estrella y Guaimaral (una estación cerca y otra lejos del cuerpo de agua), construidos con los promedios mensuales de albedo y anomalías mensuales de temperatura, diferenciando los momentos *Antes* y *Después* del llenado del embalse, así como el periodo “durante” el llenado que es el año 2014. También se diferencian las temporadas húmedas y secas, definidas al considerar la climatología de la zona (ver <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>). Los resultados obtenidos indican que no hay una relación simple identificable entre ambas variables. Además, no parece haber una relación estacional entre las mismas (no se identifica un patrón que diferencie las temporadas húmedas de las secas). En el caso de La Estrella (similar para las estaciones Cedral y La Parroquia) se puede identificar claramente la separación de los valores de albedo en el antes y después del llenado, pero el comportamiento de las fluctuaciones en temperatura no cambia mucho entre estos dos periodos. Se observa que los valores de temperatura después del llenado del embalse parecen ser más variables que los valores antes del llenado, pero se debe tener en cuenta que la extensión temporal de las mediciones antes del llenado del embalse es menor, con lo que se podrían estar omitiendo datos que aporten a la varianza para ese periodo. Adicionalmente, las variables presentan una correlación débil de -0.269, lo que refuerza la poca relación lineal (simple) que existe entre ellas. En el caso de la estación Guaimaral no hay separación identificable entre el antes y el después para los valores de albedo, aunque se nota una predominancia de valores bajos en el periodo después del llenado. Los valores de temperatura aparentan mantener una amplitud de las variaciones de entre -0.5 y 0.5 °C a lo largo de todo el periodo de registro. La correlación entre estas variables es de -0.099, lo que se interpreta como una falta de correlación lineal.

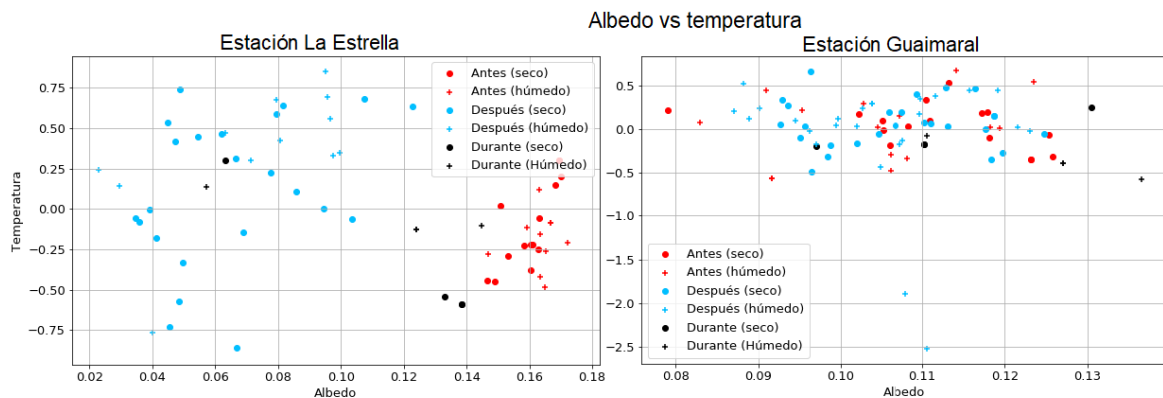


Figura 4.11. Diagramas de dispersión entre temperatura y albedo para las estaciones La Estrella y Guaimaral (estaciones meteorológicas N/I) para los datos medidos mensuales.

En general, la temperatura filtrada de las estaciones presenta falta de correlación, o correlaciones débiles con los valores del albedo para las fluctuaciones mensuales de las variables (ver Tabla 4.2), lo que refuerza la idea de la falta de relación directa entre las variables. Además, se debe recordar que la relación entre albedo y temperatura se da a través de la ecuación completa de balance de energía de superficie

$$R_n = SW_{dw} - SW_{uw} + LW_{dw} - LW_{uw} = H + \lambda E + G,$$

la cual involucra no solo la respuesta de la temperatura al albedo sino además a otros factores como humedad en el aire, vientos, evaporación desde la superficie, entre otros. En resumen, a partir del análisis de los valores medios para los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse (Figura

4.10) encontramos que la relación entre los valores medios de temperatura y albedo tiende a ser opuesta: a menor albedo promedio local, mayor temperatura promedio. Sin embargo, al analizar la relación entre albedo y temperatura mes a mes (Figura 4.11), encontramos que las fluctuaciones mensuales de temperatura y albedo no tienen una relación lineal evidente y que su comportamiento está potencialmente mediado por otros factores.

Tabla 4.2. Coeficientes de correlación entre albedo y temperatura filtrada de las estaciones meteorológicas N/I

ESTACIÓN	r (albedo, T filtrada)
Cedral	0.320
La Estrella	-0.269
Guaimaral	-0.099
El Marqués	0.059
El Placer	-0.245
Villa Mónica	-0.227
La Parroquia	0.081

4.4. Discusión y conclusiones

El albedo calculado a partir de la información de MODIS es un producto útil para el análisis del contraste entre el albedo de diferentes coberturas. Mediante la comparación con los datos medidos in situ mediante sensores Arable ubicados en la zona de influencia del embalse, se pudo verificar que MODIS consigue diferenciar las coberturas de agua de las coberturas terrestres en esta zona. Los sensores Arable tienen observaciones para el agua del embalse con valores de albedo entre aproximadamente 0.02 y 0.05, y para las localizaciones terrestres entre aproximadamente 0.12 y 0.18, mientras que MODIS tiene valores para el agua del embalse (en la localización de la estación embalse de Arable) entre 0.04 y 0.08 y para las coberturas terrestres entre 0.10 y 0.16. Como se puede ver, los valores para el agua del embalse en ambas bases de datos tienen diferentes magnitudes, al igual que para las coberturas terrestres, pero ambas presentan una buena diferenciación entre los valores de agua (más bajos) y los valores para otras coberturas (más altos). De la misma manera, los valores para zonas de agua y tierra coinciden con el rango de valores que se obtuvo del producto ERA5, entre 0.06 y 0.10 para una zona con agua, y entre valores de 0.10 y 0.18 para zona terrestre en el departamento de Santander. Por otra parte, del análisis para todo el rango temporal de MODIS, se puede ver que este producto consigue identificar el momento en que las coberturas terrestres se convierten en agua cuando se inunda la zona del embalse, lo que sumado a la buena diferenciación del albedo entre coberturas, permitió realizar los análisis para identificar la evolución temporal del albedo en la zona de influencia del embalse.

A partir del albedo del producto MODIS, se identificó la ocurrencia de cambios grandes y estadísticamente significativos en el albedo, aunque estos están limitados a la zona inundada, donde los valores de albedo pasaron de valores típicos de coberturas terrestres (como pastos) a valores típicos para agua (i.e. valores menores). En esta zona se tiene un cambio entre los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse, de aproximadamente 0.14 a 0.02, lo que representa una disminución en el albedo alrededor del 85%. También se logró identificar que los valores de albedo para las estaciones meteorológicas N/I presentan disminuciones significativas. Estos cambios varían en magnitud y van desde una disminución de 2.7% (de 0.145 a 0.141) en El Marqués, hasta una disminución de 15.3% (de 0.13 a 0.11) en La Parroquia. Estos cambios son mucho menores en magnitud comparados con los que se presentan en la zona inundada y deben responder a cambios de cobertura en los sitios de cada estación, que no son analizados en este Trabajo de Investigación.

Los resultados obtenidos hasta este punto, considerando el balance de radiación en superficie, no permiten concluir que el llenado del embalse Topocoro ha afectado el comportamiento de las variables meteorológicas en el área de influencia, más específicamente en los sitios de las estaciones analizadas. Una disminución en el albedo implica más absorción de radiación de onda corta, lo que sin cambios en el balance de onda larga implicaría un incremento en la radiación neta, es decir, más energía que se puede emplear en los flujos de calor latente, flujos de calor sensible y flujos de calor al suelo. Si los flujos de calor sensible aumentan, la temperatura del aire puede aumentar, y de esta manera un cambio en el albedo representaría un cambio en la temperatura, pero como se puede ver, los resultados obtenidos no muestran una relación directa y, por la naturaleza de los procesos involucrados, dicha relación tampoco es lineal. En este sentido, el resultado encontrado para las correlaciones de la temperatura filtrada con el albedo para las estaciones meteorológicas cobra sentido. En general, todas las correlaciones son cercanas a cero, siendo la más alta la de la estación Cedral, con un valor de 0.32. Aún así, para el caso de la diferencia de los valores medios entre los periodos *Antes* y *Después* del llenado del embalse, sí se encuentra una relación en la que las disminuciones del albedo ocurren para las estaciones donde también se tienen aumentos en temperatura, incluso luego de aplicar el filtro de la señal de ENSO, con excepción de la estación Cedral.

Capítulo 5: Simulaciones con el modelo WRF

5.1. Introducción

En conjunto con las observaciones in-situ y/o desde sensores remotos, una herramienta poderosa y ampliamente usada que permite complementar información y entender procesos de interés es la modelación. Particularmente, los modelos atmosféricos de mesoescala o área limitada se han encontrado útiles para estudiar procesos asociados con lugares de topografía compleja, donde las observaciones no son suficientes o no están bien distribuidas (Chow et al., 2013). Los modelos permiten investigar sobre procesos complicados de monitorear con observaciones y mediciones in-situ, además, permiten realizar experimentos con condiciones difíciles de replicar en la realidad, y entregan en sus salidas una gran cantidad de variables con datos continuos tanto espacialmente como temporalmente. Por esta razón, se realizaron experimentos de simulación para dos escenarios con coberturas diferentes, con la finalidad de identificar los impactos generados en el modelo entre los escenarios con y sin embalse. El primer escenario consideró las coberturas originales que tiene el modelo en el área de influencia (CTRL), mientras que el segundo escenario introduce un cuerpo de agua para representar el embalse (LULCC). Para esto, las simulaciones se realizaron para un periodo neutro del fenómeno ENSO, considerando únicamente días despejados pues el principal interés es el seguimiento sobre algunas componentes del balance de energía en superficie, y además, la adecuada simulación de la precipitación representa un reto adicional, afectando la simulación del balance de energía en la región de interés (e.g. Bryan et al. 2003; Prein et al. 2015).

Las simulaciones se realizaron con el modelo WRF (Skamarock et al., 2021). Este es un modelo atmosférico de pronóstico y reducción de escala ampliamente usado por la comunidad científica con diversas aplicaciones que van desde el pronóstico operacional, hasta la investigación de casos de estudio específicos (Chow et al., 2013). Como se expone en Chow et al. (2013), los resultados de los modelos pueden tener sesgos y errores, que generalmente han sido atribuidos a una insuficiente resolución horizontal y vertical, así como a las parametrizaciones físicas que resuelven los procesos en escala de sub-celda, relacionados con la radiación de onda larga y corta, turbulencia superficial y en la capa límite, procesos superficiales, convección, microfísica de nubes y precipitación (e.g. Warner, 2011). Estos procesos son particularmente importantes en esta investigación por la naturaleza del balance de energía, que involucra la radiación, y su distribución en los flujos de calor latente y sensible, así como la interacción con la temperatura y humedad cerca de la superficie. Así, un buen desempeño del modelo dependerá de una adecuada selección de la resolución y de las parametrizaciones, por lo que en este capítulo se hace una descripción del proceso llevado a cabo para seleccionar dichos elementos, antes de realizar los experimentos de CTRL y LULCC. Además, se expone se hace una descripción de los procesos llevados a cabo para realizar el cambio de cobertura en los campos del modelo.

5.2. Datos y Metodología

A continuación, se presenta una descripción de los procedimientos seguidos para definir y llevar a cabo los experimentos de simulación realizados en este Trabajo de Investigación: selección de días a simular, selección de configuración y parametrizaciones empleadas, e incorporación del cuerpo de agua en WRF.

5.2.1. Selección de días para la simulación

En la Tabla 5.1 se presentan algunos ejemplos de experimentos de simulación desarrollados por diferentes grupos de investigación con el objetivo de evaluar los impactos de un cambio de cobertura en variables como los flujos de calor relacionados con el balance de energía y la temperatura. Los estudios considerados realizan los experimentos de simulación en periodos donde predominan los días despejados, de manera que se puedan identificar las variaciones en la radiación neta y los flujos superficiales, así como en la temperatura cerca de la superficie, ocasionados por el cambio en la cobertura. Generalmente, en condiciones de días nublados y lluviosos, los flujos presentan cambios debido a la nubosidad. Además, las simulaciones de nubosidad y días lluviosos tienen consideraciones adicionales y representan un reto significativo en la modelación (e.g. Bryan et al. 2003; Prein et al. 2015).

Puesto que en este Trabajo de Investigación el interés se centró en algunas componentes del balance de energía, así como en la respuesta de la temperatura, los experimentos se realizaron para días despejados en condiciones neutras del fenómeno ENSO, con el fin de no tener la influencia de este en la variabilidad de los resultados. Las simulaciones se realizaron para un periodo antes del llenado del embalse, con la finalidad de emplear los datos observacionales de las estaciones N/I en el área de influencia para la validación de la simulación bajo condiciones sin presencia del cuerpo de agua.

Por otro lado, los experimentos presentados en la Tabla 5.1 consideran la selección de dominios en lugares con topografía compleja, similar a la región de estudio de este Trabajo de Investigación. Por ejemplo, Saavedra et al. (2020) simulan para una región de los Andes, con interés principal en los Andes Peruanos, donde se ubica su dominio interno con resolución de 3 km. De manera similar, De Meij & Vinuesa (2014) simulan para una región de los Alpes con un dominio interno de 1 km ubicado en el sur de esta cadena montañosa. Una simulación de alta resolución representa un alto costo computacional, con lo que la resolución a la que se puede llegar dependerá también de la cantidad de días a simular. Mientras más resolución, más costoso resulta simular una gran cantidad de días. Particularmente, el experimento de Jimenez-Esteve et al. (2018) es el único que llega a una resolución por debajo de 1 km. Su dominio interno se ubica al este de los Pirineos y tiene una resolución de 500 m. A su vez, su extensión temporal es la más corta de los experimentos presentados en la Tabla 5.1. La complejidad de la topografía en la zona de estudio de este Trabajo de Investigación requiere llegar a una resolución similar a la de Jimenez-Esteve et al. (2018) (300 m en nuestro caso), por lo que se planteó un experimento en el que se simulaban 11 días despejados, donde el primero de ellos es considerado de “*spin up*” (Warner, 2011).

Tabla 5.1. Resolución espacial y periodo de simulación para experimentos de simulación que evalúan la sensibilidad de WRF a cambios en cobertura

Resolución espacial	Periodo	Publicación
4 dominios anidados (27 km→9 km→3 km→1 km)	Entre noviembre de 2011 y enero de 2012 (verano en su zona de estudio)	Li et al. (2019)
3 dominios anidados (27 km→9 km→3 km)	Todos los eneros entre 2004 y 2008	Saavedra et al. (2020)
2 dominios anidados (5 km→1 km)	Enero-febrero y julio-agosto de 2008	De Meij & Vinuesa (2014)
4 dominios anidados (9 km→3 km→1 km→0.5 km)	9 días en verano de 2013	Jimenez-Esteve et al. (2018)

Para seleccionar los días despejados para la realización de los experimentos, se calculó el “*clearness index*” (k_t). Este representa la proporción entre la radiación que llega a la superficie, medida por un instrumento in-situ, y la radiación teórica en el tope de la atmósfera que podría llegar a ese lugar teniendo en cuenta su localización, el momento del año, el momento del día y la posición del sol (e.g. Perez et al., 1990). Este índice se encuentra entre 0 y 1. Mientras más cercano sea el valor a 1, más despejado se podrá considerar un día, y viceversa. El índice es calculado de la siguiente manera:

$$k_t = \frac{GHI}{I_{ext}} \quad (5.1)$$

Donde *GHI* se refiere a la “*Global Horizontal Irradiance*” que es la radiación incidente medida por un piranómetro. En el caso de este Trabajo de Investigación, esta variable fue obtenida de las estaciones meteorológicas N/I en el área de influencia, en una resolución temporal horaria. El término I_{ext} hace referencia a la radiación solar que puede llegar a la superficie cuando no se tiene en cuenta el efecto de la atmósfera. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$I_{ext} = S_0 \left(1 + 0.033 * \cos \cos \left(\frac{360 * \text{día del año}}{365} \right) \right) * \cos \theta_z \quad (5.2)$$

Donde S_0 es la constante solar, que para este caso se asume como 1367 W/m^2 (e.g. Shuttleworth, 2012) y θ_z es el ángulo del zenith, que depende del ángulo de declinación del sol δ , del ángulo horario ω , y de la latitud ϕ (e.g. Shuttleworth, 2012).

Diversos estudios que emplean el índice k_t encuentran diferentes criterios de selección del límite que identifica días despejados (Okogbue et al., 2009). Algunos autores asumen un día despejado para valores por encima de 0.5 (e.g. Djafer et al., 2017), otros con valores por encima de 0.6 (e.g. Reindl et al., 1990; Kuye & Jagtap, 1992) y otros para valores sobre 0.7 (e.g. Li et al., 2001). Para este caso se asumió un día despejado para valores del índice superiores a 0.5, con la finalidad de establecer un criterio más flexible que permitiera la selección de varios días consecutivos. Además, como se tienen varias estaciones de medición en el área de influencia, los días despejados se identificaron cuando se tiene un valor de k_t igual o superior a 0.5 en al menos 4 de las estaciones.

De esta manera se seleccionaron los días entre el 31 de diciembre de 2012 y el 10 de enero de 2013. Los resultados para el 31 de diciembre de 2012 no fueron tenidos en cuenta para los análisis pues se tomaron como de “*spin up*”.

5.2.2. Condiciones iniciales y de frontera

Como condiciones iniciales y de frontera para los experimentos de simulación realizados, se usaron los datos del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2018), producto más reciente del ECMWF. Estos datos tienen una resolución espacial de aproximadamente $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$, y una resolución temporal horaria, lo que permite ingresar condiciones de frontera con este paso de tiempo. Los datos se descargaron para los 11 días despejados seleccionados de la manera que se describió en la sección anterior (Sección 5.2.1).

Además de servir como forzante para el modelo, los datos de reanálisis también se usan como una base de datos de referencia para la validación de las salidas del modelo. Esto permite identificar las bondades y ganancias al utilizar los modelos de área limitada para reducir la escala de los datos, además de permitir la construcción de diferentes escenarios, como lo es el caso del escenario con embalse considerado en este estudio.

Se descargaron las variables necesarias para correr el modelo, así como las variables para realizar la validación de los resultados. Para las corridas del modelo fueron necesarias variables como temperatura, componentes zonal (U) y meridional (V) del viento, y humedad relativa, tanto en la superficie como en la vertical, entre otras. Para la validación se utilizó la temperatura a 2 m, las componentes U y V del viento, y la humedad relativa a 2 metros.

5.2.3. Selección de dominios y topografía

La Figura 5.1 muestra la configuración de dominios usada, así como la topografía, que para este trabajo fue la de USGS, considerada por defecto por el modelo. Como se puede ver, la zona de interés (ver Figura 5.1 – d04) presenta una topografía compleja, por lo que se usó una configuración de 4 dominios anidados, con relación de 3:1, de manera que el dominio externo (d01) tiene una resolución horizontal de 9 km, d02 de 3 km, y d03 de 1 km, mientras que d04, que abarca la zona del embalse y su área de influencia, tiene una resolución de aproximadamente 333 m.

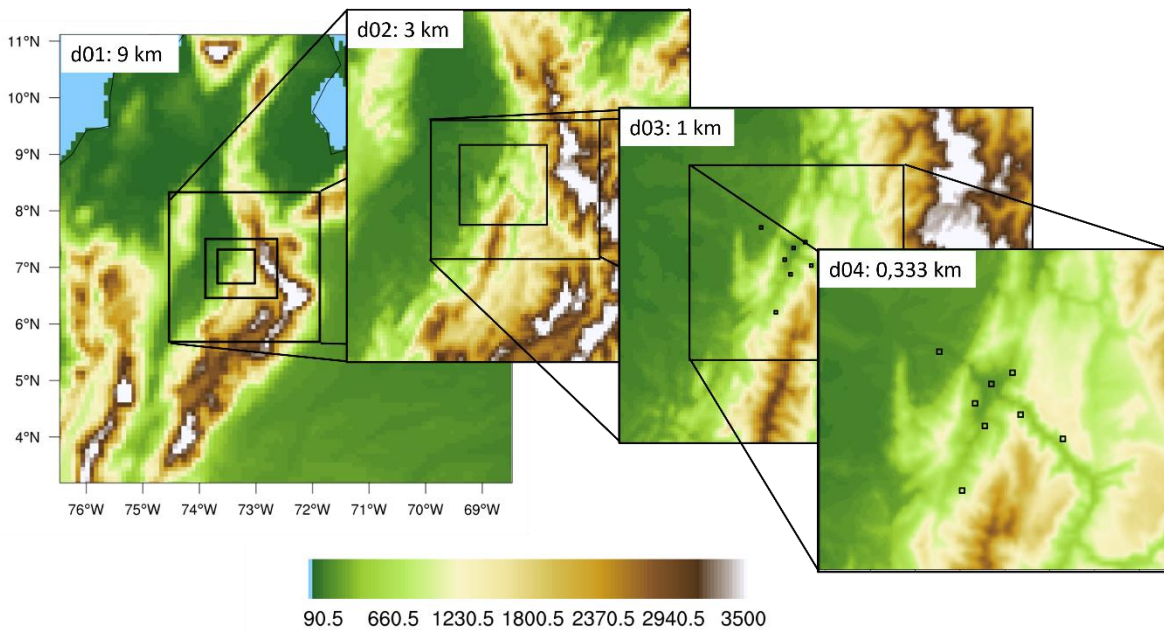


Figura 5.1. Dominios de simulación seleccionados para los experimentos. Los colores representan la topografía por defecto usada por WRF. Los recuadros pequeños marcan la ubicación de las estaciones N/I en los diferentes dominios

Para conseguir esta organización de dominios y, además, tener una simulación estable, se hizo necesario la realización de diferentes ensayos preliminares. Para esto se realizaron 39 simulaciones cortas, de aproximadamente 3 horas de duración, para identificar si la topografía y selección de dominios eran estables, principalmente en el dominio interno (d04). En estos experimentos se puso a prueba diferentes formas de definir la topografía con la finalidad de identificar aquella que mejor representara la altura de la localización de las estaciones N/I, pues una topografía con una adecuada representación de la altura puede disminuir los sesgos de la temperatura simulada (e.g. Saavedra et al. 2020). Se usó de la topografía por defecto del modelo, la topografía del DEM CGIAR-CSI SRTM (SRTM en adelante) que tiene una resolución de 90m debido al reprocesamiento de los datos originales del DEM SRTM de la NASA (ver: <https://srtm.csi.cgiar.org>), así como versiones más suavizadas de ambas. También se ensayaron diferentes configuraciones para otros elementos técnicos de la simulación como el tope superior, la cantidad de niveles de presión, el paso de tiempo para la integración de las ecuaciones, diferentes horas de inicialización y diferentes selecciones para la ubicación de los 4 dominios. De las 39 simulaciones, 33 fueron inestables. El principal problema identificado fue que, en los lugares de la topografía más escarpada, en la zona del cañón que conduce a la localización del embalse, se generaban velocidades verticales irreales. Esto ocurrió usando tanto la topografía por defecto del modelo como la de SRTM. Dentro de estos 33 experimentos, se intentaron diferentes formas de definición de los niveles verticales y diferentes toques de la atmósfera, de manera que quedaran más niveles cerca de la superficie y que los flujos fueran mejor resueltos en esta zona; sin embargo, los resultados obtenidos no fueron los esperados pues incluso con una mayor cantidad de niveles en la vertical y cerca de la superficie no se consiguió estabilidad en la simulación. También se disminuyó el tiempo de integración hasta 21s (lo que hace que la simulación sea más costosa computacionalmente), nuevamente sin obtener los resultados esperados. Para los 6 experimentos estables se usó la definición de niveles por defecto del modelo, con tope en 50hPa, y los experimentos se diferenciaron por la hora de inicialización, a las 12 pm, 2 pm y 7 pm (lo que

permitió verificar la estabilidad tanto en el día como en la noche), y diferentes pasos de integración de 24s y 36s, ambos estables.

Por otra parte, la topografía de alta definición de STRM se convirtió en un factor en contra, pues no fue posible obtener ninguna simulación estable con esta topografía. Además, STRM generó elevaciones menos realistas para las estaciones N/I. En la Tabla 5.2 se puede ver la elevación real de las estaciones N/I, así como la elevación para la topografía por defecto del modelo (Default), y la topografía de SRTM, para el dominio d04. Como se puede ver, la topografía Default es la que más cerca queda de las elevaciones reales para 5 de las 7 estaciones. Así, por cercanía con la altura real y por estabilidad, se seleccionó la topografía incluida por defecto en WRF para los experimentos realizados en este Trabajo de Investigación.

Tabla 5.2. Elevación de las estaciones N/I para las observaciones reales, para la topografía por defecto del modelo, y para la base de datos SRTM a 300m

Nombre	Reales	Default (300m)	SRTM (300m)	Base de datos más cercana a la realidad
Cedral	272	172,2	169,8	Default
La Estrella	434	361,5	346,4	Default
El Marqués	598	447,3	461,7	SRTM
La Parroquia	381	427,8	436,9	Default
El Placer	995	828,9	907,4	SRTM
Guaimaral	650	633,6	583,8	Default
Villa Mónica	879	876,0	899,7	Default

5.2.4. Selección de parametrizaciones físicas

Una vez identificada la configuración definitiva de los dominios y la topografía, se realizaron varios experimentos de validación hasta el dominio 3 con resolución espacial de 1km (ver Figura 5.1-d03), para así seleccionar la configuración de parametrizaciones físicas, lo cual es importante para una buena representación de las variables de interés (e.g. Chow et al., 2013; Mamani & Hendrick, 2021). Se probaron diferentes esquemas de capa límite planetaria (PBL), microfísica, radiación, y modelo de superficie (LSM). Los esquemas de PBL estiman los flujos verticales en escala de sub-celda, es decir, los flujos que no pueden ser resueltos explícitamente por el modelo. Esto es importante ya que dependiendo de la resolución de estos flujos se pueden mover cantidades como calor y humedad, lo que es primordial para este estudio. Para este experimento se comparó el comportamiento de los esquemas YSU (Hong et al., 2006), que usan términos contra-gradiente para representar los flujos debido a gradientes no-locales. Además, estos esquemas tienen un tratamiento explícito de la “*entrainment layer*” en el tope de la atmósfera y usan un número de Richardson para la definición de la profundidad de la capa límite, de manera que esta es dominada por la “*buoyancy*”. También se consideró el esquema MYNN (Nakanishi & Niino, 2006), que se basa en esquemas de energía cinética turbulenta (TKE), y el esquema Shin-Hong (SH) (Shin & Hong, 2015), que es similar a YSU pero a medida que la escala horizontal se hace más pequeña que la profundidad de la capa límite, le resta importancia a los términos no-locales para permitir que la escala resuelta haga una fracción del transporte. Además, se usó YSU con dos posibles parametrizaciones de “*Surface layer*” (YSU2 en Tabla 5.3), que representa la primera capa de atmósfera que está en contacto con la superficie y calcula, entre otras cosas, los coeficientes para calcular los flujos de calor latente y sensible.

Por su parte, los esquemas de microfísica se encargan de resolver la formación de hidrometeoros, por lo que era de interés identificar si alguno de los esquemas considerados generaba más nubosidad en la zona de estudio, ya que nuestro interés se centró en los días despejados. Se compararon los esquemas de Morrison (Morrison et al., 2008) y Thompson (Thompson et al., 2008) que, en general, hacen la predicción de hidrometeoros de manera similar, aunque Morrison contiene información para 5 especies de hidrometeoros mientras que Thompson predice para hielo y lluvia.

Los esquemas de radiación se encargan de las interacciones con la atmósfera y superficie de la radiación de onda larga y de onda corta, lo que es importante pues tiene relación con la energía disponible en superficie y con el balance de energía superficial. Se compararon los esquemas RRTM (Mlawer et al., 1997), que usa tablas para describir los procesos de radiación de onda larga y corta, y RRTMG (Iacono et al., 2008), que también usa tablas, pero además incluye el uso de bandas espectrales y distribución-k, además de otras aproximaciones. Este esquema se comunica con el esquema de microfísica para la interacción con hidrometeoros y también incluye información sobre otros componentes.

Las parametrizaciones para el modelo de superficie se encargan de incorporar la información atmosférica (como la generada por los esquemas anteriormente mencionados) para producir flujos de calor y humedad superficiales, que a su vez son usados, por ejemplo, por el esquema de capa límite. Esto es importante pues parte primordial del problema es la identificación de los cambios en la interacción de la superficie y la atmósfera con el cambio de cobertura. Se compraron los modelos Noah LSM (Chen & Dudhia, 2001), que incluye 4 capas de suelo que representan hasta los 2 metros de profundidad, tiene en cuenta la vegetación, evapotranspiración, drenaje y escorrentía; Noah_MP (Niu et al., 2011), que es una evolución del Noah, permite además parametrizar características de la vegetación, la escorrentía, y tiene opciones para cultivos; y el Community Land Model (CLM) (Oleson et al., 2010), que se diferencia de los anteriores porque tiene 10 capas de suelo y físicas más complejas (lo que también lo hace computacionalmente más costoso).

Estos experimentos de validación se realizaron solo para los 5 primeros días de la simulación del 1 al 5 de enero de 2013 (ver Tabla 5.3). Finalmente, luego de los análisis para estos experimentos (descritos con más detalle en la sección 5.3.1), se seleccionó la configuración de parametrizaciones que se puede observar en la Tabla 5.4.

Tabla 5.3. Periodo simulado y parámetros considerados en los experimentos de validación y selección de configuración con el dominio d03

Periodo simulado	Nombre del Experimento	PBL	Surface layer	Microfísica	Radiación	LSM
1 al 5 de enero de 2013	SH	SH	MM5	Morrison	RRTMG	NoahMP
	TH	SH	MM5	Thompson	RRTMG	NoahMP
	NOAH	SH	MM5	Morrison	RRTMG	Noah
	RRTM	SH	MM5	Morrison	RRTM	NoahMP
	CLM	SH	MM5	Morrison	RRTMG	CLM
	YSU	YSU	MM5	Morrison	RRTMG	NoahMP
	YSU2	YSU	Chen095	Morrison	RRTMG	NoahMP
	MYNN	MYNN	MYNN	Morrison	RRTMG	NoahMP

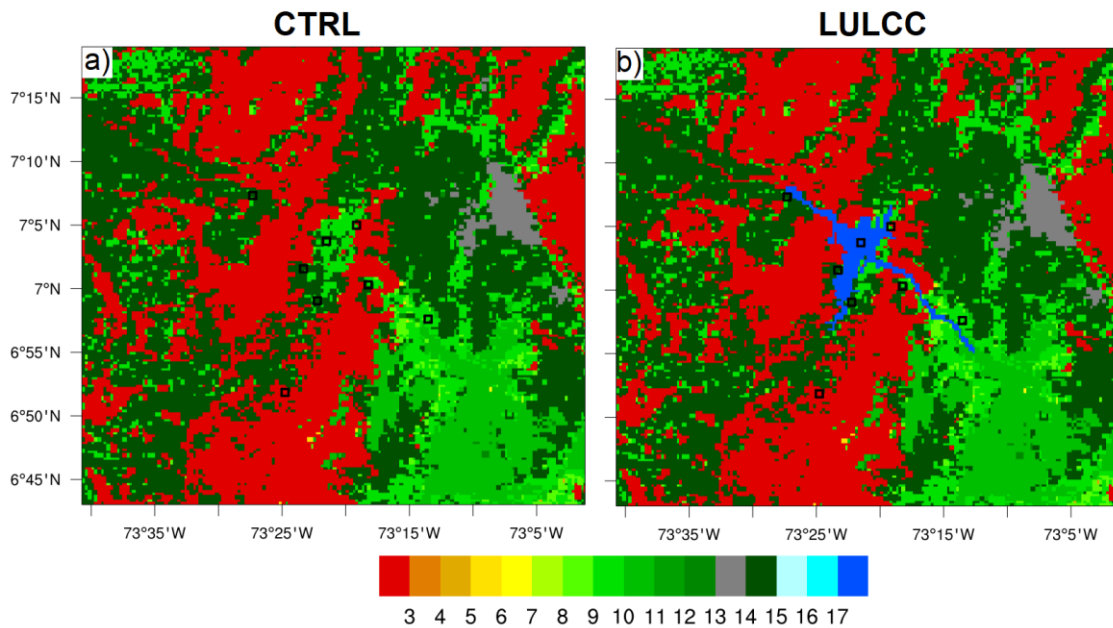
Tabla 5.4. Detalles y parametrización física de las simulaciones

Dominios y configuración de integración				
	D01	D02	D03	D04
Resolución horizontal	9 km	3 km	1km	0.333 km
Número de puntos	100*100	100*100	142*118	220*202
Paso de tiempo	36 s	12 s	4 s	1.333 s
Niveles verticales	71	71	71	71
Parametrizaciones físicas				
Radiación	RRTMG			
Land Surface model	NoahMP			
Microfísica	Morrison			
Cumulus	New Tiedke	-	-	-
PBL	SH			
Surface layer	MM5			

5.2.5. Cambio de cobertura superficial

Como se ha mencionado, el interés de los experimentos de simulación desarrollados en este Trabajo de Investigación es realizar la comparación entre dos escenarios, uno sin embalse y otro con embalse en la región de influencia del embalse Topocoro. En la Figura 5.2 se puede ver el cambio de cobertura planteado, específicamente para el dominio d04, aunque este se realiza en cada dominio. Se puede ver el cambio tanto en los tipos de uso del suelo (ver Figura 5.2 a y b) como en el albedo (ver Figura 5.2 c y d). Como se observa, el cambio realizado implica la modificación de las coberturas en la parte central del dominio d04 por el uso de suelo 17, que es agua, reduciendo en esa zona el albedo hasta un valor de 0.08. Como se puede observar, no se modifica ninguna celda asociada a la ubicación de las estaciones N/I.

Usos del suelo (0.333 km)



Albedo (0.333 km)

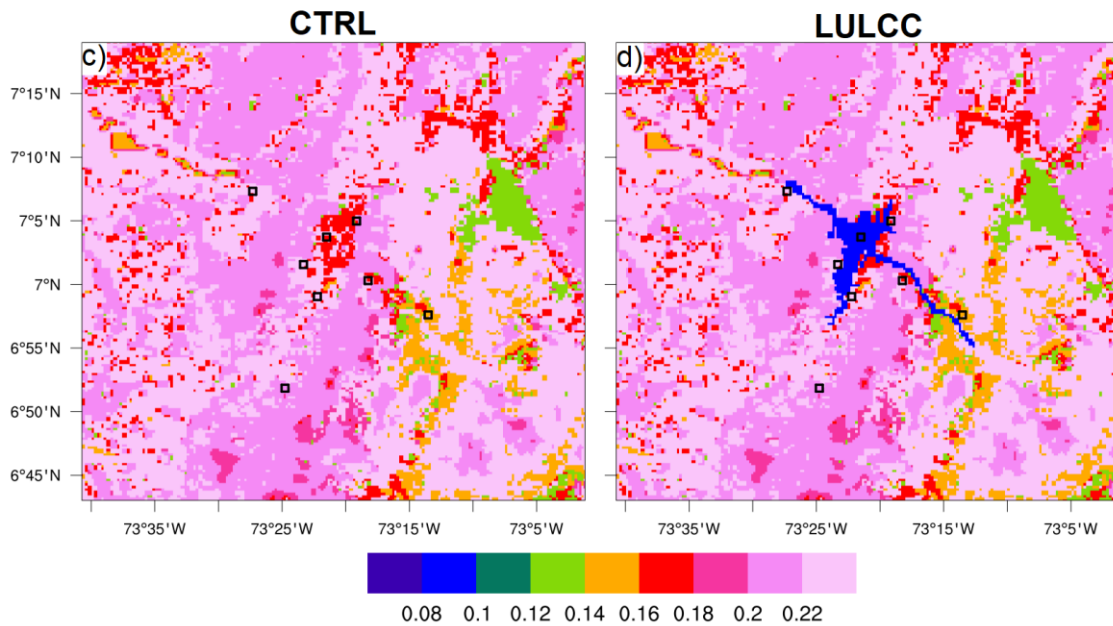


Figura 5.2. Usos del suelo para a) experimento de control (CTRL) y b) experimento con cambio de cobertura (LULCC). Albedo para c) experimento de control (CTRL) y d) experimento con cambio de cobertura (LULCC)

Para el diseño del escenario con embalse fue necesario introducir el cuerpo de agua manualmente en los archivos estáticos de entrada a la simulación, más específicamente los archivos “geog_em.d0X” generados en el sistema de preprocesamiento de WRF (WPS, por sus siglas en inglés). Para esto, se generó una máscara del embalse a partir de un archivo shape de aguas continentales (propiedad de ISAGEN) en el que se cuenta con la delimitación del cuerpo de agua. Mediante el uso del programa QGIS, se generó un archivo ráster con la resolución de los dominios de simulación a partir del archivo

shape mencionado, para posteriormente modificar las celdas de los archivos “geog_em.d0X” y de esta manera cambiar los campos necesarios para introducir el cuerpo de agua en las simulaciones y obtener campos como los de la Figura 5.2. Para realizar el cambio de cobertura satisfactoriamente se debió modificar no sólo los campos de coberturas sino también los campos de tipo de suelo, vegetación, albedo y temperatura del agua. En la Tabla 5.5 se presenta un listado de las variables modificadas para este fin.

Tabla 5.5. Variables que deben ser modificadas en los archivos geo_em.d0x para realizar el cambio de cobertura

Nombre	Variable
HGT_M	Elevación
LU_INDEX	Índice de uso del suelo
LANDMASK	Máscara de tierra
SOILTEMP	Temperatura del suelo
SNOALB	Albedo de nieve anual
ALBEDO12M	Albedo mensual
GREENFRAC	Fracción de vegetación
LAI12M	Índice de área foliar
LANDUSEF	Uso del suelo
SOILCBOT	Tipo de suelo – capa inferior
SOILCTOP	Tipo de suelo – capa superior

Temperatura de superficie en cuerpos de agua

Al incorporar un cuerpo de agua que no existe en los archivos meteorológicos de entrada para la simulación (condiciones iniciales y de frontera de ERA5), se debe establecer la temperatura superficial del cuerpo de agua (Mallard et al., 2015). Esta temperatura se sobrescribe en los archivos wrfinput_d0x y wrflowinput_d0x, también en pasos preliminares a la simulación. Por defecto, el modelo WRF establece la temperatura superficial de los cuerpos de agua continentales, interpolando para celdas cercanas desde los cuerpos de agua en campos de entrada. En caso de no tener puntos desde los cuales interpolar, toma la temperatura del punto de agua más cercano, que en la mayoría de los casos está muy alejado y representa temperaturas poco realistas para el lugar que se desea representar (Mallard et al., 2015). En este Trabajo de Investigación exploramos formas más realistas de especificar la temperatura superficial del agua en el área del embalse.

Para seleccionar la temperatura superficial del cuerpo de agua se realizaron 5 experimentos con formas diferentes de definir la temperatura superficial de dicho cuerpo. Estos se pueden observar en la Tabla 5.6. El nombre de los experimentos lleva el prefijo LULCC (por la expresión en inglés “*Land Use Land Cover Change*”). En los experimentos LULCC_00 y LULCC_12 se permitió que el modelo interpole la temperatura para la celda de agua más cercana, que corresponde a la temperatura superficial del cuerpo de agua durante toda la simulación, es decir que fue constante en el tiempo. La

diferencia entre estos experimentos es la hora de inicio, por lo que la temperatura superficial que se le prescribe al cuerpo de agua es diferente. LULCC_00 inicializa el 2103-01-01 a las 05 UTC, es decir, a las 12 am (hora local) de enero 1 de 2013, por eso esta temperatura es la más baja de los experimentos (ver Tabla 5.6). El experimento LULCC_12 inicializa el 2013-01-01 a las 17 UTC, es decir al medio día (hora local) de enero 1 de 2013. El experimento LULCC_SST es similar a LULCC_00 pero activando la opción “*sst_skin*” en el “*namelist_input*”, la cual le imprime un ciclo diurno a la temperatura del océano (que es como se trató al agua del embalse en esta simulación). El experimento LULCC_SST_CTE considera la temperatura promedio para el experimento LULCC_SST, prescribiéndola de manera constante para cada uno de los pasos de tiempo de la simulación. Finalmente, para la temperatura prescrita en el experimento LULCC_LST, se usó la información del producto MOD11A1 de MODIS, para obtener un contraste de temperatura superficial al medio día y a la media noche entre la zona del cuerpo de agua y las ubicaciones de las estaciones N/I La Estrella, La Parroquia y El Marqués. El contraste obtenido (es decir, la diferencia de temperatura entre celdas de agua y suelo según MODIS) se le sumó a las temperaturas de entrada de ERA5 con la finalidad de generar una serie de temperatura más realista para sobrescribir al cuerpo de agua. Se resalta que se usó la diferencia de temperatura entre celdas de agua y suelo según MODIS, para el 2015 en adelante, para sobrescribir la temperatura de la simulación en un momento en que no había embalse (2013). Esto se realizó con la finalidad de tener un contraste realista entre dichas temperaturas en la simulación, a pesar de que el periodo de validación no sea exactamente el mismo. Adicionalmente, se contó con un dato puntual de una medición de la temperatura del cuerpo de agua que se realizó en el mes de marzo de 2021 entre las 8am y las 10am. Con este dato puntual y con la información de temperatura del aire de las estaciones El Marqués, La Estrella, y La Parroquia, se calculó otro dato de contraste, esta vez para la diferencia de la temperatura superficial del cuerpo de agua y la temperatura del aire en las estaciones. Este contraste para las observaciones in-situ no se usó para sobrescribir una temperatura a las simulaciones.

Los datos de contraste de observaciones y MODIS se usaron como referencia para seleccionar la temperatura más realista de los 5 experimentos. Para poder hacer dicha comparación, se replicó el cálculo de dichos contrastes para los 5 experimentos de temperatura, tomando la temperatura superficial del agua de cada experimento y comparando con la temperatura superficial y la temperatura del aire a 2 m en el sitio de las estaciones El Marqués, La Estrella y La Parroquia para la simulación de control a 1 km (es decir, en el dominio d03; ver Figura 5.1). La comparación se realizó con la temperatura en el sitio de las estaciones en la simulación de control (CTRL) debido a que la temperatura en los sitios de las estaciones es una variable de interés en la simulación con cambio de cobertura (LULCC), para la que se esperaba identificar cambios debido a la ubicación del embalse. Con el contraste de cada experimento se calculó el error de la siguiente manera:

$$Error = \frac{C_s - C_o}{C_o} \quad (5.3)$$

Donde C_s se refiere al contraste en la simulación y C_o se refiere al contraste en las observaciones. Esta forma de calcular el error se empleó para comparar cada uno de los contrastes mencionados a partir de observaciones con el contraste calculado a partir de los datos simulados. Así, se obtuvo un primer *Error* calculando un C_s para el contraste entre la temperatura superficial del embalse en cada uno de los 5 experimentos, y la temperatura superficial de las estaciones mencionadas en CTRL, y comparándolo con el C_o obtenido a partir del producto MODIS, mediante el uso de la ecuación 5.3. Se obtuvo un segundo *Error* utilizando el C_s obtenido a partir del contraste entre la temperatura superficial del embalse en los 5 experimentos y la temperatura del aire a 2 m en el experimento CTRL

para las estaciones mencionadas, y comparándolo con el C_o de las observaciones. Luego, con cada uno de estos errores (el error con respecto a MODIS y el error con respecto a las observaciones) se estimó un error promedio para cada experimento. Este error promedio fue la métrica usada para la selección de la temperatura.

También se usaron datos para la evaporación potencial en las estaciones El Marqués, La Estrella y La Parroquia, para comparar con el flujo de calor latente del cuerpo de agua en las simulaciones, con lo que se identificó que los flujos no varían significativamente entre las simulaciones LULCC_SST, LULCC_LST y LULCC_SST_CTE, y que tampoco difieren de los valores observados en las estaciones (no mostrado).

Tabla 5.6. Experimentos para seleccionar la temperatura superficial del cuerpo de agua

Nombre	Hora de inicio	Temperatura superficial promedio del cuerpo de agua	Ciclo diurno
LULCC_12	2013-01-01 18:00 UTC	29.9 °C	No
LULCC_00	2013-01-01 05:00 UTC	19.97 °C	No
LULCC_SST	2013-01-01 05:00 UTC	27.12°C	Sí
LULCC_LST	2013-01-01 05:00 UTC	25.62°C	Sí
LULCC_SST_CTE	2013-01-01 05:00 UTC	27.12°C	No

5.3. Resultado y análisis

Uno de los resultados de este capítulo es la validación inicial de los experimentos hasta el dominio d03 (1 km de resolución horizontal), empleados para identificar inicialmente el desempeño de WRF y seleccionar la configuración de parametrizaciones más adecuada para los experimentos desarrollados en el dominio d04 (aproximadamente 300 m). Posterior a esta selección, se realizó un experimento con la configuración seleccionada utilizando los 4 dominios, correspondiente al experimento de control (CTRL), realizando su respectiva validación con las observaciones y ERA5. En la Figura 5.3 se puede apreciar la topografía asociada a los dominios d03 y d04 de WRF (paneles a y c, respectivamente). También se puede ver la topografía en el área de los dominios d03 y d04 asociada a ERA5 (paneles b y d, respectivamente). Como se observa, ERA5 representa el dominio d04 con aproximadamente 6 celdas y la ubicación de 4 de las estaciones coincide en la misma celda. También se puede apreciar que no se distingue la topografía en la que es llenado el embalse.

En esta sección también se describe el proceso para seleccionar la temperatura superficial del agua que fue prescrita para el experimento con cambio de cobertura (LULCC). Además, se analizan algunas de las variables del balance de energía, describiendo su comportamiento y estimando las diferencias entre los experimentos LULCC y CTRL, tanto para los campos superficiales en el dominio interno y los lugares específicos de las estaciones N/I, como para secciones en la vertical. Este análisis se desarrolla con la finalidad de identificar si el cambio de cobertura puede representar impactos en el comportamiento vertical de las variables.

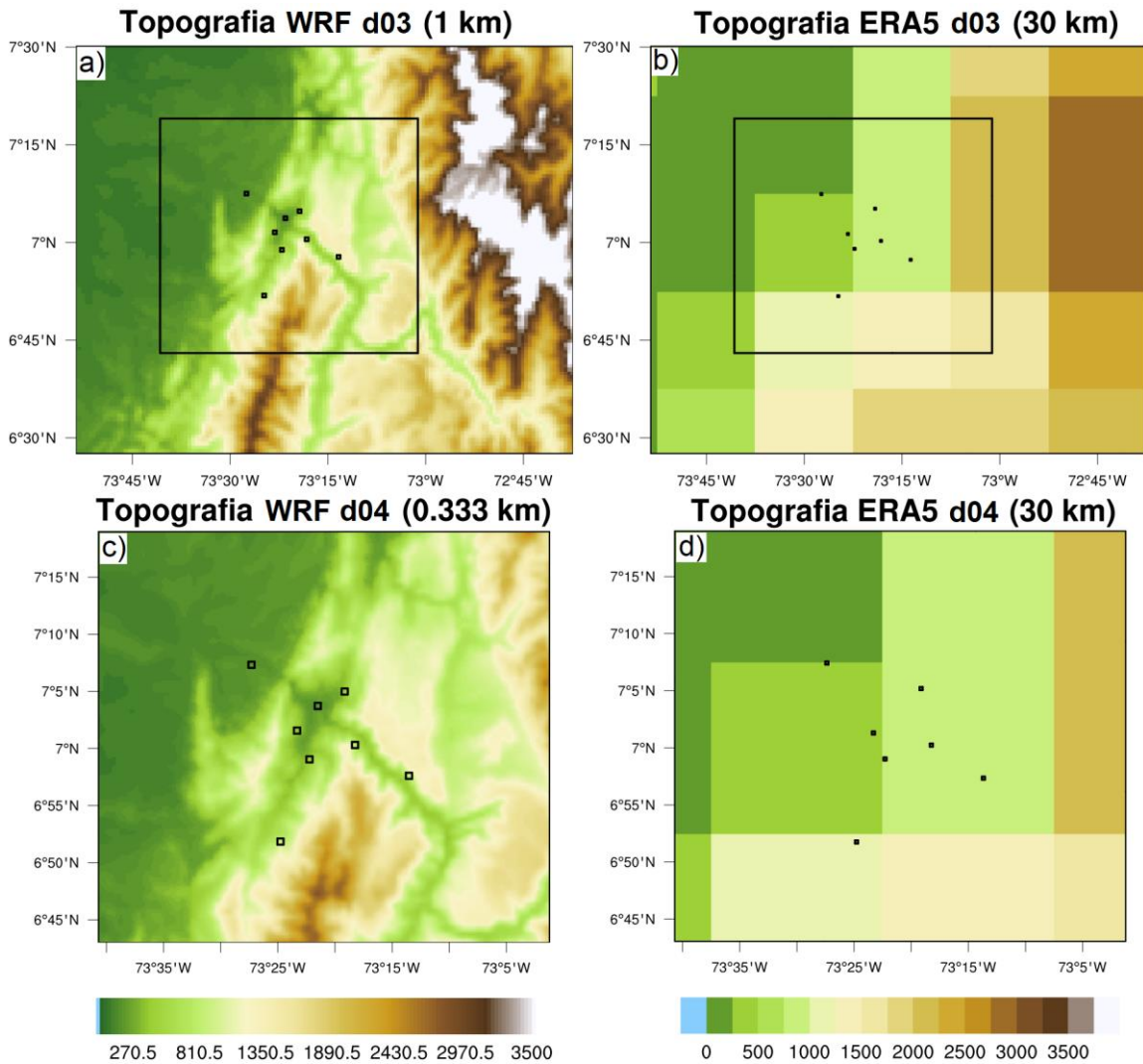


Figura 5.3. Resolución para la topografía de a) dominio d03 de las simulaciones, b) ERA5 en el área del dominio d03 de las simulaciones, c) dominio d04 de las simulaciones y d) ERA5 para el área del dominio d04 de las simulaciones

5.3.1. Validación a 1 km y selección de parametrizaciones físicas

En esta sección se discute la comparación de los resultados de los 8 experimentos de simulación a 1km (d03) (ver Tabla 5.3) con los datos de las estaciones N/I y los datos del reanálisis ERA5. Se consideraron las variables temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, pues son variables de interés en la simulación para las cuales se tienen mediciones in-situ de las estaciones N/I.

En la Figura 5.4 se presenta el ciclo diurno para temperatura a 2m (Figura 5.4a) y humedad relativa a 2m (Figura 5.4b), promediado entre las 7 estaciones para las observaciones de N/I y para los lugares de las 7 estaciones en los diferentes experimentos con WRF y ERA5, con la finalidad de tener identificado el comportamiento de estas variables entre la zona de interés. Es bastante notorio que el ciclo diurno de ERA5 para ambas variables tiene magnitudes que no se ajustan a los valores exhibidos por las observaciones y por WRF. En el caso de la temperatura (Figura 5.4a), los valores de ERA5 son aproximadamente 3°C más bajos que los de las observaciones en el caso de los valores mínimos y aproximadamente 4°C más bajos para los valores máximos, y en general, sus valores no son

similares a los de WRF ni a los de las observaciones. Para la humedad relativa (Figura 5.4b), el comportamiento es inverso: ERA5 presenta valores cercanos a la saturación, aproximadamente 15% más elevados que para las observaciones en el caso de los máximos (noche y mañana), y aproximadamente 20% más elevados para los mínimos (alrededor del mediodía). En este caso, los valores de ERA5 y WRF son similares durante el día para la mayoría de los experimentos.

Para el caso de los experimentos con WRF, todos tienen un comportamiento similar entre ellos, con la excepción de YSU2 y CLM. El grueso de los experimentos WRF sobrestima los valores mínimos de temperatura con respecto a las observaciones y subestima los máximos. Esta subestimación de los valores máximos ha sido reportada en literatura (e.g. Njuki et al., 2022). Esto ocurre a excepción de YSU2, que muestra mínimos similares y máximos sobrestimados, y CLM, que exhibe unos máximos más cercanos a los de las observaciones (Figura 5.4a). En general, los valores medios para WRF están más cerca de las observaciones que los valores de ERA5. Para la humedad relativa, todos los experimentos tienen valores muy similares a las observaciones para los valores mínimos entre medianoche y las 5 am, con excepción de YSU2, que tiene valores más elevados y se acerca más a los valores exhibidos por ERA5 (Figura 5.4b). Durante el día, los valores de WRF se parecen más a los valores de ERA5 y están aproximadamente 20% por encima de los valores de las observaciones, nuevamente con excepción de YSU2, cuyos valores son menores y se encuentran más cerca de las observaciones. En general, para la humedad relativa, WRF tiene valores similares a las observaciones para la madrugada, pero en el resto del día tiene valores mayores que las observaciones. Para esta variable, los valores de WRF son también más cercanos a los reales que los de ERA5.

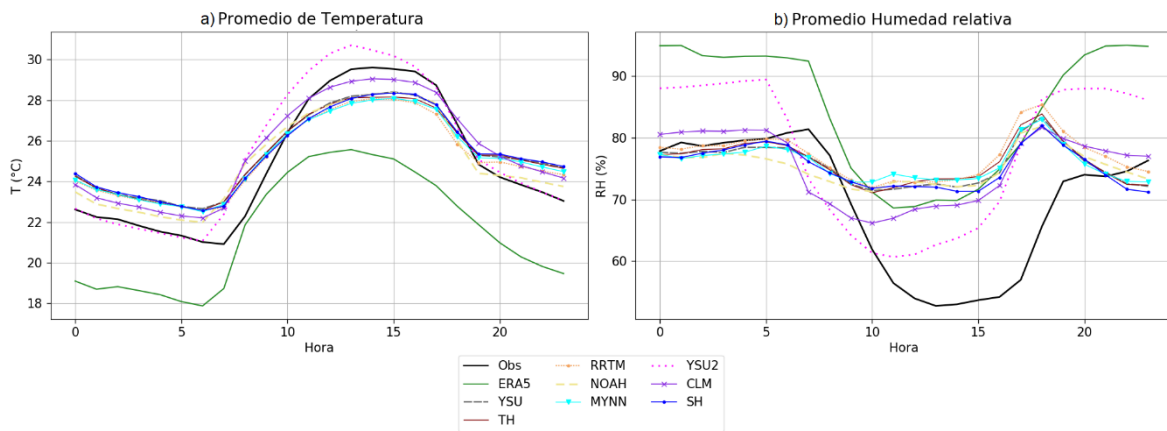


Figura 5.4. Ciclos diurno promedio para a) temperatura y b) humedad relativa para las observaciones, los 8 experimentos de validación en d03 y ERA5

En la Figura 5.5 se presentan los ciclos diurnos de temperatura para las diferentes estaciones N/I para las observaciones, ERA5, y dos experimentos: YSU2 y SH. Como se puede ver en la Figura 5.5a), las observaciones describen una variedad de ciclos diurnos con diferentes magnitudes asociadas a la ubicación altitudinal de las estaciones. Para el caso de ERA5, debido a su resolución espacial (ver Figura 5.3), varias de las estaciones quedan ubicadas en una misma celda del producto, con lo que se pierde heterogeneidad entre las estaciones, por lo que, como se puede ver, solo se diferencian los ciclos para las estaciones Cedral, y Guaimaral y Marqués. Para los experimentos YSU2 y SH se puede identificar una mayor diferencia entre los ciclos diurnos de las estaciones. El experimento SH (Figura 5.5d) presenta una dispersión espacial entre las estaciones que se asemeja más a las diferencias entre

las observaciones (Figura 5.5a), donde El Placer y Villa Mónica exhiben valores más bajos y alejados del promedio, mientras que los valores para Cedral son los más elevados. Para YSU2, aunque hay dispersión y el rango diurno promedio está mejor representado, los valores son muy similares entre estaciones (razón por la cual el rango diurno tiene mejor representación), y difieren en mayor medida a las diferencias entre estaciones que se aprecian en las observaciones. Esto es similar para CLM (no mostrado), lo que es consistente con la Figura 5.4, ya que CLM presenta un ciclo con valores extremos más cercanos a los de las observaciones.

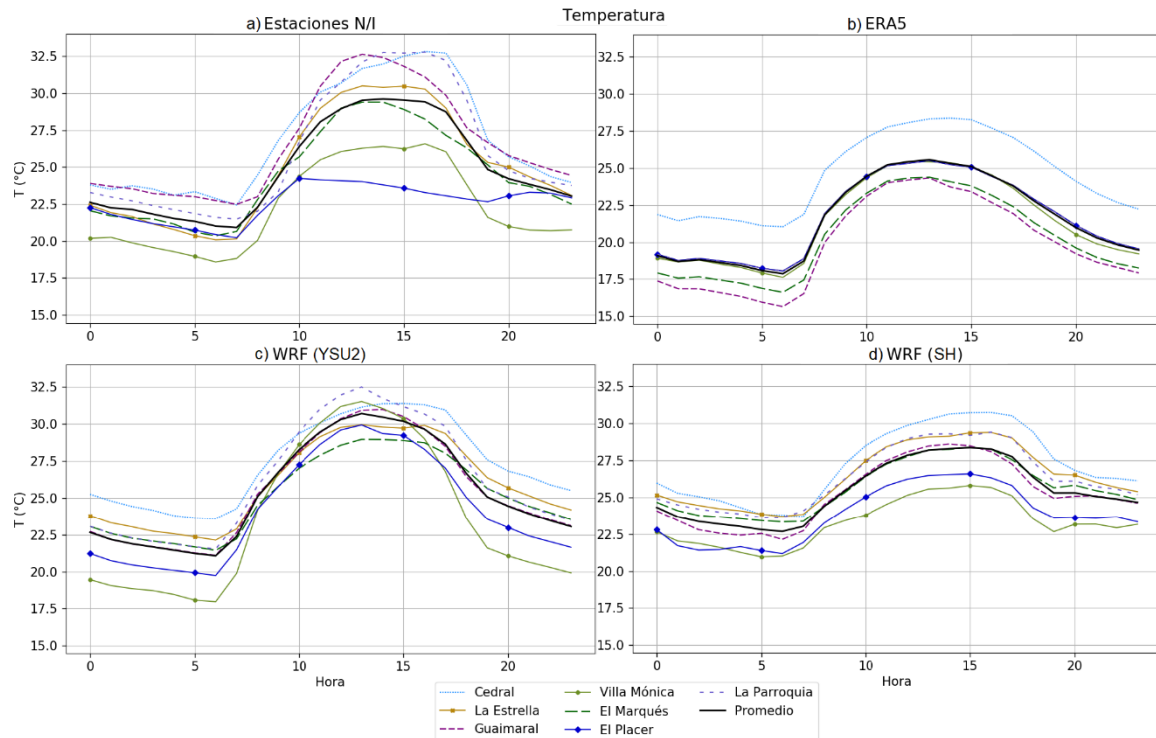


Figura 5.5. Ciclo diurno de temperatura para cada una de las estaciones N/I por base de datos. a) Observaciones in-situ N/I. b) ERA5. c) Experimento YSU2. d) Experimento SH

En la Figura 5.6 se presentan los ciclos diurnos para la humedad relativa. En este caso, es mucho más notoria la falta de dispersión espacial para los datos del reanálisis ERA5 (Figura 5.6b). También es posible apreciar que la dispersión en los experimentos SH y YSU2 (Figura 5.6d y Figura 5.6c, respectivamente) es similar, habiendo más dispersión entre los ciclos diurnos de los lugares de las estaciones en SH, lo que para algunos momentos del día hace que la dispersión sea más similar con las observaciones para este experimento, e.g. durante el día los valores para las estaciones El Placer y Villa Mónica son los más elevados en las observaciones, lo que también ocurre en SH. También, las estaciones Guaimaral y Cedral tienen los picos más bajos en las observaciones, lo que es reproducido por el experimento SH. Por otra parte, el experimento SH presenta un máximo en Villa Mónica que no está en las observaciones aproximadamente a las 9 am. Como se puede ver al comparar los paneles a, c y d de la Figura 5.6, el experimento YSU2 reproduce mejor la magnitud del ciclo diurno, pero similar a lo ocurrido con la temperatura (ver Figura 5.5), la dispersión entre las estaciones no es tan grande como en las observaciones.

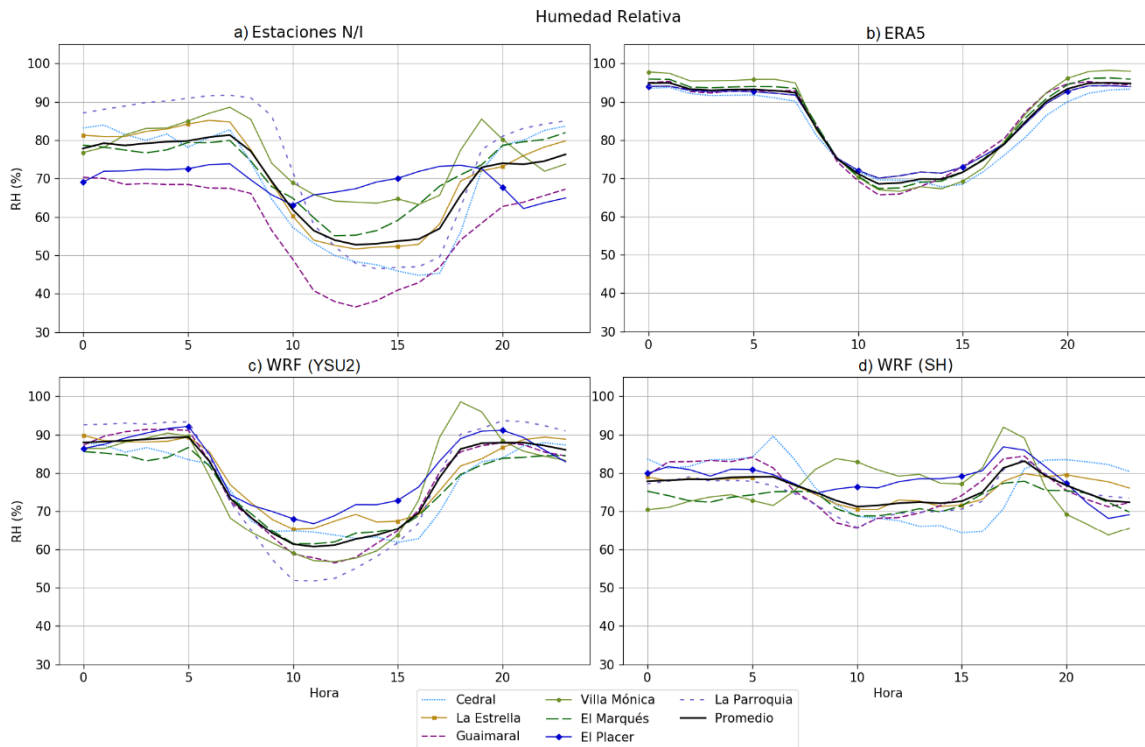


Figura 5.6. Ciclo diario de humedad relativa para cada una de las estaciones N/I por base de datos. a) Observaciones in-situ N/I. b) ERA5. c) Experimento YSU2. d) Experimento SH

En el caso de los vientos, como los ciclos diarios entre las diferentes estaciones no presentan el mismo comportamiento a lo largo del día, no se realiza el promedio entre estaciones. La Figura 5.7 presenta el ciclo diario de velocidad del viento para algunas de las estaciones. Se puede observar que ERA5 no está en fase con los vientos representados en las observaciones y tiene los máximos más tarde en el día para los casos de las estaciones La Estrella, El Marqués Y Guaimaral (Figura 5.7a, b y d). Para la estación La Parroquia (Figura 5.7c) se tiene que las observaciones presentan dos picos máximos, los cuales se sugieren en ERA5 pero para momentos del día anteriores a los picos mostrados por las observaciones. Se debe mencionar también que los valores de ERA5, a pesar de tener los picos desfasados, son similares a los de las observaciones, especialmente en las estaciones La Parroquia (ver Figura 5.7c) y Guaimaral (ver Figura 5.7d). Para el caso de los experimentos con WRF, el comportamiento durante el día se encuentra mejor representado y los picos en la velocidad del viento se exhiben durante las mismas horas que en las observaciones, especialmente para La Parroquia (ver Figura 5.7c) y Guaimaral (ver Figura 5.7d). En estas mismas estaciones es donde se identifica una mayor sobrestimación por parte de los experimentos WRF con respecto a las observaciones. Específicamente en la estación Guaimaral (Figura 5.7d), se identifica una división en el comportamiento de los experimentos identificando que los experimentos SH, RRTM y TH no tienen valores tan altos en el momento del pico máximo del viento como los demás experimentos. Esto es importante porque en estos tres experimentos se usa SH como esquema de PBL y NOAHMP como LSM. En general, el comportamiento de los experimentos está más mezclado en el resto de estaciones, pero todos sobrestiman la velocidad con respecto a las observaciones, comportamiento que, además, está reportado en la literatura (e.g. Jimenez et al., 2012; Henao et al., 2020; Njuki et al., 2022).

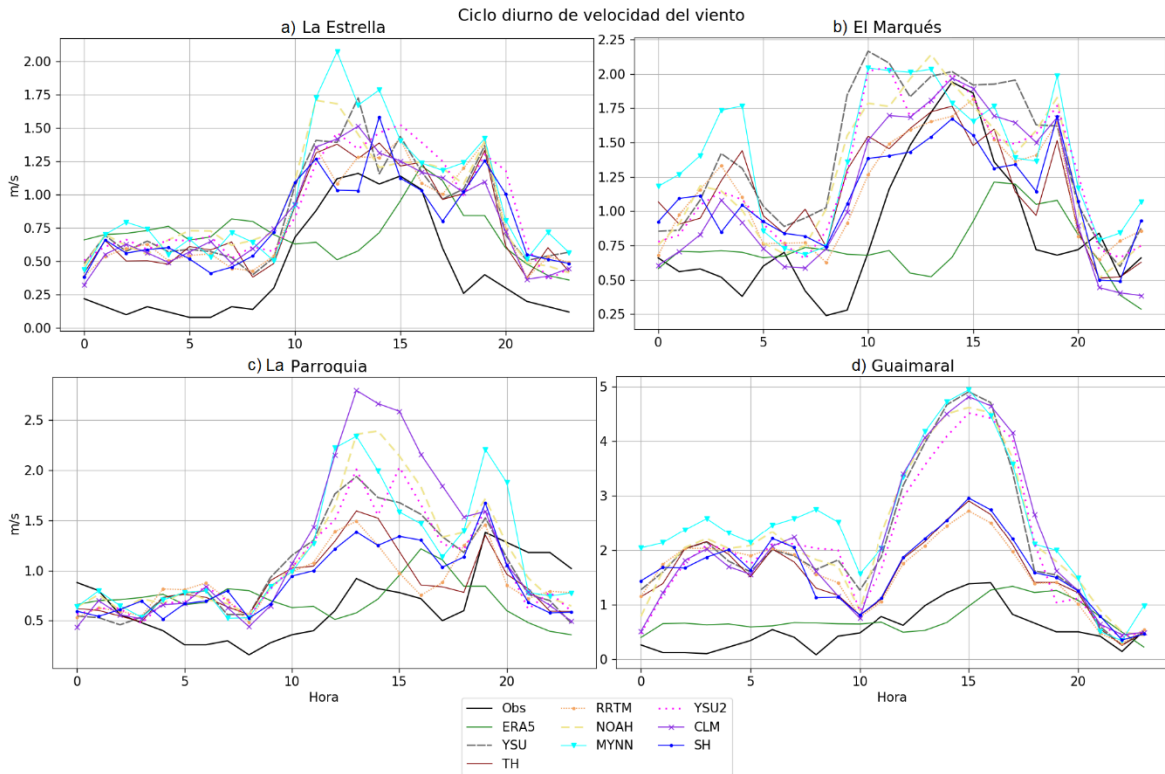


Figura 5.7. Ciclo diario de velocidad del viento para 4 estaciones N/I. a) La Estrella. b) El Marqués. c) La Parroquia. d) Guaimaral

La Tabla 5.7 presenta los estadísticos de error “*Mean Bias Error*” (MBE) para la temperatura y la humedad relativa, y el “*Root Mean Square Error*” (RMSE) para la velocidad del viento (similar a lo reportado por Henao et al. (2020)) con respecto a las observaciones, para cada uno de los experimentos y ERA5. Los estadísticos se presentan para cada una de las estaciones N/I así como el promedio entre estaciones. Como se puede ver, ERA5 obtiene los errores promedio más grandes para las variables temperatura y humedad relativa, lo cual era esperado según el comportamiento de los ciclos medios diarios (ver Figura 5.4 a y b). Por otra parte, el error promedio para la velocidad de los vientos es el más bajo, pero como se mencionó, esta base de datos no está en fase con las observaciones. Para las simulaciones WRF, el MBE promedio de la temperatura sugiere que el experimento con el error más bajo de todos es NOAH, lo cual se puede deber a que, en general, este esquema produce temperaturas más altas, pero tiene menos detalle en los procesos que el esquema Noah_MP (Niu et al., 2011). Los experimentos RRTM, MYNN y SH presentan errores de mayor magnitud que el experimento NOAH. Para los experimentos YSU2 y CLM, que resaltaban en las comparaciones anteriores, se puede ver que tienen los errores promedio más altos entre el grupo de experimentos, puesto que, como se mencionó, no tienen una buena dispersión espacial, con lo que la temperatura de cada estación no está bien representada. Para la humedad relativa, los errores más bajos son los de los experimentos SH, NOAH y CLM, mientras que los errores más altos son para RRTM y YSU2. En el caso de los vientos, el error más bajo lo tiene SH, seguido de RRTM y TH. Finalmente, debido a que el experimento SH tiene los errores más bajos y que los esquemas de RRTM y NOAH no representan mejoras significativas en cuanto a humedad relativa y velocidad del viento, se seleccionó la configuración del experimento SH, presentada en la Tabla 5.4. Adicionalmente, el esquema SH tiene una buena representación de la capa límite comparado con otros esquemas (Henao et al., 2020).

Tabla 5.7. Estadísticos de error para los 8 experimentos de simulación para el dominio d03 y los datos de ERA5 con respecto a las observaciones

	SH	TH	RRTM	NOAH	MYNN	YSU	YSU2	CLM	ERA5
MBE de Temperatura (°C)									
Cedral	0,37	0,25	-0,01	0,33	0,12	0,32	0,47	0,99	-2,34
Estrella	1,42	1,25	1,14	1,12	1,29	1,44	1,00	1,67	-3,35
Guaimaral	-1,35	-1,31	-1,55	-1,24	-1,46	-1,28	-1,04	-0,70	-6,70
Monica	0,96	1,02	0,80	0,35	0,87	0,96	1,41	-0,49	-0,84
Marques	0,73	0,84	0,68	0,32	0,61	0,84	0,36	0,77	-4,23
Placer	1,09	1,19	1,01	0,55	1,00	1,19	1,62	1,57	-0,94
Parroquia	0,21	0,20	-0,04	-0,33	0,00	0,23	0,20	0,87	-4,41
Suma	3,44	3,43	2,03	1,10	2,43	3,71	4,01	4,68	-22,81
Promedio	0,49	0,49	0,29	0,16	0,35	0,53	0,57	0,67	-3,26
MBE de Humedad Relativa (%)									
Cedral	8,69	9,20	10,86	5,27	9,76	8,11	7,99	4,68	14,86
Estrella	4,84	6,23	6,68	4,74	5,00	4,99	8,72	4,34	14,32
Guaimaral	17,22	18,87	19,40	16,57	18,88	18,48	19,90	14,76	27,36
Monica	0,74	0,57	2,09	2,78	0,28	1,38	2,17	7,24	10,23
Marques	3,07	4,00	4,68	4,38	4,27	3,77	6,82	3,36	14,64
Placer	8,64	9,06	9,47	9,10	8,81	8,94	11,77	7,73	15,44
Parroquia	-0,88	0,08	1,11	-0,31	0,27	-0,15	3,23	2,18	10,26
Suma	42,32	48,01	54,30	42,54	47,26	45,52	60,61	44,30	107,12
Promedio	6,05	6,86	7,76	6,08	6,75	6,50	8,66	6,33	15,30
RMSE de Viento (m/s)									
Cedral	0,97	1,15	1,04	1,57	1,40	1,23	1,25	1,00	0,58
Estrella	0,53	0,51	0,52	0,62	0,70	0,60	0,61	0,54	0,56
Guaimaral	1,33	1,29	1,30	2,05	2,29	2,01	1,90	2,02	0,51
Monica	0,78	0,85	0,84	0,90	1,25	1,19	0,99	0,58	0,51
Marques	0,67	0,67	0,59	0,75	0,95	0,93	0,76	0,64	0,59
Placer	1,33	1,44	1,40	1,49	1,70	1,69	1,48	1,43	1,78
Parroquia	0,61	0,59	0,61	0,87	0,89	0,79	0,77	1,04	0,56
Suma	6,23	6,50	6,30	8,25	9,18	8,43	7,75	7,25	5,09
Promedio	0,89	0,93	0,90	1,18	1,31	1,20	1,11	1,04	0,73

5.3.2. Validación de simulaciones a 300m

Con la configuración seleccionada (ver Tabla 5.4), se realizó la simulación con los cuatro dominios, que incluye el dominio d04 (aproximadamente 300 m) y que fue el experimento de control (CTRL) para la comparación con el experimento que tiene el cambio de cobertura (LULCC). Se recuerda que para esta simulación, se seleccionaron 11 días despejados y que el primero de ellos se consideró como “*spin-up*” del modelo, con lo que se contó con simulaciones para 10 días. A continuación, se presenta la validación de la simulación CTRL y los datos de ERA5 con respecto a las observaciones.

En la Figura 5.8 se presenta el promedio de las observaciones para las estaciones meteorológicas, el promedio entre las celdas para la ubicación de las estaciones en ERA5, y el promedio para 9 celdas alrededor de la ubicación de las estaciones para las simulaciones WRF, es decir, el promedio para un recuadro de 1 km de lado centrado en la ubicación de la estación (ver Figura 5.3c y d para comparar la resolución de ERA5 y la simulación WRF para el dominio d04). Se presentan resultados para la temperatura y la humedad relativa, tanto de los 10 días simulados como para el promedio del ciclo diurno de esos 10 días. Nuevamente se puede observar que ERA5 subestima los valores de temperatura en cada uno de los días (ver Figura 5.8a y c). Para el caso de WRF, se puede observar que a medida que pasan los días simulados, la temperatura máxima de la simulación CTRL se acerca más a la temperatura máxima observada. Para la temperatura mínima ocurre lo contrario, pues en las observaciones disminuye mientras que en CTRL aumenta. Se destaca que en las observaciones se identifica un aumento gradual de la temperatura máxima con el paso de los días que también es representado por el modelo. Este aumento gradual de la temperatura se puede deber precisamente a la selección de los días despejados, para los que se tiene una disminución en la humedad de los suelos,

lo que disminuye los flujos de calor latente y permite un aumento en los flujos de calor sensible que se ve reflejado en la temperatura del aire cerca de la superficie. Esto también se puede observar en la humedad relativa (Figura 5.8b), pues se encuentra que con el paso de los días, disminuyen los valores observados de esta variable. ERA5 nuevamente sobrestima los valores máximos de humedad relativa, mientras que WRF, con el paso de los días, representa mejor los valores máximos. El experimento CTRL también mejora su representación de los valores mínimos para esta variable con el paso de los días, y para los últimos tres días de la simulación presenta un ciclo diurno más similar al de las observaciones, aunque sobrestimando los valores mínimos. Para el caso de los ciclos diurnos promedio (Figura 5.8c y d) se ve que las temperaturas son mucho más frías y en consecuencia, los valores de humedad relativa son más elevados (Figura 5.8d). Para la temperatura de WRF, se encuentra un rango de valores con mayor similitud con las observaciones, y se identifica la subestimación con respecto a los máximos y la sobrestimación con respecto a los mínimos, lo que significa un rango de temperatura más pequeño en el caso del modelo comparado con las observaciones. Para la humedad relativa (ver Figura 5.8d) se observa que WRF tiene valores similares a las observaciones entre la media noche y aproximadamente las 6 de la mañana, es decir, en los momentos de humedad relativa máxima. Durante el día, los valores no descienden tanto como en las observaciones, presentando valores de aproximadamente 65% de humedad relativa durante el día, mientras que las observaciones descienden hasta 50%. En este caso, el comportamiento de la humedad relativa durante el día según ERA5 es más similar a las observaciones, a pesar de tener valores mucho más altos que las observaciones. Así, en general para estas dos variables, WRF representa una mejora en los valores medios con respecto a lo que es representado por ERA5, además de representar una mejora en la distribución espacial de los valores, como se expuso en la sección anterior. Por su parte, ERA5 presenta un mejor comportamiento de las variables humedad relativa y temperatura durante el día.

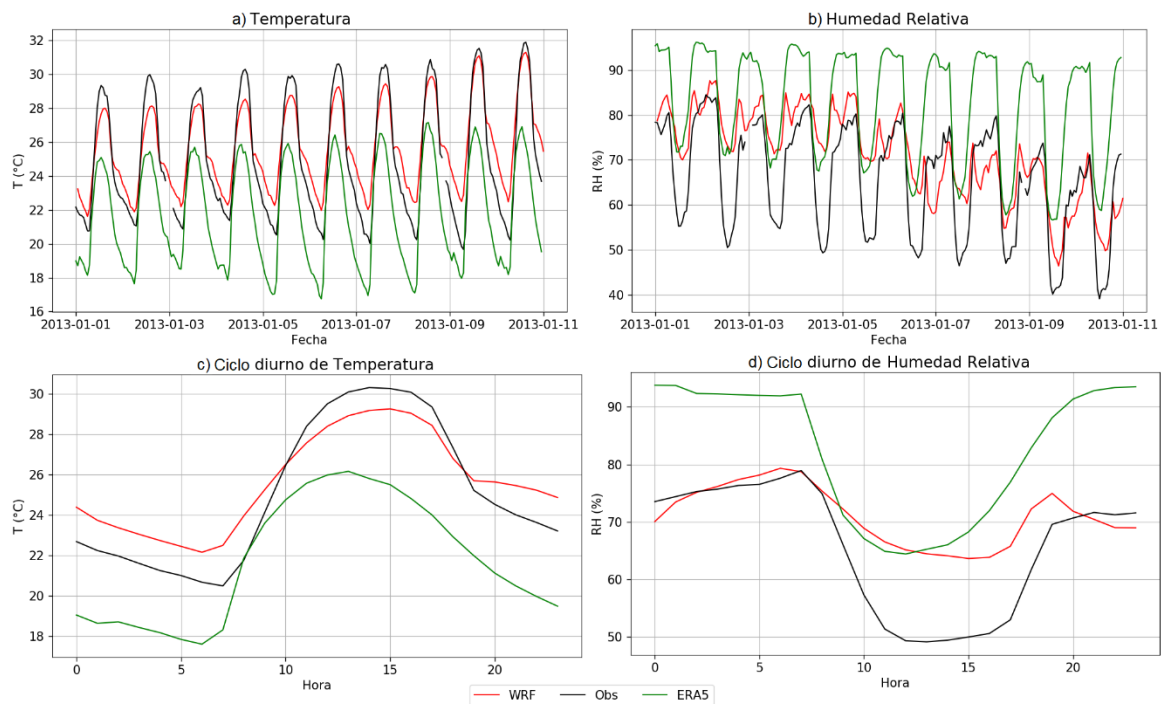


Figura 5.8. Series de tiempo y ciclos diurnos para las variables temperatura y humedad relativa sobre todas las estaciones meteorológicas según las observaciones (líneas negras), ERA5 (líneas verdes) y promedios para 9 celdas de la simulación WRF en el dominio d04 (líneas rojas). a) Serie para temperatura. b) Serie para humedad relativa. c) Ciclo diurno de temperatura. d) Ciclo diurno de humedad relativa

La Figura 5.9 presenta la rosa de vientos con el promedio durante los 10 días simulados de las observaciones (columna ISAGEN N/I) y las simulaciones (columna WRF-CTRL) para bloques de 6 horas que representan 4 momentos del día (similar a sección 3.3.3 de vientos en cap 3). Estos bloques son: Madrugada (entre la medianoche y las 6 am), Mañana (entre 6am y 12pm), Tarde (entre 12pm y 6pm) y Noche (entre 6pm y medianoche).

Para el bloque Madrugada se puede identificar la sobrestimación de la velocidad del viento en las simulaciones WRF, similar a lo discutido en la sección anterior. Además, con respecto a las direcciones del viento, se tiene que las estaciones El Placer, El Marqués, La Estrella y Cedral presentan variaciones con respecto a la dirección desde la que vienen los vientos en las observaciones. En El Placer y El Marqués, las observaciones sugieren una dirección sureste mientras que WRF sugiere los vientos completamente desde el sur. En La Estrella, las observaciones sugieren una dirección desde el noroeste y WRF desde el suroeste. En Cedral, las observaciones indican una dirección desde el suroeste y WRF desde el sureste. Para el resto de las estaciones, se tiene una coincidencia en el cuadrante del que proviene el viento entre observaciones y WRF, con pequeñas diferencias.

Para el bloque Mañana también se identifica la sobrestimación generalizada en todas las estaciones. Para las estaciones Cedral, La Parroquia y Villa Mónica se identifican variaciones en las direcciones. En Cedral, las observaciones indican una dirección desde el suroeste, mientras que WRF tiene algunas variaciones en la dirección, aunque predomina la dirección desde el noroeste. En La Parroquia, las observaciones sugieren que los vientos fluyen desde el sureste mientras que en WRF la dirección que predomina es desde el oeste. El caso de esta estación es importante, puesto que la dirección de los vientos en el modelo es desde el cuerpo de agua hacia la estación, mientras que en las observaciones no ocurre lo mismo. Para Villa Mónica, las observaciones indican vientos desde el sur y el sureste, mientras que en WRF, aunque se observa esta dirección durante algunas horas del bloque, la dirección que predomina es desde el noroeste. En el resto de las estaciones también se tienen varias direcciones, pero la dirección predominante concuerda, al menos en el cuadrante, con la dirección que sugieren las observaciones. Se destaca también que para El Marqués, WRF indica que los vientos fluyen desde el embalse hacia la estación durante algunas horas del bloque, mientras que esto no se identifica en las observaciones.

En el bloque Tarde también se observan sobrestimaciones en la velocidad del viento. Para la dirección se tienen diferencias en Cedral, Villa Mónica, El Marqués, Guaimaral y El Placer. En Cedral, las observaciones indican vientos desde el suroeste, mientras que en WRF son del noroeste. En Villa Mónica, las observaciones sugieren vientos del sureste y WRF sugiere vientos del noroeste. En el caso de El Marqués, las observaciones indican vientos desde el sur, mientras que en el modelo tienen una variedad de direcciones entre las que se encuentran vientos que vienen del cuerpo de agua, por lo que esta diferencia también es importante, pues en las observaciones no se registran vientos desde el cuerpo de agua hacia la estación. En Guaimaral, las observaciones indican vientos desde el sureste y WRF desde el oeste. En El Placer, las observaciones sugieren que la dirección es desde el oeste y WRF desde el noroeste.

En el bloque Noche también se identifica una sobrestimación de la velocidad. En cuanto a las direcciones, se tienen diferencias en las estaciones Cedral, La Estrella y Villa Mónica. En Cedral, las observaciones indican vientos desde el suroeste, mientras que WRF indica vientos del sureste. En La Estrella, las observaciones sugieren que la dirección es desde el noroeste, mientras que WRF indica vientos del suroeste. En Villa Mónica, las observaciones indican que los vientos son del sur y WRF

sugiere que la dirección es desde el sureste. Para el resto de las estaciones, hay algunas diferencias, pero en general se conserva el cuadrante desde el que fluye el viento.

Así, Cedral es la estación con mayores errores en cuanto a la dirección del viento, pues WRF presenta dificultades para la representación de esta variable en cada uno de los bloques del día analizados, seguido por Villa Mónica, que tiene los mayores errores en tres momentos: Mañana, Tarde y Noche. Esto es importante, pues estas dos estaciones son las más alejadas del cambio en cobertura que se introduce en la simulación, lo que indica una mejor representación de la dirección del viento en las estaciones más cercanas al cuerpo de agua. Aun así, los bloques Mañana y Tarde presentan un error en la dirección del viento para las estaciones La Parroquia y El Marqués, para las que se simulan vientos desde el embalse que no capturan las observaciones.

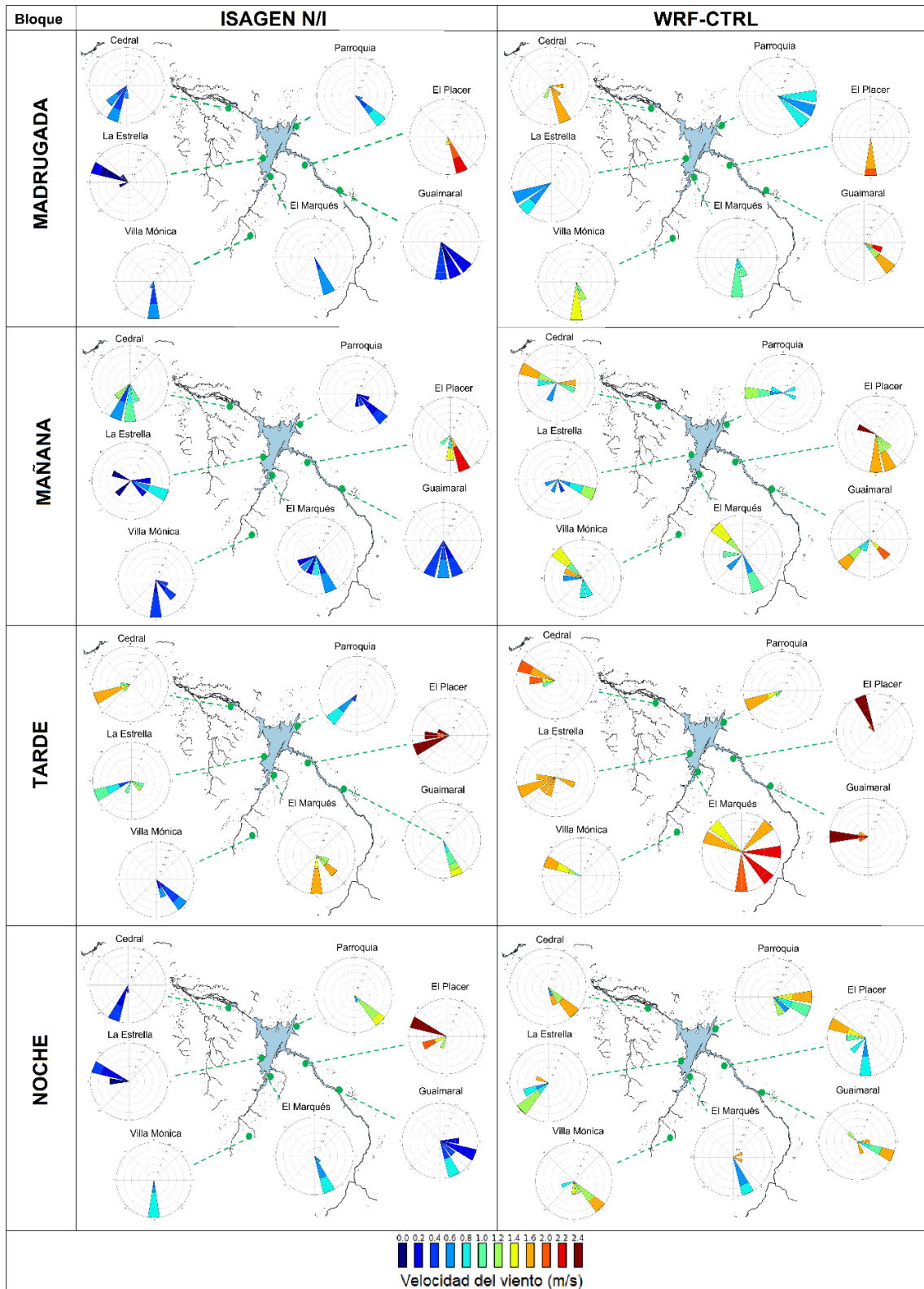


Figura 5.9. Rosas de vientos durante los días simulados para las estaciones N/I y para las simulaciones WRF para diferentes momentos del día, separados en bloques de 6 horas: medianoche-6am (bloque Madrugada), 6am-medioidía (bloque Mañana), mediodía-6pm (bloque Tarde), y 6pm-medianoche (bloque Noche)

5.3.3. Selección de temperatura para el cuerpo de agua

En la Figura 5.10 se presenta la temperatura superficial del cuerpo de agua para los 5 experimentos y se compara con la temperatura a 2 metros (paneles a, b y c) y la temperatura superficial (paneles d, e y f) para las estaciones La Estrella, El Marqués y La Parroquia, que son las más cercanas al embalse. Se debe recordar que la temperatura a 2 metros analizada corresponde al experimento CTRL, pues para esta variable se espera variación en la simulación con cambio de cobertura. Como se puede ver, la temperatura para el experimento LULCC_12 es muy cálida y supera la temperatura máxima para las estaciones N/I. Por otra parte, el experimento LULCC_00 es demasiado frío y tiene valores 3°C por debajo de la temperatura mínima para las estaciones N/I. El experimento LULCC_SST es el más cercano a las temperaturas observadas durante el día en las estaciones. Este experimento tiene valores similares a El Marqués en el rango temporal de 12 pm a 5 pm (ver Figura 5.10b). En este mismo rango temporal, esta simulación está entre 1 y 1.5°C por debajo de las temperaturas observadas en La Estrella y La Parroquia (ver Figura 5.10a y b). La temperatura media para este experimento es en promedio 1°C más elevada que la temperatura de las estaciones. Por otra parte, el experimento LULCC_LST tiene mayor similitud con las temperaturas durante la noche y la madrugada para las estaciones N/I usadas en el análisis. Para el rango temporal entre medianoche y 6 am, este experimento tiene valores aproximadamente 0.5°C más elevados que la temperatura a 2 m en las estaciones La Estrella y La Parroquia, mientras que es aproximadamente 1°C más caliente en comparación con El Marqués. La temperatura media para LULCC_LST es aproximadamente 0.6°C más baja que la de las estaciones. Finalmente, el experimento LULCC_SST_CTE tiene la misma diferencia media que LULCC_SST con las estaciones y está más cerca de las temperaturas de las estaciones durante el día y la noche.

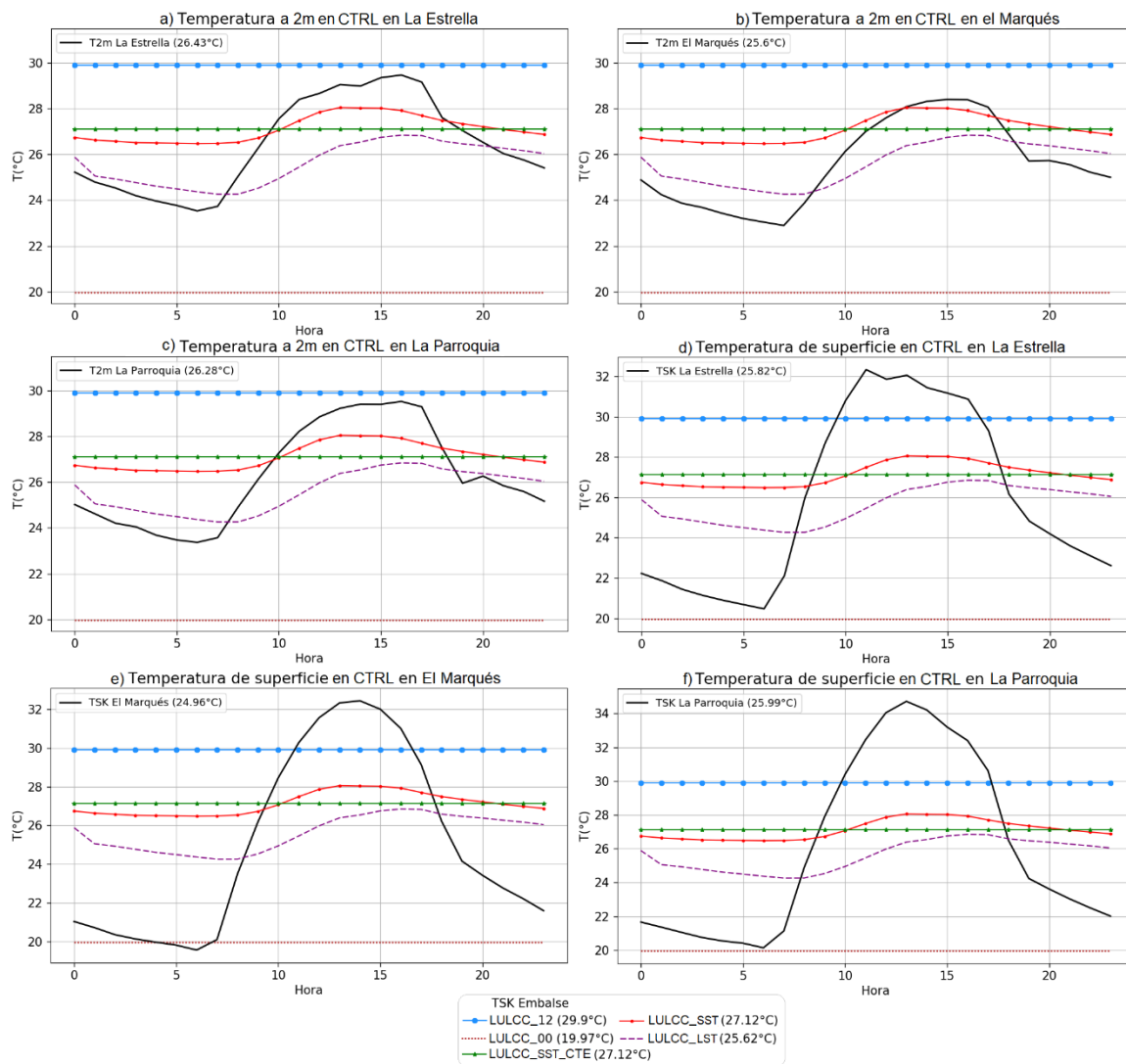


Figura 5.10. Temperatura a 2 metros en las estaciones a) La Estrella, b) El Marqués y c) La Parroquia. En todas las figuras se presenta la temperatura de superficie sobre el embalse para los 5 experimentos

Al comparar ambas temperaturas superficiales, el experimento LULCC_12 no sobrepasa los máximos de la temperatura en las estaciones, pero tiene una diferencia de aproximadamente 10°C con el mínimo de temperatura superficial de cada una de las estaciones. De la misma manera, LULCC_00 está 12°C por debajo de las temperaturas del día exhibidas por las estaciones La Estrella y El Marqués (ver Figura 5.10d e), y 14°C por debajo de la máxima temperatura de superficie de la estación La Parroquia (ver Figura 5.10f). Así, los experimentos LULCC_00 y LULCC_12 presentan una diferencia alta tanto con la temperatura de superficie como con la temperatura a 2m en las estaciones N/I analizadas, por lo que cualquiera de estas dos temperaturas para el cuerpo de agua no sería realista. Los experimentos LULCC_SST y LULCC_SST_CTE tienen una diferencia con la temperatura media de las estaciones en promedio de 1.53°C . El experimento LULCC_LST tiene una diferencia promedio de 0.4°C con las estaciones.

Además, como se mencionó en la sección 5.2 de Datos y Metodología de este capítulo, se analizaron dos contrastes entre la temperatura de las estaciones y la temperatura para el cuerpo de agua. El primer contraste fue obtenido del producto MOD11A1 de MODIS y corresponde a la diferencia entre la

temperatura superficial del cuerpo de agua y la temperatura superficial de las estaciones, específicamente para el mediodía, en condiciones con embalse. Este contraste es de aproximadamente 2.93°C. Por otra parte, mediante observaciones se tiene un contraste puntual entre la temperatura superficial del cuerpo de agua y la temperatura del aire a 2 metros en las estaciones de 3.13°C. En la Tabla 5.8 se observan los resultados de la métrica del promedio entre los errores de la simulación con respecto al contraste de MODIS y con respecto al contraste de las observaciones promediadas, calculados de la manera en que se explicó en la sección 5.2 (no se incluyen los experimentos LULCC_00 y LULCC_12 por ser poco realistas). Este error toma en cuenta que los contrastes sean similares a los de las observaciones, con lo que un puntaje más cercano a 0 significa contrastes más similares (i.e. un contraste más realista). Así, con base en este puntaje, se seleccionó la temperatura superficial del experimento LULCC_SST como la temperatura para el cuerpo de agua en los experimentos de alta resolución (dominio d04). Además, como se mencionó, se realizó una comparación de los flujos de calor latente entre los experimentos, y a pesar de las diferencias en el contraste de temperatura (ver Tabla 5.8), este flujo en los experimentos LULCC_SST, LULCC_LST y LULCC_CTE no varía significativamente a lo largo del día, con las diferencias más notorias en la tarde, para las que el experimento LULCC_SST presenta valores más altos (no mostrado).

Tabla 5.8. Puntaje para el contraste entre la temperatura a 2 metros y la temperatura de superficie en las estaciones, con respecto a la temperatura de superficie del embalse, para los experimentos considerados

Experimento	LULCC_SST	LULCC_LST	LULCC_SST_CTE
puntaje	-0,058	0,304	0,123

5.4. Discusión y conclusiones

Los modelos de área limitada son una herramienta ampliamente usada para la investigación de casos que son difíciles de monitorear en la vida real. A pesar de esto, se deben usar con cuidado, pues una adecuada representación de la realidad depende de que la resolución y las parametrizaciones físicas usadas tengan una buena representación del área de estudio (e.g. Chow et al., 2013), por lo que antes de realizar un experimento, se deberían probar diferentes configuraciones con la finalidad de encontrar la más adecuada para el caso de estudio particular.

En este capítulo se probaron diferentes parametrizaciones para la capa límite, la microfísica de nubes, la superficie terrestre y la radiación (ver Tabla 5.3) para realizar simulaciones de alta resolución en la región de influencia del embalse Topocoro. En particular, se desarrollaron simulaciones anidadas para dominios de 9 km, 3 km y 1km bajo diversas configuraciones del modelo WRF. No se encontraron grandes diferencias en el comportamiento de las variables temperatura y humedad relativa entre las diferentes configuraciones, con excepción de las simulaciones que usan el modelo de superficie CLM y el esquema de capa límite YSU con una opción diferente de “*Surface layer*”. Estas dos configuraciones se destacan por representar un ciclo diurno con una amplitud más similar a la de las observaciones, pero se identificó que la dispersión espacial para los valores entre las diferentes localizaciones de las estaciones N/I no es satisfactoria, lo que es importante para esta investigación.

La temperatura y humedad relativa presentan un sesgo similar con respecto a los datos de las estaciones N/I empleados para la validación. En el caso de la temperatura, todos los experimentos (con la excepción de CLM y YSU2) presentan una sobrestimación con respecto a los datos de observaciones para la noche y la madrugada, mientras que durante el día se tiene una subestimación. Para el experimento SH, que corresponde a la configuración seleccionada para el desarrollo de

simulaciones de alta resolución a aproximadamente 300 m, este comportamiento representa un sesgo medio de temperatura de 0.49°C en promedio para todas las estaciones. Para la humedad relativa, todos los experimentos tienen valores similares a las observaciones durante la madrugada, mientras que durante el día y la noche se tiene una sobrestimación. Para el experimento SH se tiene un sesgo medio de humedad relativa de 6.05% para el promedio sobre las estaciones. Particularmente, no se encuentran diferencias significativas en la temperatura y la humedad relativa al comparar los resultados de los diferentes experimentos que usan diferentes parametrizaciones de PBL (SH, YSU, MYNN), lo que indicaría que estas variables no son muy sensibles a las variaciones en la parametrización de la capa límite, lo cual también ha sido identificado en estudios como Henao et al. 2020 y Njuki et al., 2022.

En general, para las variables temperatura y humedad relativa, WRF mejora considerablemente el comportamiento con respecto a ERA5, lo cual era esperado dada la gran diferencia de resolución en el área de estudio (aproximadamente 300 m en WRF vs 30 km en ERA5) (ver Figura 5.3). WRF no solo representa de mejor manera la espacialidad de las estaciones, y así los diferentes valores medios para diferentes zonas del área de estudio, sino que también mejora los valores medios con respecto a las observaciones.

Para los vientos, es ampliamente identificado por otros estudios que WRF tiende a sobrestimar la velocidad del viento con respecto a las observaciones (e.g. Jimenez et al., 2012; Henao et al., 2020; Njuki et al., 2022). En este estudio, los experimentos que usan el esquema de capa límite SH tienen una menor sobrestimación de la velocidad del viento. El error cuadrático medio de los experimentos con este esquema (SH, TH, RRTM) es menor a 1 m/s, mientras que para el resto de los esquemas de capa límite utilizados, este error supera 1m/s. En general, todas las configuraciones usadas tienen una buena representación del ciclo diurno de los vientos con respecto a las estaciones N/I.

En particular, al realizar el experimento de alta resolución (tamaño de celda de 0.333 km), que además incluye un día de “*spin up*” y más días simulados, se encuentra que el rango de variación durante el día representado por el modelo para la temperatura y la humedad relativa se va pareciendo más al de las observaciones con el paso de los días y, en general, es mejor que el de los experimentos de validación a 1 km, aunque en la simulación se representa un ambiente con mayor humedad relativa durante el día en comparación con las observaciones. A pesar de los sesgos encontrados con respecto a la realidad, el modelo reproduce la fase de los ciclos diurnos y las diferencias entre estaciones, lo que sugiere que WRF es una herramienta adecuada para realizar las simulaciones que buscan identificar el impacto del cuerpo de agua en el área de estudio (ver capítulo 6).

Capítulo 6: Efectos del cambio de cobertura en algunas variables superficiales relacionadas con el balance de energía

6.1. Introducción

El seguimiento a los procesos de cambio de cobertura y las modificaciones en el balance de energía requieren información de una gran cantidad de variables, que para este Trabajo de Investigación no se encontraban disponibles a partir de las mediciones en las estaciones N/I. Es por esto que se realizaron los experimentos CTRL (coberturas originales) y LULCC (coberturas cambiadas a agua en la zona del embalse Topocoro) mediante el uso del modelo WRF, para así identificar los posibles impactos generados en el modelo debido al cambio de cobertura.

Aunque estos experimentos se realizaron bajo escenarios limitados que buscan replicar de la manera más precisa las condiciones reales en el área de influencia del embalse (como es discutido en el capítulo 5), entregan la cantidad de variables necesarias para hacer un seguimiento más cercano a los procesos que ocurren en algunos términos del balance de energía y el comportamiento de las variables cerca de la superficie, al llevar a cabo el cambio de cobertura. En este capítulo se hace una descripción de las diferencias entre los dos escenarios, CTRL y LULCC, realizando una conexión con los posibles procesos y mecanismos modificados por el cambio de cobertura que llevan a los impactos identificados.

6.2. Datos y metodología

Para este capítulo se hizo uso de los datos de ERA5 como condiciones iniciales y de frontera para la simulación de los escenarios CTRL y LULCC, bajo las configuraciones y especificaciones descritas en el capítulo 5.

Para identificar las diferencias entre los escenarios se realizó un análisis de los campos horizontales en el dominio d04 (aproximadamente 300 m de resolución horizontal) para variables relacionadas con el balance de energía como radiación neta, y flujos de calor latente y sensible, además de los vientos, la temperatura, el contenido de humedad y la humedad relativa cerca de la superficie. También nos enfocamos en analizar los campos de diferencias calculados mediante la resta de los escenarios LULCC y CTRL, para identificar el sentido de las diferencias y su extensión espacial. Además, se realizó un análisis de las series para los ciclos diurnos en las zonas de ubicación de las estaciones N/I, para hacer una identificación más específica de los posibles impactos en estos lugares de interés. Para esto se realizó el promedio de los valores de 9 celdas del modelo, tomando como celda central la correspondiente a las coordenadas más cercanas para la ubicación de cada estación N/I y las 8 celdas alrededor, para tener el promedio espacial correspondiente a 1 km.

Finalmente, se realizó el análisis de dos secciones transversales A y B calculadas de manera que se abarcara la zona del embalse, y también una zona cercana a la ubicación de las estaciones N/I, como se puede ver en la Figura 6.1. Este análisis se realizó para las variables contenido de humedad (relación de mezcla de vapor de agua), humedad relativa y temperatura, incluyendo también la temperatura potencial (T_h), con la finalidad de profundizar nuestros análisis en una columna atmosférica desde la superficie hasta la capa límite, para identificar si existe transporte de humedad desde la zona del embalse hacia otros lugares del dominio considerado e identificar variaciones en la

estabilidad del perfil vertical debidas al cambio de cobertura. Para eso también se realizó el cálculo de la diferencia entre los experimentos de LULCC y CTRL, para cada una de las secciones.

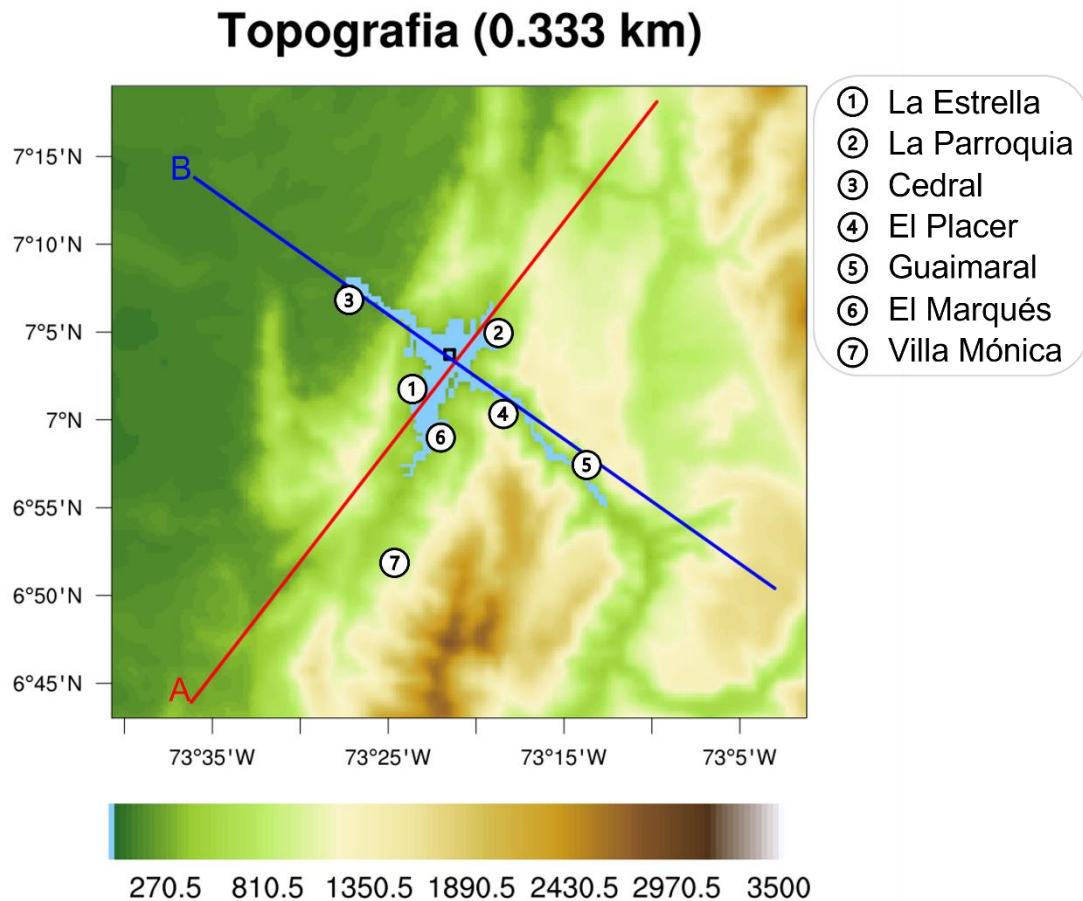


Figura 6.1. Dominio d04 con la ubicación de las estaciones N/I. Las líneas que indican las secciones transversales calculadas. La línea roja representa la sección transversal A. La línea azul representa la sección transversal B. Los números representan las estaciones N/I

6.3. Resultados y análisis

Una vez identificada la metodología para prescribir la temperatura para el cuerpo de agua, se realizó la simulación LULCC con el embalse. En esta sección se describen los cambios identificados entre los dos experimentos, CTRL y LULCC, para los campos horizontales, los sitios de las estaciones y algunas secciones verticales, con la finalidad de identificar también si el cambio de cobertura (i.e. el cambio de las coberturas originales por agua) puede modificar las variables en la vertical.

En la Figura 6.2 se presentan los usos del suelo que el modelo asigna para el dominio interno de la simulación. Como se puede ver, en el dominio predominan los usos de bosque de hoja perenne, sabanas, y cultivos con mosaico de vegetación. Particularmente, en la zona en la que se realiza el cambio de cobertura predominan las sabanas, con menor presencia de bosque perenne y cultivos con vegetación. En la Tabla 6.1 se puede observar el cambio efectuado en las características físicas que fueron modificadas teniendo en cuenta estas coberturas y la nueva cobertura.

Con estos cambios en las características físicas que se generan al reemplazar la superficie original por agua, se esperaría que, debido a que el albedo disminuye, el cuerpo de agua puede absorber más radiación que estaría disponible para aumentar la radiación neta. Como se puede ver en la Tabla 6.1, también aumenta la humedad, con lo que podría aumentar la evaporación, aunque la inercia térmica también aumenta y esto implica que la nueva cobertura se puede demorar más para calentarse que las coberturas anteriores y no necesariamente podría evaporar más durante todo el día. Con la disminución en la rugosidad se esperaría que se aceleren los vientos.

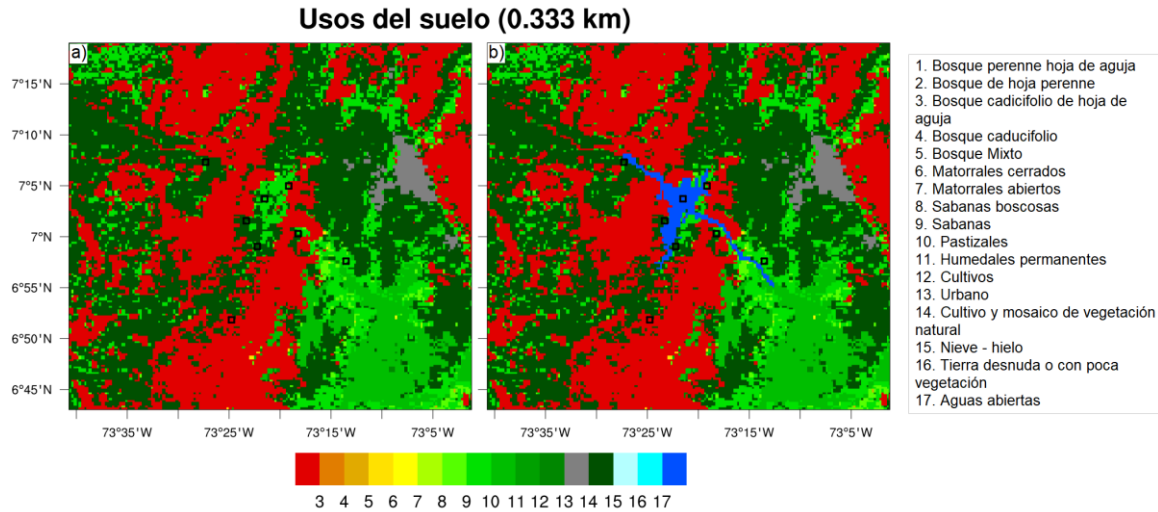


Figura 6.2. Usos del suelo para el domino d04 para los escenarios a) CTRL y b) LULCC

Tabla 6.1. Características físicas para las coberturas modificadas

Categoría	Uso del suelo	Albedo (%)	Disponibilidad de humedad (%)	Emisividad de la superficie (%)	Rugosidad (cm)	Inercia térmica ($\text{cal}/(\text{cm}^2 \text{K}^{\frac{1}{2}} \text{s}^{\frac{1}{2}})$)
2	Bosque de hoja perenne	12	50	95	50	5
9	Sabanas	20	15	92	15	3
14	Cultivo y mosaico de vegetación natural	18	25	98	14	4
17	Aguas abiertas	8	100	98	0,01	6

6.3.1. Campos totales para la simulación de control y diferencias entre experimentos

Para esta sección se hace el análisis de la simulación para los 10 días despejados, luego de descartar el primer día simulado considerado como periodo de “*spin-up*”. Se describe el comportamiento de los vientos, la radiación neta, los flujos de calor latente, los flujos de calor sensible, la relación de mezcla de vapor de agua, la humedad relativa, y la temperatura sobre la región de interés para la simulación de control, a partir del ciclo medio diurno para los 10 días de análisis. Se analizan estas variables pues están relacionadas con el balance de energía y son algunas de las variables en las que se esperaría ver un efecto debido al cambio de cobertura, como se mencionó en la sección anterior. También se hace un análisis de las diferencias entre el experimento LULCC y el experimento CTRL

en los campos horizontales y en los lugares de las estaciones meteorológicas. Las diferencias se calcularon de la forma LULCC-CTRL, de manera que si el resultado es mayor que cero, indica que los valores en LULCC son más elevados que en CTRL, y viceversa. En particular, la descripción se enfoca en dos momentos del día a partir del ciclo diurno promedio de los 10 días simulados, en los que se identificaron los comportamientos más contrastantes para las diferencias. No se muestra un promedio total del cambio, pues en algunas de las variables las diferencias son en sentidos diferentes a lo largo del día, con lo que el cambio total se ve amortiguado al promediar.

Viento

En la Figura 6.3 se presentan los campos correspondientes al experimento CTRL para los vientos en dos horas del día y las diferencias para esas horas (recordar que los campos mostrados corresponden al experimento CTRL). Se escogen como ejemplo estos dos momentos porque como se mencionó, tienen un comportamiento contrastante. En la mañana, los vientos son calmados y van hacia el norte, mientras que en la tarde tienen mayores velocidades y fluyen hacia el sureste. En la Figura 6.3a se observan los vientos a las 6 am. Como se puede ver, en general los vientos en el dominio son calmados con velocidades entre 0.2 y 1 m/s. Se identifica un corredor de viento de sur a norte, con valores alrededor de 2.6 m/s, con máximos de aproximadamente 4.2 m/s. En la Figura 6.3b se observan los vientos a las 2 pm. En este paso de tiempo, los vientos en la zona oeste y noroeste del dominio son calmados, con valores entre 0.4 y 1 m/s, y tienen una dirección predominante hacia el sureste. En el resto del dominio predomina esta misma dirección, pero en la zona de ubicación del embalse, los vientos se aceleran y tienen velocidades de aproximadamente 3 m/s, además, se curvan hacia el norte y hacia el sur, siguiendo la forma de la topografía (en donde se ubicaría el cuerpo de agua) y se desaceleran al salir de este, lo que indica convergencia en estas zonas. Más al sureste, los vientos alcanzan sus mayores velocidades con valores de 6 m/s y se curvan hacia el sur.

En la Figura 6.3c se tienen las diferencias entre los experimentos LULCC y CTRL para las 6 am. Se identifica que los vientos en LULCC tienen una velocidad entre 1 y 2.5 m/s mayor que en CTRL para la zona en la que se ubica el cuerpo de agua, por lo que hay un cambio de vientos calmados en este lugar a vientos que fluyen en dirección noroeste sobre el cuerpo de agua. En el resto del dominio no se identifican cambios en los vientos. En la Figura 6.3d se tienen las diferencias para las 2 pm. Nuevamente, los vientos tienen mayor velocidad, entre 2 y 3 m/s más sobre el cuerpo de agua, y para este paso de tiempo, se tiene una dirección predominante hacia el sureste. Además, se identifican cambios en los vientos por fuera de la máscara del embalse para las zonas al norte y sur del cuerpo de agua, en las que se identifica convergencia para los campos del experimento CTRL. En estas zonas se sugiere una intensificación de la convergencia pues los vientos salen de la zona del cuerpo de agua con mayor velocidad, pero luego tienen menor velocidad. Este cambio en los vientos que sobresale de la máscara del cuerpo de agua es de particular interés pues se podría relacionar con advección de aire con temperatura y contenido de humedad diferentes a la superficie del cuerpo de agua hacia los lugares de las estaciones y otros lugares cercanos.

Viento 10m ($m s^{-1}$), d04-0.333km

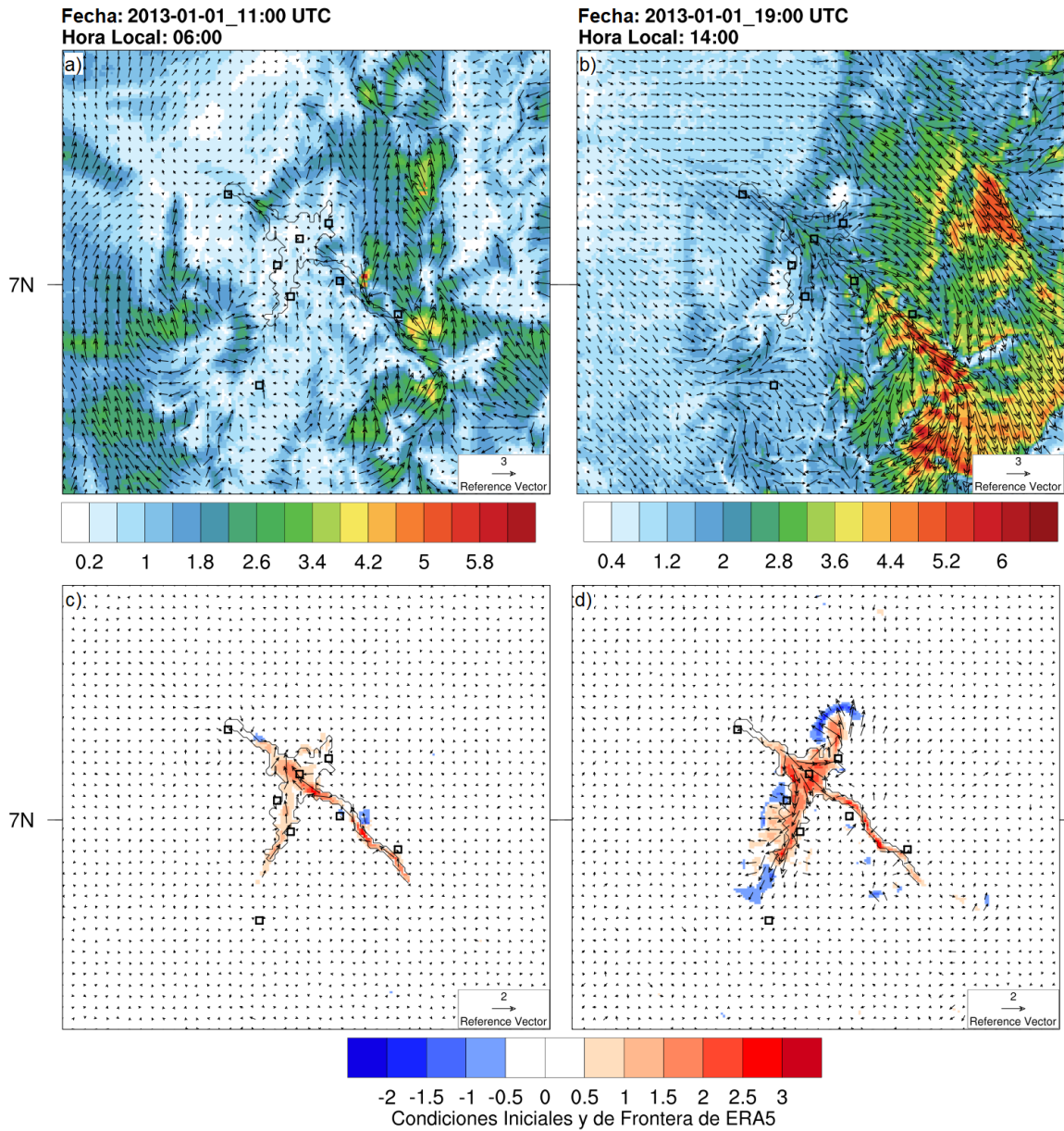


Figura 6.3. Campos de vientos a 10 metros para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Radiación neta

En la Figura 6.4 se presenta la radiación neta para el dominio interno de la simulación de control en dos horas del día y la diferencia entre la simulación de control y el experimento con cambio de cobertura en esas mismas horas. Como se puede ver en la Figura 6.4a, los valores en todo el dominio son negativos a las 6 am, lo que representa una salida de energía desde la superficie hacia la atmósfera. Se puede identificar que hay una división en los valores para el dominio, donde la sección oeste y noreste tiene magnitudes más pequeñas, de entre 15 y 20 W/m² representados por los colores más claros. Estos colores también se pueden identificar en la zona delimitada por la máscara del embalse. Para el resto del dominio se tienen colores más oscuros que representan mayores magnitudes de radiación neta emitida, con valores entre -30 y -52 W/m². Además, se puede identificar un contorno con colores azul oscuro de valores de más de -52 W/m² que es para la cobertura urbana, que representaría la ciudad de Bucaramanga. En la Figura 6.4b se observa la radiación neta para las 2 pm hora local. En este caso, no se identifica la división entre las dos partes del dominio y los valores son más homogéneos y se encuentran entre 520 y 560 W/m²; además, hay algunas zonas con contornos amarillos que representan valores por debajo de los 400 W/m². Así, en general, para las horas de la mañana, la radiación neta es negativa en todo el dominio, debido a la liberación de energía hacia la atmósfera. Durante el día, la radiación neta es positiva, representando entrada de energía a la superficie relacionada con la radiación incidente, y sus valores son más similares espacialmente en el dominio.

Como se puede ver en los paneles a) y b) de la Figura 4, los cambios más notorios se encuentran principalmente en el lugar en los que se ubica el cuerpo de agua. En la Figura 6.4c se puede observar que el experimento LULCC tiene menos radiación neta para esta hora de la mañana que el experimento CTRL, con una disminución de alrededor de 30 W/m². Esto quiere decir que el cuerpo de agua libera más energía a la atmósfera que las coberturas originales en ese lugar. Esto se puede deber particularmente a que el cuerpo de agua, al tener una mayor inercia térmica (ver Tabla 6.1), retiene la energía que ha absorbido durante el día, por lo que en este paso de tiempo se encuentra a una temperatura más elevada que las coberturas en el experimento CTRL (lo que se verá con detalle más adelante). Por esta razón el experimento con embalse puede liberar más energía que CTRL, particularmente debido a una mayor onda larga en función de esa mayor temperatura. Por otra parte, en el resto del dominio no se identifican cambios. En la Figura 6.4d, para las 2pm en hora local, se puede ver que la diferencia es en el otro sentido: en este paso de tiempo, LULCC tiene más radiación neta que CTRL, alrededor de 80 y 100 W/m² más. Este cambio tiene sentido pues con la aparición del cuerpo de agua se disminuye el albedo, lo que como se había mencionado permite que se absorba más radiación incidente, generando más radiación neta para este momento del día. Además, en este paso de tiempo se notan algunos cambios con el sentido mezclado, es decir, positivos y negativos, que abarcan otras zonas del dominio. Estos cambios no se pueden relacionar directamente con el cambio de cobertura, pues están por fuera de la máscara del embalse, pero como se puede ver, podrían estar relacionados con los lugares en que se ven modificados los vientos (ver vectores que representan el viento en la Figura 6.3), y están en las zonas en las que se identificó un aumento de la velocidad de los vientos y la ocurrencia de convergencia.

Radiación neta (W/m^2), d04-0.333km

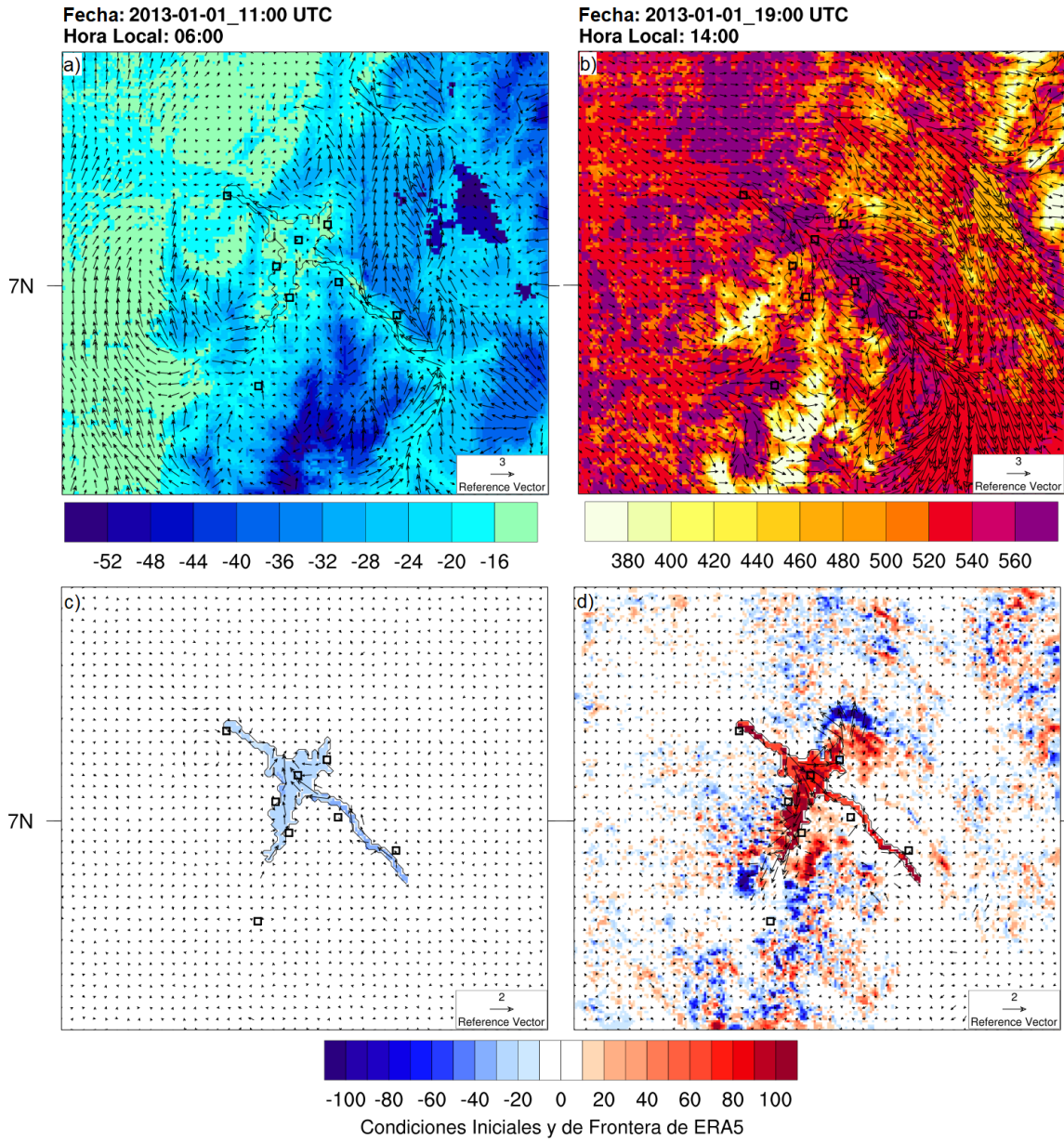


Figura 6.4. Campos de radiación neta superficial para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Flujo de calor sensible

En la Figura 6.5 se presentan los campos de calor sensible para la simulación de control en dos horas del día (paneles a y b), así como las diferencias entre el LULCC y CTRL para esas mismas horas. En la Figura 6.5a, correspondiente a las 6 am, se puede observar que todos los valores son negativos, con excepción de la región al noroeste de donde se ubica el cuerpo de agua y la zona que representa a Bucaramanga, lo que significa que el flujo entra a la superficie. Estos valores se encuentran en general entre -10 y -30 W/m^2 , con algunas zonas donde se llega hasta -45 W/m^2 . En la Figura 6.5b, correspondiente a las 2 pm, se puede ver que los valores son positivos, lo que representa que el flujo sale de la superficie, y se pueden identificar zonas donde los valores se encuentran entre 20 y 100 W/m^2 aproximadamente, mientras que en otras zonas están entre aproximadamente 160 y 260 W/m^2 .

En la Figura 6.5c se observan las diferencias promedio a las 6 am donde se pueden identificar pequeñas diferencias en la frontera del cuerpo de agua, pero en general no hay muchos cambios a esta hora del día. En la Figura 6.5d se observan las diferencias para las 2 de la tarde. Como se puede ver, los cambios de mayor magnitud están restringidos al cuerpo de agua, donde se tienen disminuciones que alcanzan los 100 W/m^2 , las cuales pueden asociarse a la temperatura del cuerpo de agua, que al demorarse más para calentarse durante el día (como se verá más adelante), disminuye los flujos de calor sensible hacia la atmósfera, e incluso puede cambiar el sentido del flujo, absorbiendo energía desde el aire. En los alrededores del cuerpo de agua, nuevamente se tiene un comportamiento que se podría relacionar con el cambio identificado en los vientos, pues se tienen aumentos en el calor sensible y algunas disminuciones en la zona donde se identificó la convergencia.

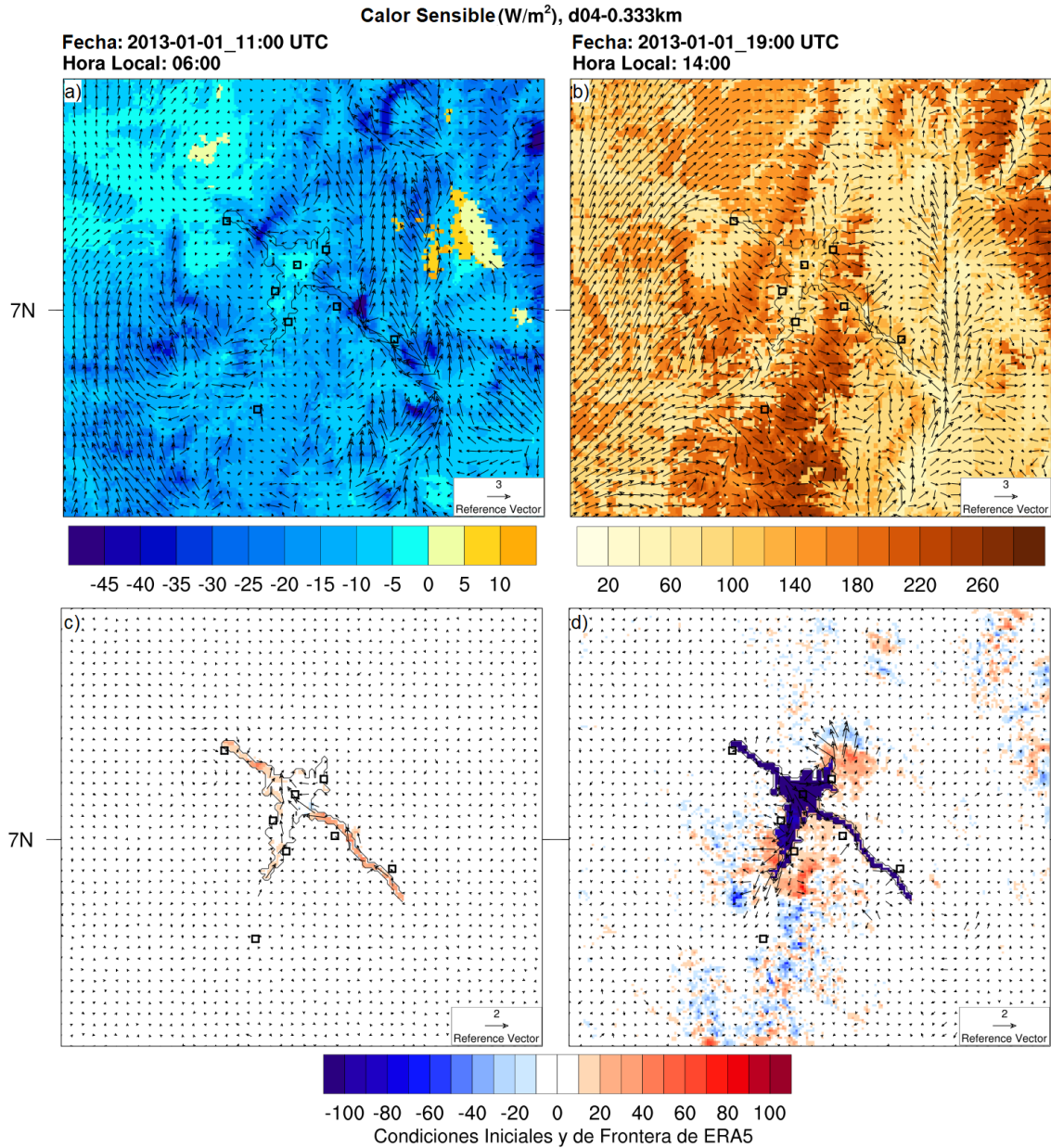


Figura 6.5. Campos de calor sensible superficial para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Flujo de calor latente

La Figura 6.6 presenta los campos de calor latente para dos momentos del día de la simulación CTRL (paneles a y b), así como las diferencias entre entre LULCC y CTRL (paneles c y d). En la Figura 6.6.a se puede observar que los valores son positivos en gran parte del dominio, lo que indica que estos flujos salen de la superficie hacia la atmósfera. En general, los valores se encuentran alrededor de 9 y 12 W/m², pero se tienen algunas regiones al suroeste y las zonas del cañón que desemboca en el embalse en las que los valores son más altos y alcanzan magnitudes de hasta 27 W/m². También se tienen pequeñas regiones donde los valores son negativos, representando flujo desde la atmósfera, e.g. asociado a condensación (rocío), pero no superan los -3 W/m². En la Figura 6.6b se puede observar que hacia la mitad del día (2 pm hora local), todo el dominio tiene un flujo de calor latente hacia la atmósfera. Se puede identificar que, en general, los valores se encuentran entre 360 y 440 W/m², con algunas zonas donde los valores son más pequeños, entre 120 y 160 W/m², como es el caso de la zona urbana de la ciudad de Bucaramanga.

En la Figura 6.6c se presentan las diferencias entre los experimentos LULCC y CTRL para las 6 am. De la misma manera que para las otras variables, los cambios se pueden observar limitados a la máscara de agua. Estos cambios son positivos, indicando que a esta hora, en el experimento LULCC, se tiene más flujo de calor latente (y por tanto más evaporación) sobre la máscara de agua que en CTRL (alrededor de 90 W/m² de más). En la Figura 6.6d se puede observar que a las 2 pm, los mayores cambios están limitados al cuerpo de agua y son negativos, lo cual significa que el cuerpo de agua evapora menos que las coberturas en la simulación CTRL (alrededor de 270 W/m² menos que en el experimento de CTRL). Además, aparecen cambios de alrededor de 90 W/m² en los extremos de la máscara de agua, similares a los descritos en las variables anteriores. Nuevamente, se sugiere que estos cambios podrían estar relacionados con los vientos (como se ve en la Figura 6.3) y con la advección de otras cantidades, como se explicará más adelante.

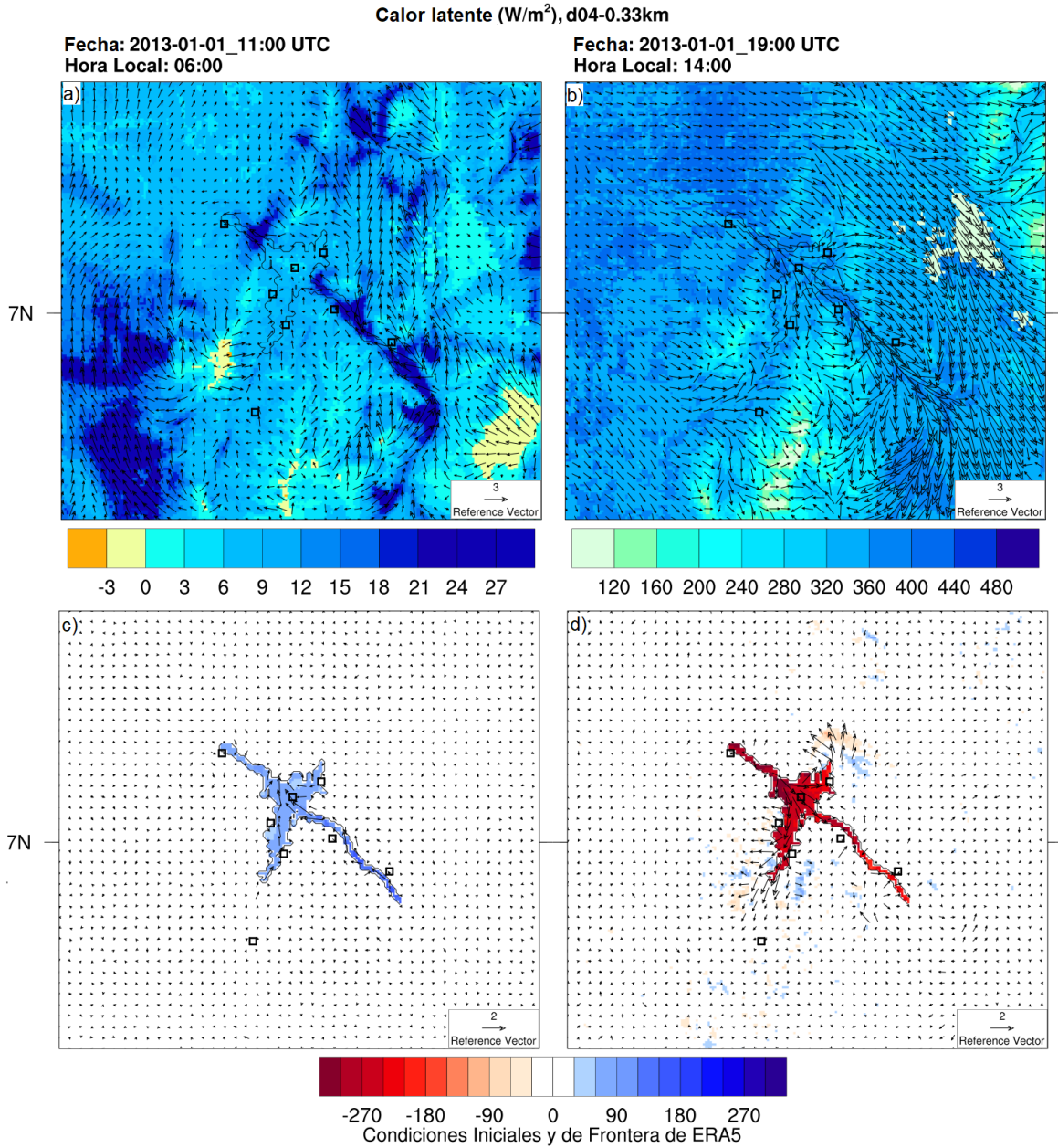


Figura 6.6. Campos de calor latente superficial para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Relación de mezcla de vapor de agua a 2 metros

Cuando se presentan cambios en los flujos de superficie, se esperan cambios en algunas variables atmosféricas cerca de la superficie. Por ejemplo, los cambios en calor latente (y por tanto evaporación) pueden estar asociados con cambios en la cantidad de humedad cerca de la superficie. En la Figura 6.7 se muestran los campos totales para la relación de mezcla de vapor de agua a 2 metros para dos horas del día, así como las diferencias entre los experimentos LULCC y CTRL para esas mismas horas. En la Figura 6.7a se observa la humedad para las 6 am (hora local). Como se puede ver, la zona oeste y noroeste tiene los valores más altos del dominio, entre 14 y 18 g/kg, que aumentan gradualmente desde la parte más cercana al centro del dominio y la zona del embalse hacia la frontera oeste del dominio. En el resto del dominio, los valores se encuentran entre 11 y 14 g/kg. En la Figura 6.7b se tienen los valores para las 2pm, y se encuentra que para la mayor parte del dominio se identifican valores de alrededor de 18 g/kg. Se puede ver que hay una relación tanto con los flujos de calor latente para este paso de tiempo, como con el flujo de los vientos y el aumento de humedad en el dominio. En la Figura 6.6b se identifica un flujo de calor latente hacia la atmósfera, lo que indica evaporación desde la superficie, que aporta al aumento de la humedad cerca de la superficie. Además, comparando las 2 pm (Figura 6.7b) con las 6am (Figura 6.7a), se puede observar una advección de la humedad que se puede relacionar con el fortalecimiento de los vientos y con su dirección hacia el sureste, indicando que hay un transporte de humedad desde las zonas al noroeste del embalse hacia el centro y sureste del dominio.

En la Figura 6.7c se tiene las diferencias en humedad cerca de la superficie entre los experimentos LULCC y CTRL. De la misma manera que para las otras variables, los cambios se limitan en su mayor parte a la máscara del cuerpo de agua, pero particularmente en este caso, los cambios están en los bordes de la máscara y no hay un cambio en el centro del embalse. Los cambios indican que a las 6am se tiene algo más de humedad en los bordes del cuerpo de agua, de alrededor de 0.8 g/kg más. En la Figura 6.7d se tiene la diferencia para las 2 pm. En este momento del día se tiene un cambio que abarca por completo el cuerpo de agua y no solo los bordes. También se tiene un aumento de alrededor de entre 0.8 y 1.6 g/kg, que representa un aumento del 4.5% en el experimento LULCC con respecto a CTRL. Además, se observa un aumento de humedad de alrededor de 0.8 g/kg hacia los extremos del embalse. Este aumento podría estar relacionado con el aumento en la velocidad de los vientos y un transporte de esa humedad desde el cuerpo de agua hacia afuera de la máscara del embalse, en dirección noreste y suroeste. Además, aparecen unas zonas donde se observa menor humedad, aunque estos cambios tienen magnitudes menores que los descritos anteriormente y no se pueden relacionar directamente con cambios en los vientos, por lo que, probablemente, estas disminuciones en la humedad entre simulaciones pueden ser producto de la variabilidad interna del modelo.

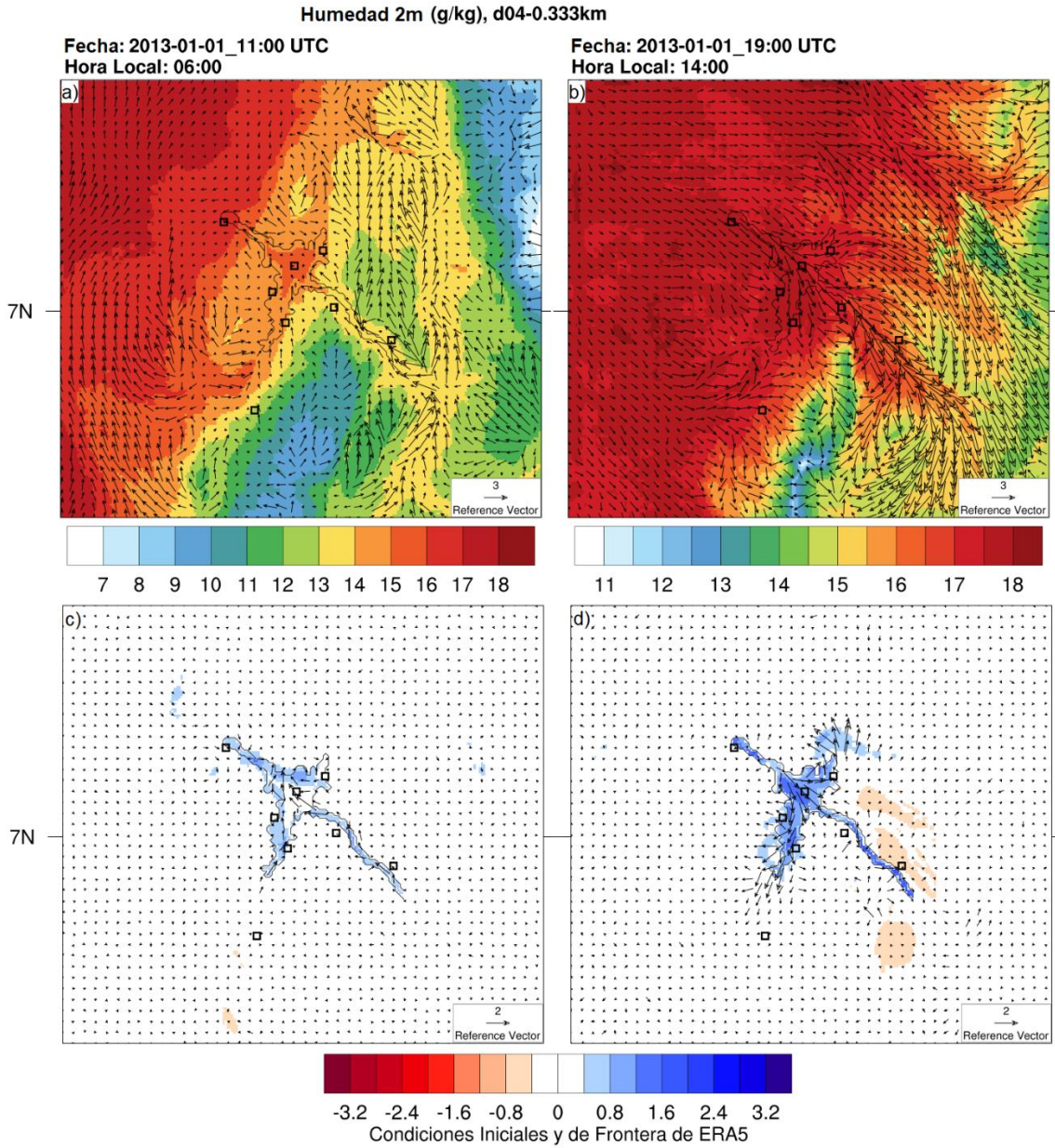


Figura 6.7. Campos de humedad específica 2 metros para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Temperatura a 2 metros de la superficie

En asociación con los cambios identificados en el calor sensible, se esperan cambios en la temperatura, pues este flujo depende de la diferencia en la temperatura de la superficie y la temperatura del aire cerca de la superficie. En la Figura 6.8 se muestran los campos originales para la simulación de control en dos momentos del día, así como las diferencias entre las simulaciones LULCC y control para la variable temperatura a 2 metros. En la Figura 6.8a se observa la temperatura a las 6 am (hora local). Como se puede ver, hay una división similar a la de la radiación neta (y un poco a la del calor sensible), donde las zonas del oeste y noroeste y en la ubicación del embalse tienen una temperatura más alta que el resto del dominio, con valores de entre 22 y 24 °C. Particularmente, estas son las zonas con menos elevación en el dominio, lo que explica estos mayores valores de temperatura. Además, esta zona es la que primero se calienta en la mañana, al salir el sol, lo que explicaría que los flujos de radiación neta y calor sensible sean más cercanos a cero, considerando que esa superficie está algo más caliente por la incidencia de los primeros rayos de sol y que la diferencia con la temperatura del aire se hace más pequeña. Para el resto del dominio, los valores están entre 18 y 20 °C, con algunas zonas donde disminuyen hasta 16 °C e incluso menos de 10°C. En la Figura 6.8b se observa una distribución espacial de la temperatura similar a la que se tiene a las 6 am, pero con valores más altos a las 2 pm. En este caso, las zonas del oeste y noroeste y en la ubicación del embalse tienen valores entre 30 y 32 °C, mientras que las otras zonas tienen temperaturas entre 20 y 24 °C. Las zonas con menores temperaturas presentan valores cerca de 16 °C. En la Figura 6.8c se muestran las diferencias entre los experimentos para las 6 am. Se puede observar que los cambios se limitan al área de la máscara de agua y que, para este paso de tiempo, la temperatura del cuerpo de agua es entre 1.5 y 3 °C mayor en el experimento LULCC, debido a la inercia térmica del mismo, lo que permite conservar energía durante la noche y tener mayores temperaturas que sus alrededores en la mañana, o en este caso, que las coberturas originales. En la Figura 6.8d se tienen las diferencias para las 2 pm. En este paso de tiempo, la temperatura del cuerpo de agua es aproximadamente 3°C más fría en el experimento LULCC que en CTRL. Esto se también estaría relacionado con la inercia térmica del agua, pues al requerir más tiempo para aumentar su temperatura que las coberturas originales, la superficie del agua tiene menor temperatura que las coberturas para el experimento CTRL. Además, se logra identificar una disminución en la temperatura relacionada con el cambio en los vientos para la zona norte, cercana al cuerpo de agua, lo que podría indicar que los vientos pueden estar advectando parte de esas temperaturas más frescas (y un poco más húmedas) sobre el cuerpo de agua hacia regiones por fuera de la máscara y zonas cercanas.

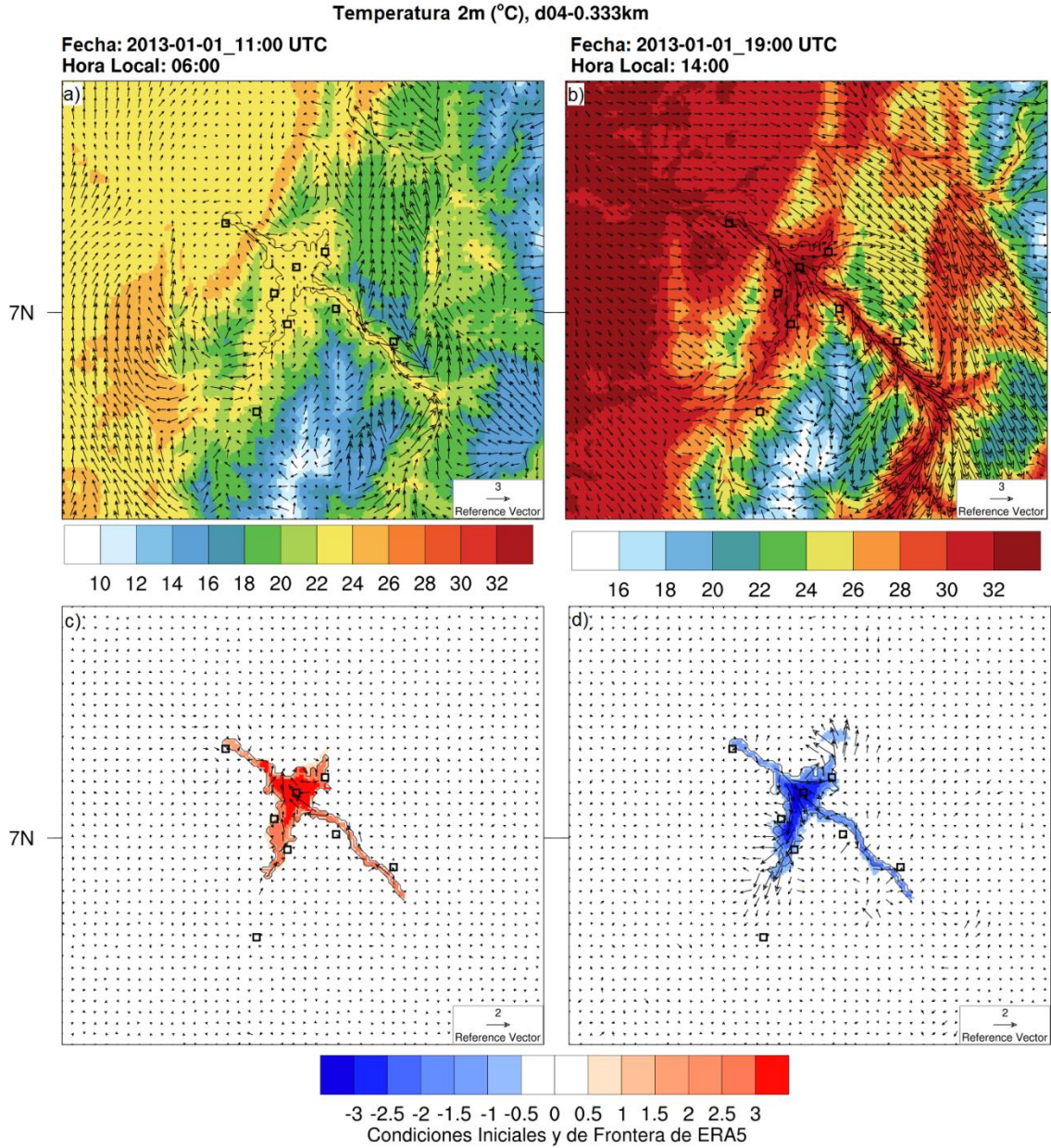


Figura 6.8. Campos de temperatura a 2 metros para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

Humedad relativa

En general, la humedad relativa puede variar tanto porque cambie el contenido de vapor de agua en la atmósfera como por cambios en la temperatura, o ambos cambios ocurriendo a la vez. En la Figura 6.9 se tienen los campos de humedad relativa, así como las diferencias para dos pasos de tiempo. En la Figura 6.9a se tiene la humedad relativa para las 6 am. Se observa que la zona noroeste del dominio presenta los valores más altos para este paso de tiempo, con valores entre 92 y 96%. Para la zona en donde se ubica el embalse, los valores están entre 88 y 90%. En el resto del dominio, los valores están predominantemente entre 70 y 80%. En la Figura 6.9b se muestra la humedad relativa para las 2 pm. Para esta hora del día, la zona oeste y noroeste, así como el lugar de ubicación del embalse, tienen valores de humedad relativa cercanos al 60%. Este comportamiento tiene sentido dado que entre las 6 am y las 2 pm, la humedad específica no aumenta significativamente (Figura 6.7), pero la temperatura sí lo hace (Figura 6.8), lo que resulta en la disminución de los valores de humedad relativa a lo largo de la mañana y el mediodía. Por otra parte, en el resto del dominio, los valores permanecen aproximadamente entre 70 y 80%. En la Figura 6.9c se presentan las diferencias entre los experimentos para las 6 am, las cuales muestran una disminución en la humedad relativa que se restringe a la máscara del embalse. Esto tiene sentido debido al pequeño cambio identificado en la relación de mezcla de vapor de agua y los aumentos en la temperatura entre simulaciones para esta hora del día. En la Figura 6.9d se muestra la diferencia para las 2 pm. En este paso de tiempo, se identifica un aumento en la humedad relativa cercano al 20%, que se relaciona con el aumento en la humedad específica, pero también con la disminución en la temperatura. Además, se identifica este aumento en la zona al norte, cercana al cuerpo de agua, que se relaciona con las diferencias identificadas en los vientos sobre esta región, según se ha discutido.

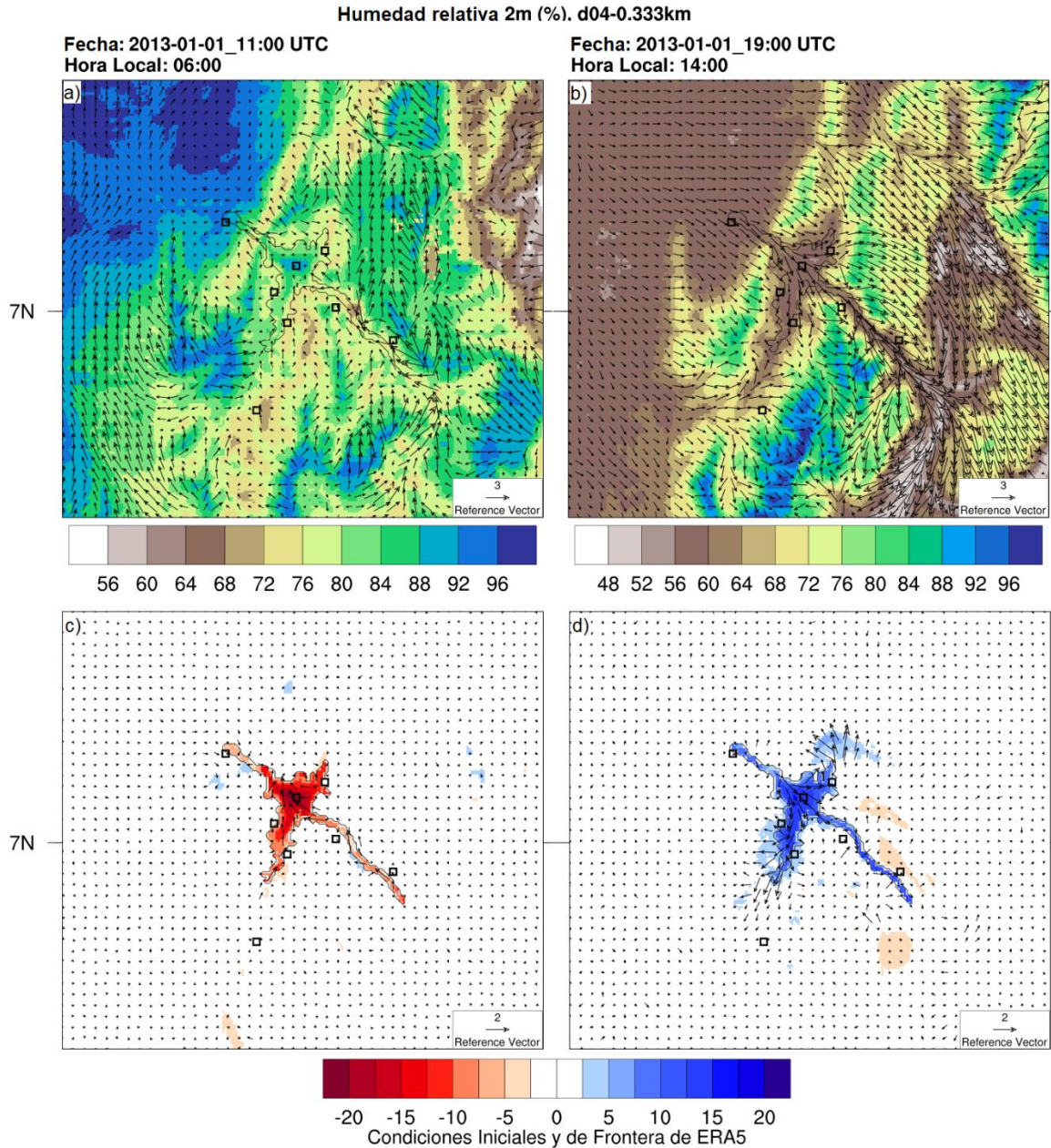


Figura 6.9. Campos de humedad relativa 2 metros para el experimento CTRL y diferencias entre este experimento y el cambio de cobertura (LULCC-CTRL) en dos horas del día. a) Campos totales y c) diferencias para las 6am hora local. b) Campos totales y d) diferencias para las 2 pm hora local. Los vectores representan los vientos en a) y b) y las diferencias en los vientos en c) y d). Nota: note que los paneles a) y b) tienen una escala de valores distinta. El contorno indica la ubicación del embalse

6.3.2. Cambios en ciclos diurnos para los sitios de interés

A continuación, se describen los cambios en los ciclos diurnos de las variables analizadas para algunos sitios de interés. Para esto, se obtienen promedios espaciales de los campos de las diferentes variables alrededor de la celda que contiene las coordenadas de las estaciones meteorológicas de interés, usadas en la fase de validación (ver sección 5.3.1 del capítulo 5). Para representar cada sitio, se estimó un promedio de 9 celdas, entre la celda que contiene la locación de la estación y sus 8 celdas

vecinas. Inicialmente, se describe el sitio denominado “Embalse”, es decir justamente en donde se realizó el cambio de cobertura en la simulación LULCC. También se describe la comparación para las estaciones La Estrella y La Parroquia, ambas cercanas a la máscara de agua, aunque en dos posiciones contrarias con respecto al cuerpo de agua. Finalmente, se discute la comparación con la estación Villa Mónica, que se encuentra más alejada de la máscara de agua y de su posible influencia. El resto de las estaciones se puede ver en el Anexo D: Figuras complementarias del Capítulo 6. La Figura 6.10 presenta la ubicación de las estaciones N/I. Para cada sitio, nos concentramos en los ciclos medios diurnos de los valores horarios de los flujos superficiales de calor sensible y latente, así como la radiación neta, la temperatura a 2 m, la relación de mezcla de vapor de agua a 2m, y la humedad relativa a 2m. Así, se analizan los cambios producidos por el cambio de cobertura en el área del embalse y los posibles mecanismos detrás de dichos cambios.

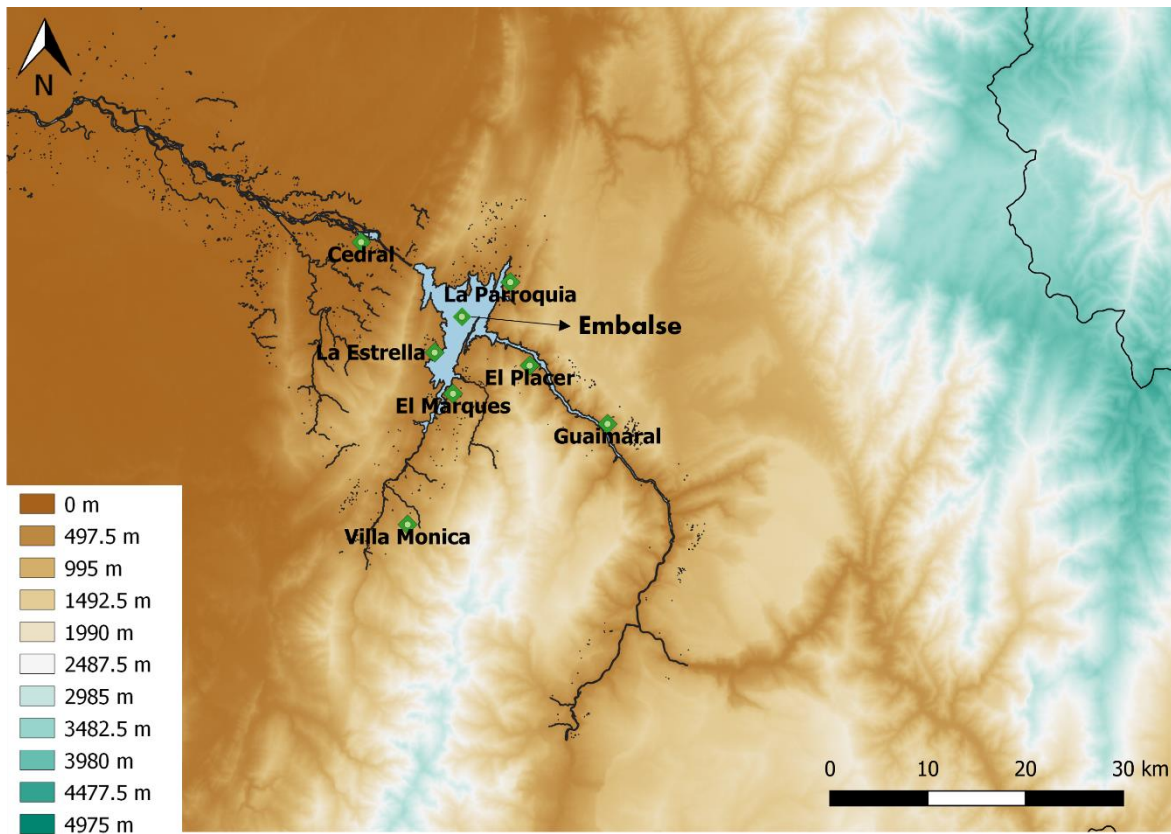


Figura 6.10. Ubicación de las estaciones meteorológicas N/I y el sitio “Embalse” (punto de análisis sobre el embalse introducido en la simulación LULCC)

Embalse

En la Figura 6.11 se presenta la comparación entre el ciclo diurno de los experimentos Ctrl y LULCC para algunas de las variables del balance de energía en el centro del cuerpo de agua o sitio “Embalse” (ver Figura 6.10). En la Figura 6.11a se muestra el ciclo diurno para la radiación neta. Como se puede observar, se observan cambios que ocurren para diferentes momentos a lo largo del día. Para la noche y la madrugada, se tiene que el experimento LULCC presenta valores más bajos de radiación neta que CTRL, lo que estaría relacionado con el comportamiento de los flujos de calor sensible y calor latente durante estos periodos. Por ejemplo, a las 6 am, la radiación neta en el experimento CTRL es de -37.84 W/m^2 mientras que en LULCC es de -65.65 W/m^2 , lo que representa un incremento en la

magnitud de la radiación neta emitida en el sitio del embalse de 73,51%. Por otra parte, durante parte de la mañana y la tarde, el experimento LULCC presenta los valores más altos, lo que tiene sentido teniendo en cuenta el tipo de cambio de cobertura, el cual generó una disminución en el albedo y que por tanto, el cuerpo de agua absorba más de la radiación incidente que le llega. A las 2 pm, por ejemplo, el experimento CTRL tiene un valor de 633,05 W/m² mientras que LULCC tiene un valor de 727,37 W/m², lo que representa un aumento de 14,9%.

En la Figura 6.11b se observa el ciclo diurno para el calor sensible. Se puede observar que con el cambio de cobertura, el flujo de esta variable disminuye prácticamente a cero: por ejemplo, a las 2 pm se tiene una reducción de 104,16%. Para los momentos de la noche y la madrugada, en el experimento LULCC se tienen valores cercanos a 0 pero mayores que los del experimento CTRL, lo cual significa que en estas horas hay menos flujo entre el embalse la atmósfera, pues el embalse se encuentra más cálido que las coberturas originales. En la Figura 6.11c se muestra el calor latente. Como se observa, esta variable es considerablemente mayor en el experimento LULCC para la noche y la madrugada, mientras que durante el día presenta una disminución considerable. Por ejemplo, a las 6 am, el aumento es aproximadamente entre 2,42 W/m² y 84 W/m², mientras que a las 2 pm la disminución aproximadamente entre 394 W/m² y 111 W/m², lo que representa un 104%. En la Figura 6.11d se presenta la temperatura a 2m. Como se puede ver, la temperatura en el experimento LULCC presenta un ciclo diurno con menor variabilidad a lo largo del día, lo que se puede deber principalmente a la mayor inercia térmica del agua. Por ejemplo, para las 6 am, el experimento LULCC es 17,76% más cálido que CTRL, mientras que a las 2 pm es 9,87% más frío. Esta disminución en la variabilidad de la temperatura a lo largo del día estaría relacionada con la disminución en el flujo de calor sensible desde la superficie, pues la temperatura superficial del cuerpo de agua disminuye su variabilidad, es decir, no aumenta tanto durante el día, y no disminuye tanto durante la noche, con lo que disminuyen los flujos de calor sensible y se termina con una temperatura del aire cerca de la superficie con menores variaciones. Por otra parte, en la Figura 6.11e se muestra la humedad relativa, que exhibe un comportamiento que se relaciona con el de la temperatura, donde la variabilidad a lo largo del día disminuye. A las 6 am, el experimento LULCC tiene valores aproximadamente un 22% más alejados de los valores de CTRL, mientras que a las 2 pm, LULCC tiene valores más altos de la variable, aproximadamente 23% mayores. Aproximadamente entre 5 pm y 8 pm, se observa un aumento en los valores de humedad relativa en el experimento LULCC, que están relacionados con evaporación desde el cuerpo de agua pues, como se puede ver en la Figura 6.11c, antes de estas horas hay un aumento en los flujos de calor latente, y de la misma manera, se tiene un aumento en el contenido de humedad (ver Figura 6.11f). En la Figura 6.11f se observa la humedad específica (relación de mezcla de vapor de agua). En esta variable no se identifican cambios significativos para la madrugada y la mañana, pero a partir del mediodía se tiene un aumento en los valores del experimento LULCC, como se mencionó anteriormente. Para las 6 pm, momento en que se tiene el pico más alto de humedad en el experimento LULCC, la diferencia con CTRL es de aproximadamente 14%.

Así, de manera general, el cambio de cobertura ocasiona un aumento de la radiación neta durante en el embalse durante el día, a la vez que se disminuye el contraste entre la temperatura superficial del cuerpo de agua y la temperatura del aire cerca de esa superficie. Esto, a su vez, disminuye el rango de temperatura a lo largo del día, con lo que se tiene menos variación de la temperatura, y disminuyen los flujos de calor sensible. Además, durante el día se tienen temperaturas más frías en el experimento LULCC, mientras que en la noche las temperaturas son más cálidas debido a la inercia térmica del cuerpo de agua. Contrario a lo que se esperaba, los flujos de calor latente disminuyen durante el día, pero se mantienen más activos en la noche y la madrugada, aunque el contenido de humedad no varía

significativamente entre experimentos y solo se presentan diferencias en la tarde y la noche, con el experimento LULCC presentando mayor humedad. En los experimentos, la humedad relativa se encuentra más dominada por el comportamiento de la temperatura, y a pesar de estar sobre un cuerpo de agua, no se tienen valores cercanos a la saturación. Se logra identificar un aumento en la humedad relativa en el momento en que el contenido de humedad también aumenta.

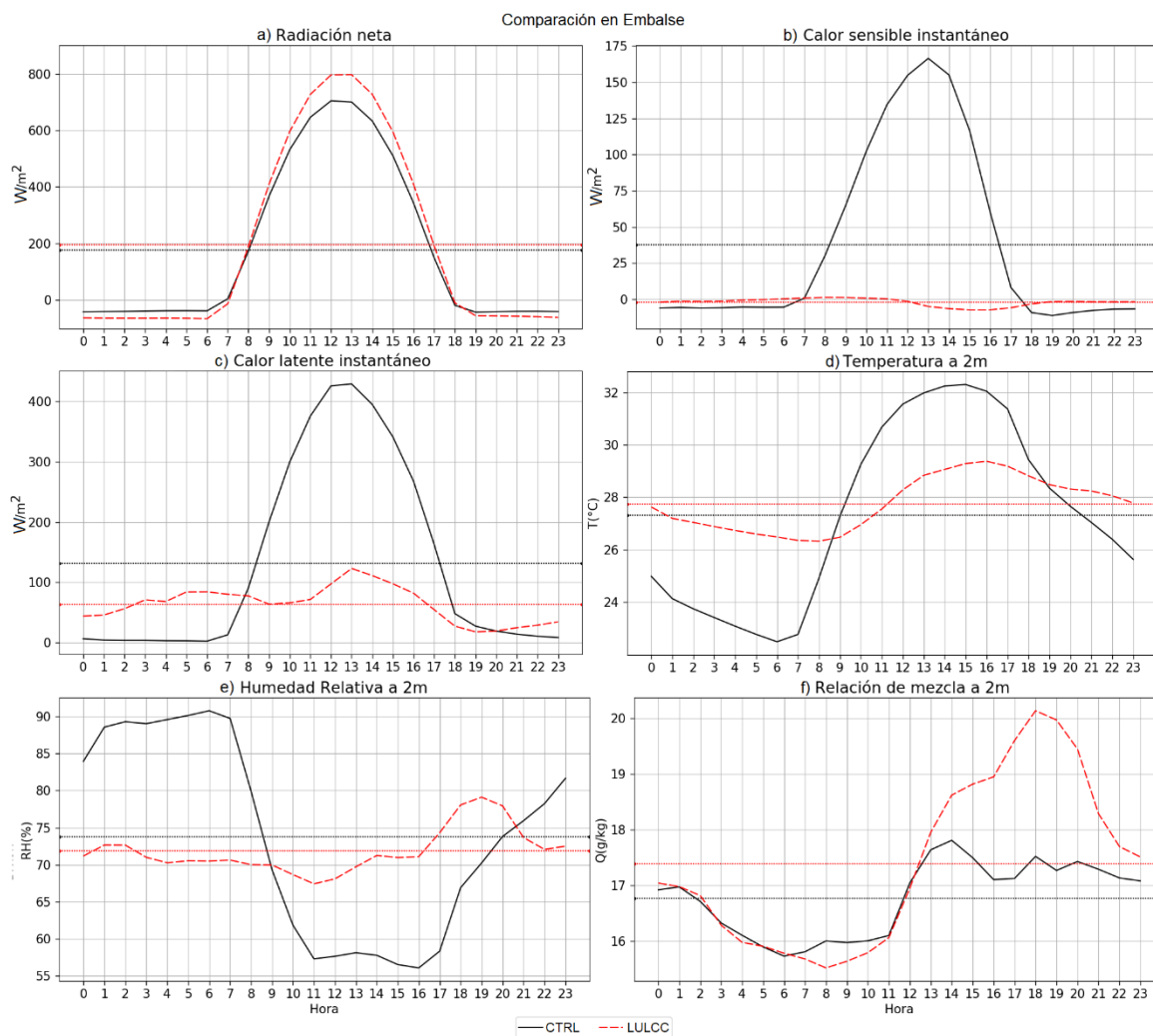


Figura 6.11. Ciclo diario de las variables relacionadas con el balance de energía en el sitio “Embalse”. a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla de vapor de agua a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja a rayas el experimento LULCC. La línea negra punteada representa el valor promedio para el experimento CTRL y la línea roja punteada el valor promedio para el experimento LULCC

La Estrella

En la Figura 6.12 se presenta la comparación entre experimentos para las 9 celdas centradas en el sitio La Estrella. Esta comparación es interesante pues en ninguna de estas 9 celdas hay cambio de cobertura en el experimento LULCC, y la única conexión con los cambios observados en la zona de la máscara de agua ocurren en los vientos, que se alcanzan a observar en la ubicación de esta estación (ver Figura 6.3). La Figura 6.12a muestra la radiación neta, que para ambas simulaciones es prácticamente igual salvo unas pequeñas diferencias entre las 12pm y las 3pm. La Figura 6.12b muestra el calor sensible, que es similar para todo el ciclo diurno, pero alcanza valores más altos en el experimento LULCC entre las 11 am y las 2 pm. La mayor diferencia se observa a las 1pm con un valor de aproximadamente 16%. Esta diferencia estaría relacionada con las variaciones en temperatura que se pueden observar en la Figura 6.12d, en la que se identifica que aproximadamente entre las 10 am y las 4 pm, el experimento LULCC tiene temperaturas más bajas que CTRL, con el mayor cambio a las 2 pm, de magnitud aproximada a 2%. Por su parte, el experimento LULCC es más cálido en la madrugada, con la mayor diferencia a las 7 am, de una magnitud aproximadamente igual a 3%. Estos cambios son más pequeños en magnitud que los que se identifican sobre el sitio “Embalse” (ver Figura 6.11), en particular porque no se tiene un cambio de cobertura sobre el sitio La Estrella. De esta manera, este comportamiento de la temperatura se relaciona con los vientos que estarían transportando las temperaturas más frías (cálidas) desde el embalse hacia el lugar de esta estación durante el día (la mañana), lo que ocasionaría un cambio en el comportamiento del calor sensible. En la Figura 6.12c se presenta el flujo de calor latente, que tiene un comportamiento similar a la radiación neta, con unas pequeñas variaciones entre las 11 am y las 2 pm. Por su parte, el contenido de humedad (ver Figura 6.12f) tiene valores similares entre los dos experimentos, con cambios más notorios entre las 1 pm y las 7 pm. El mayor cambio se da a las 2 pm, correspondiente a un aumento del 2.7%. Finalmente, la Figura 6.12e presenta la humedad relativa, que tiene un comportamiento similar al descrito para el sitio “Embalse”. Se puede ver que dicho cambio está regido por la temperatura, mostrando disminuciones cuando la temperatura es mayor en el experimento LULCC, y viceversa. Además, se nota un aumento para el momento del día en el que aumentan los valores de relación de mezcla de vapor de agua.

Comparación en La Estrella

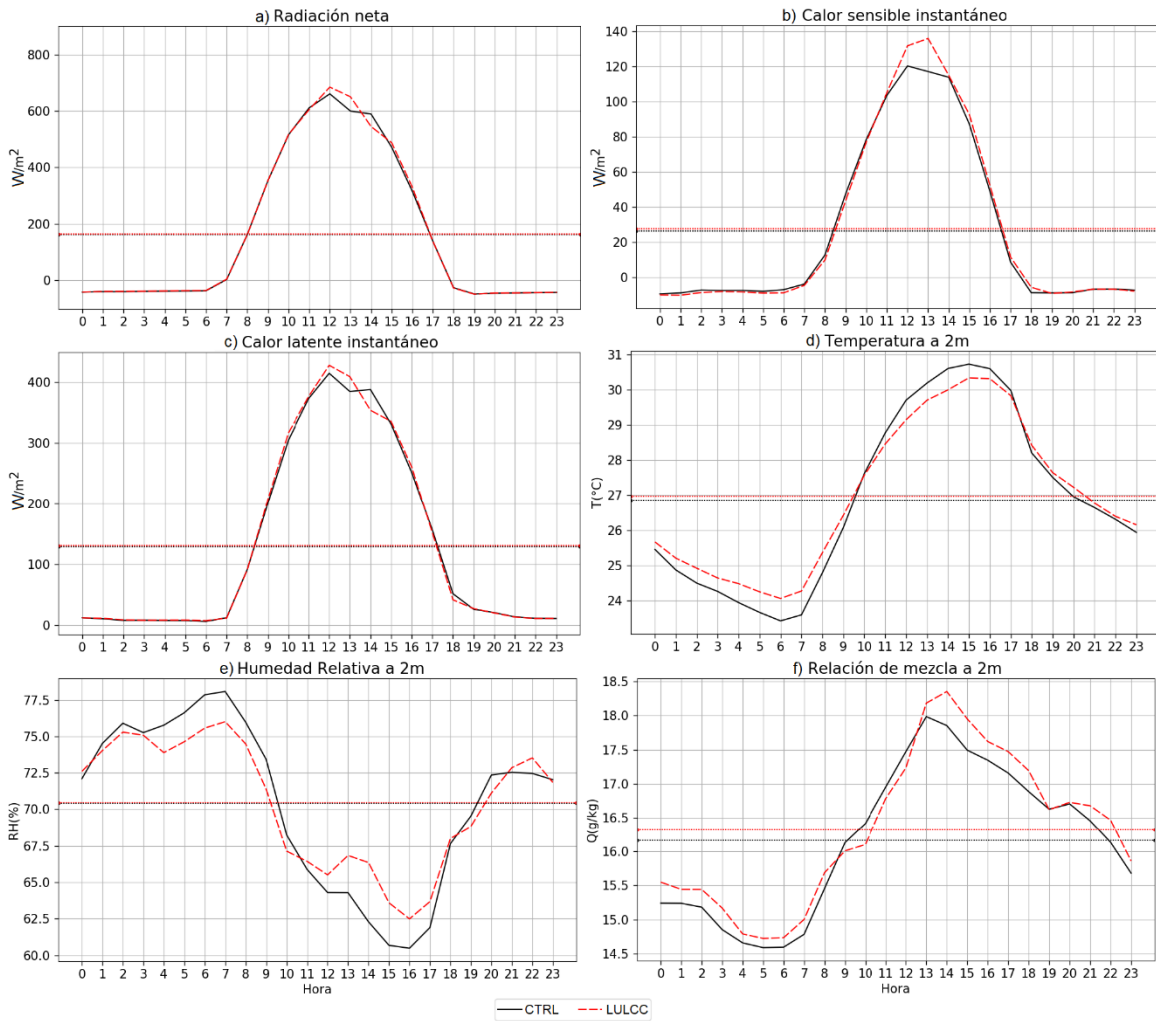


Figura 6.12. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación La Estrella. a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) Calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla de vapor de agua a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja a rayas el experimento LULLC. La línea negra punteada representa el valor promedio para el experimento CTRL y la línea roja punteada el valor promedio para el experimento LULLC

La Parroquia

En la Figura 6.13 se presentan los ciclos diarios para los experimentos CTRL y LULLC para la estación La Parroquia, ubicada al norte del cuerpo de agua (ver Figura 6.10). En la Figura 6.13a se muestra la radiación neta, para la cual no se identifican diferencias entre los experimentos, con excepción de un pequeño aumento entre las 12 pm y las 3 pm. En esta estación, también se identifican las diferencias en temperatura descritas para La Estrella (Figura 6.13d), para la que se observa que el experimento LULLC ligeramente más cálido durante la noche y la madrugada, pero más frío durante el día. Nuevamente, este comportamiento se puede relacionar con advección debida a los vientos, pues como se mencionó en la sección anterior, los vientos se recurvan hacia el norte y hacia el sur en la zona del cuerpo de agua. Esta disminución durante el día es de aproximadamente 2%. Debido a esto, se puede ver un aumento en el flujo de calor sensible durante el día (ver Figura 6.13b), con cambios de hasta aproximadamente 13%, como ocurre a las 2 pm. En la Figura 6.13c se presenta el

calor latente para el que no se identifican cambios entre los experimentos, a excepción de una pequeña diferencia entre la 1 pm y las 3 pm. En la Figura 6.13f se muestra la relación de mezcla de vapor de agua, que si bien no es exactamente igual entre los experimentos, es bastante similar y solo presenta un cambio notorio entre las 2 pm y las 6 pm, para el que el experimento LULCC tienen más humedad que CTRL (aproximadamente 3.5% más). Para la humedad relativa (Figura 6.13e), se tiene un comportamiento similar, con mayores cambios cuando se observa un aumento en la relación de mezcla de vapor de agua, con la mayor diferencia a las 4 pm, representando un aumento del 7,11%.

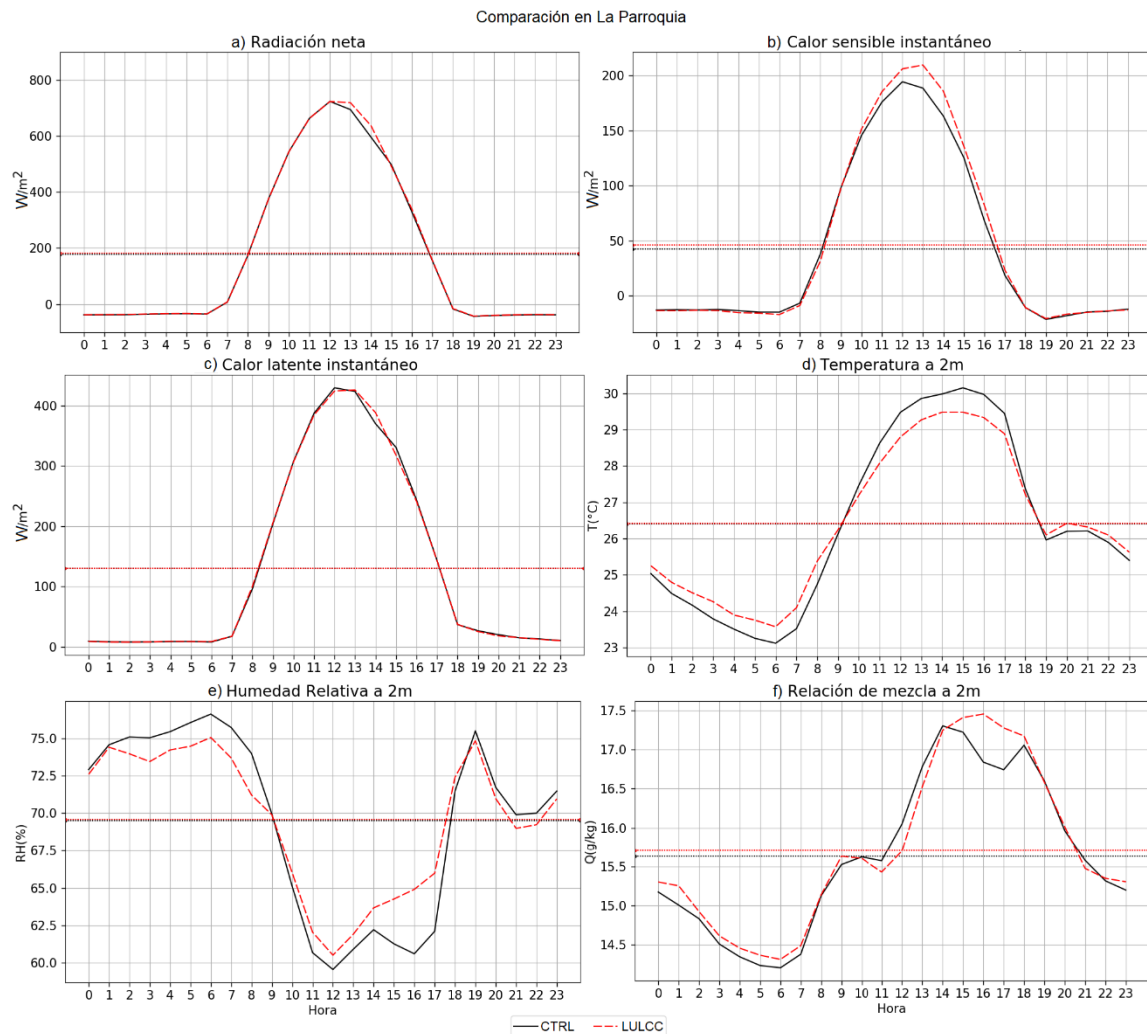


Figura 6.13. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación La Parroquia. a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) Calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla de vapor de agua a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja a rayas el experimento LULCC. La línea negra punteada representa el valor promedio para el experimento CTRL y la línea roja punteada el valor promedio para el experimento LULCC

Villa Mónica

En la Figura 6.14 se presentan los ciclos diarios para la estación Villa Mónica, ubicada al sur del cuerpo de agua. Esta estación está más alejada del embalse que las demás estaciones y sobre ella ya

no se identifican variaciones en el viento entre los experimentos LULCC y CTRL. Como se puede ver, no hay diferencias entre los dos experimentos para la radiación neta, el calor sensible y el calor latente, lo que indicaría que el efecto de advección identificado para las otras estaciones que están cerca del cuerpo de agua podría ser el causante de las variaciones identificadas en ellas. Por otra parte, para la humedad relativa y la relación de mezcla de vapor de agua, se identifican pequeñas variaciones entre los dos experimentos, que en general representan cambios de alrededor 1%.

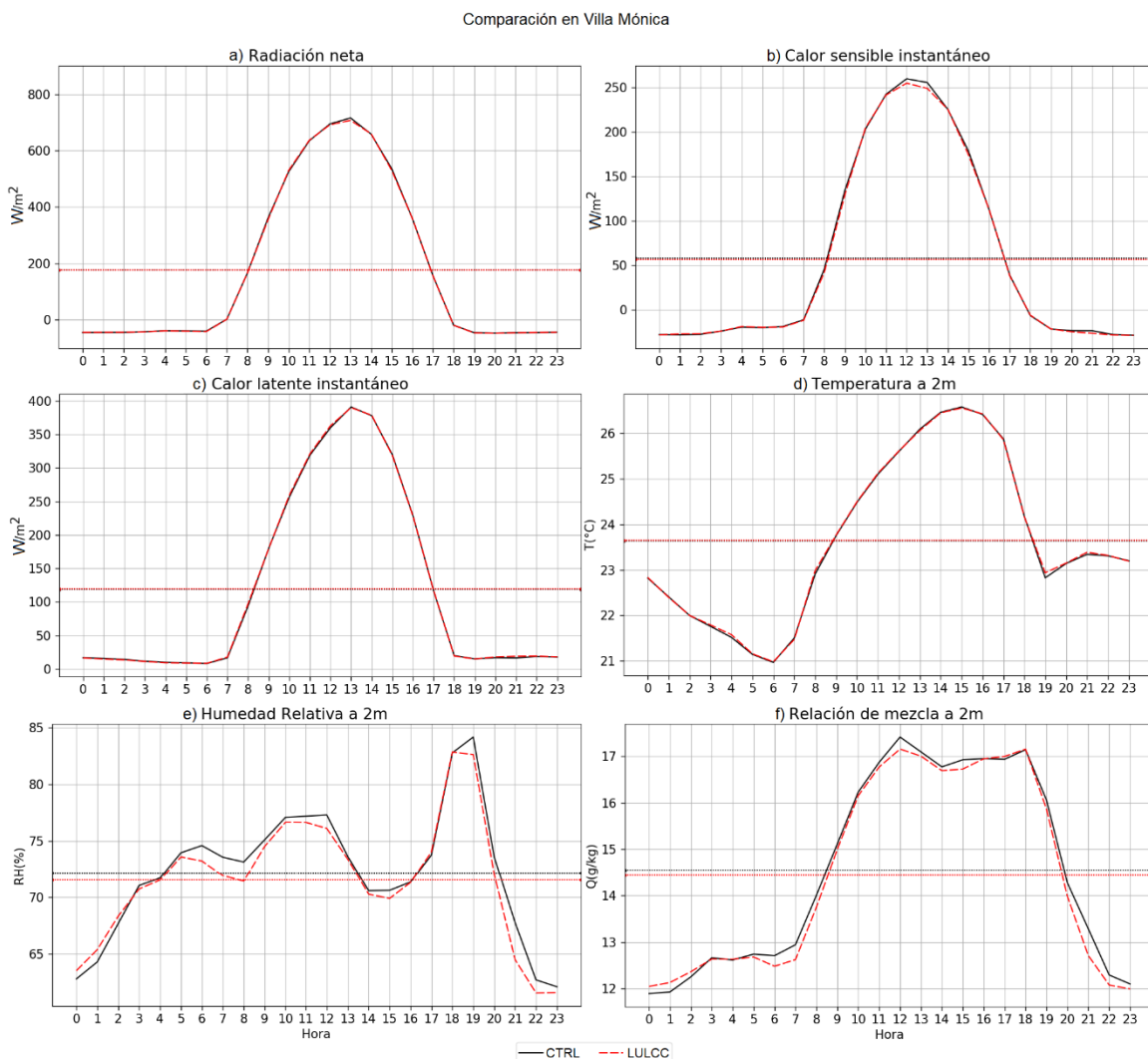


Figura 6.14. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación Villa Mónica a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla de vapor de agua a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja a rayas el experimento LULLC. La línea negra punteada representa el valor promedio para el experimento CTRL y la línea roja punteada el valor promedio para el experimento LULCC 6.3.3. Cambios en la región de influencia del embalse

Finalmente, en la Figura 6.15 se presenta el cambio total en el experimento LULCC con respecto a CTRL, para la velocidad del viento, la temperatura a 2m, el contenido de humedad a 2m y la humedad relativa a 2m. Como se puede ver, la variable que presenta los mayores cambios es la velocidad del viento, que sobre la zona del embalse tiene un aumento total de 85,04%, pasando de un valor medio de 1.08 a 1.99 m/s. Este cambio estaría relacionado con la disminución en la rugosidad que representa la nueva cobertura (ver Tabla 6.1). En las zonas de las estaciones más cercanas al cuerpo de agua

(Cedral, La Estrella, El Marqués, y La Parroquia), donde no se tiene un cambio en la cobertura en el experimento LULCC, los vientos también reflejan un cambio total que indica un aumento. Por ejemplo, en la zona de La Estrella se tiene un cambio en los valores medios de 1.12 a 1.20 m/s, lo que representa un aumento de 7.96% en la velocidad del viento. Por otra parte, en la zona de Villa Mónica, la más alejada de la máscara del embalse, el viento presenta variaciones muy pequeñas entre los experimentos, con apenas un cambio porcentual de 0.02%. Además, en las zonas de las estaciones Guaimaral y El Placer, el cambio total sugiere una disminución de 1.71 a 1.69 m/s para a zona de Guaimaral, que representa un 1.45% y de 1.86 a 1.80 m/s en la zona de El Placer, que representa 3.61%. Particularmente, en estas dos estaciones también se tienen momentos del día en los que la velocidad de los vientos es mayor en el experimento LULCC que en CTRL (no mostrado).

Para la temperatura a 2m se tiene un cambio en los valores sobre el embalse de 27.31 a 27.75 °C, para un aumento porcentual de 1.59%. Este valor es el más alto para las zonas analizadas. Para el resto de las zonas de interés, se tienen aumentos en Cedral, La Estrella, La Parroquia, El Placer y Villa Mónica, aunque en estas tres últimas zonas el aumento es menor al 0.1% (ver Figura 4.1), y disminuciones en las zonas de El Marqués y Guaimaral. De los cambios en estas zonas (sin tener en cuenta el cambio en el sitio “Embalse”), el aumento total de mayor magnitud se observa en La Estrella, que pasa de un valor medio de 26.84°C a un valor medio de 26.96°C, lo que representa un cambio porcentual de 0.46%. Así, como se había mencionado, los cambios tienen una diferenciación a lo largo del día, y en la zona de La Estrella los cambios más grandes se tienen en la mañana, alrededor de las 7 am, con un aumento porcentual de 3%, y en la tarde, alrededor de las 2 pm, con una disminución de 2%. A pesar de esto, se puede identificar un efecto neto de la presencia del embalse que sugiere un pequeño calentamiento en la zona de esta estación.

Para el cambio total en la relación de mezcla de vapor de agua a 2m (contenido de humedad), se tienen aumentos en las zonas de Embalse, Cedral, La Estrella, El Marqués y La Parroquia, mientras que en las otras estaciones se tiene una disminución. Todos los cambios son menores al 1%. Particularmente, es de interés la forma del cambio para la relación de mezcla de vapor de agua (contenido de humedad), al ver el cambio para la zona de las estaciones La Estrella y Embalse. En el sitio Embalse (Figura 6.11f) se tiene un aumento en el contenido de humedad, principalmente en las horas de la tarde, con un máximo a las 6pm en el experimento LULCC, que representa un aumento de 14% con respecto a CTRL, según se ha discutido en este análisis. Por su parte, en el resto del día no se tienen muchas diferencias; así el cambio total de humedad representa un aumento del 0.52%. Por otra parte, en la zona de la estación La Estrella no hay un momento del día específico en el que se tenga un aumento considerable, como el observado a las 6 pm en la zona del embalse (ver Figura 6.12). El mayor aumento se da a las 2pm y representa un incremento del 2.7%. A diferencia de la zona del embalse, el contenido de humedad en la zona de La Estrella para el experimento LULCC es mayor que en CTRL durante la tarde, la noche y la madrugada, lo que representa un aumento total de 10.01%. Esto estaría relacionado con el comportamiento acelerado de los vientos en el experimento LULCC y un transporte de humedad desde la zona del embalse hacia la zona de esta estación.

Para la humedad relativa, los cambios más grandes se tienen sobre la zona del embalse y corresponden a una disminución en los valores medios de 73.78 a 71.85%, para una disminución de 2.62%. Esta disminución se debe a que, aunque la temperatura y el contenido de humedad aumentan sobre esta zona, el aumento en la temperatura es más representativo y termina por dominar el comportamiento de la humedad relativa. Para el resto de las zonas, se tiene un aumento en La Estrella, El Marqués, La Parroquia y Guaimaral, mientras que en las zonas de Cedral, El Placer y Villa Mónica se presentan disminuciones. Particularmente, el cambio para La Estrella es de 0.06%, lo que indica que los valores

permanecen muy similares entre simulaciones, y que los aumentos en temperatura y contenido de humedad se dan de forma tal que no se ve modificada la humedad relativa. De las zonas en que aumenta la humedad relativa, el cambio más grande se da en El Marqués, donde se aumenta de valores medios de 69.02 a 69.46%, para un aumento del 0.64%. Este comportamiento de la humedad relativa en esta zona estaría explicado por la disminución de la temperatura y el aumento del contenido de humedad mencionados anteriormente. Para las zonas en que disminuye esta variable, el cambio más grande se da en Villa Mónica, con una reducción en los valores medios de 72.20 a 71.58%, para una disminución del 0.86%, comportamiento que estará explicado por el cambio en el contenido de humedad, ya que la temperatura no varía entre simulaciones.

Así, se puede identificar que, de manera generalizada, los cambios más grandes en las variables meteorológicas cercanas a la superficie (temperatura, contenido de humedad y humedad relativa a 2m), así como la velocidad del viento, se dan en la zona donde exclusivamente se da el cambio de cobertura, correspondiente a la zona embalse. De estas variables, la que más se ve modificada es la velocidad del viento, que en la zona del embalse aumenta aproximadamente un 85% y en las zonas cercanas puede presentar variaciones de hasta aproximadamente 10% (para el caso de Cedral). Para el resto de las variables, los cambios más grandes se identifican en las zonas cercanas al cambio de cobertura (La Estrella, El Marqués y La Parroquia), aunque se destaca también que estos cambios son pequeños y solo con excepción del contenido de humedad en la zona de La Estrella, todos se encuentran por debajo de 1%.

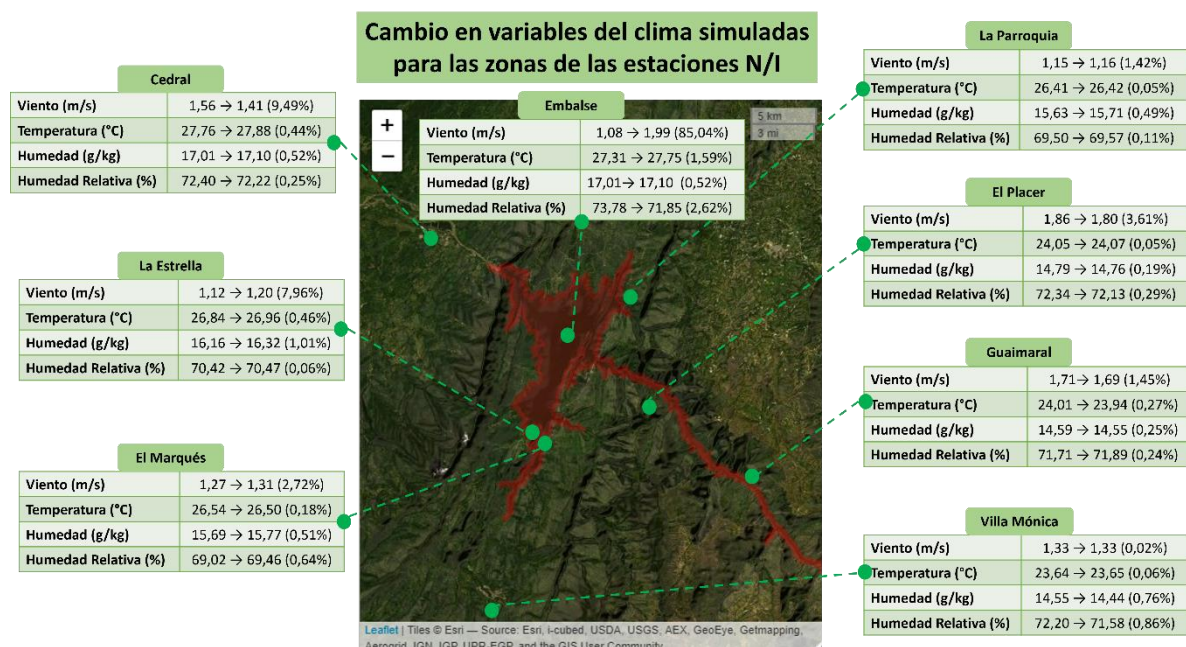


Figura 6.15. Cambio en las variables velocidad del viento (m/s), temperatura (°C), contenido de humedad (g/kg) y humedad relativa (%) entre los experimentos LULCC y CTRL para las estaciones N/I ubicadas en el área de influencia del embalse

6.3.4. Cambios en algunas variables del balance de energía en la capa límite

En esta sección se expone el análisis para las secciones transversales presentadas en la Figura 6.1 para las variables temperatura potencial (Th) (y temperatura), relación de mezcla de vapor de agua y humedad relativa. Como se mencionó, esto se realiza para tener una idea más allá de la superficie de los posibles impactos que genera el cambio de cobertura en el área de influencia.

En las Figura 6.16 y Figura 6.17 se presentan las diferencias entre experimentos (LULCC - CTRL) en las variables a las 6 am para la sección transversal A (Figura 6.16) y para la sección transversal B (Figura 6.17). En el panel a) de ambas figuras se muestra la variable relación de mezcla de vapor de agua. En la Figura 6.16a se puede ver que en la zona del embalse se tiene más contenido de humedad en el experimento LULCC que en CTRL. También se puede ver que este aumento en la humedad se da desde la superficie hasta aproximadamente una altura de 1000 msnm. También se puede ver que los contornos que representan el aumento en la humedad se extienden hasta las laderas, llegando hasta la zona de las estaciones La Estrella (marcador 1) y La Parroquia (marcador 2). En la Figura 6.17a se puede ver que sobre la zona del embalse se tiene más humedad (contornos azules), y que esta humedad se extiende hacia la izquierda de la sección transversal, en dirección noroeste, pasando por la zona de la estación Cedral (marcador 3). Este desplazamiento de los contornos de humedad tiene la misma dirección de los vientos en superficie (ver Figura 6.17d), lo que indicaría que hay transporte de humedad del embalse hacia la zona noroeste debido a la circulación de los vientos. Además, esta humedad adicional se observa hasta aproximadamente 1000 msnm. En el panel b) en ambas figuras se muestra el cambio en la temperatura potencial (T_h) (los cambios son similares para la temperatura). En la Figura 6.16b se identifica que en la zona del embalse se tiene una temperatura potencial más elevada para el experimento LULCC que para CTRL, lo que sugiere que en este paso de tiempo se tiene un perfil menos estable en el experimento que considera el embalse, justamente sobre la ubicación de este cuerpo de agua. Es importante resaltar que el paso de tiempo analizado en la Figura 6.16 es las 6 am, momento en el que aún se tiene un perfil vertical estable con respecto a otros momentos del día. Con respecto a la temperatura, el cambio entre experimentos es de aproximadamente $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre la superficie y aproximadamente los 600 m. Esta temperatura más elevada en el experimento LULCC abarca la región que incluye a las estaciones La Estrella (marcador 1) y La Parroquia (marcador 2). Además, el cambio en la temperatura se extiende aproximadamente hasta los 1000 msnm, pero con menor magnitud, de hasta $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la Figura 6.17b se puede ver que este aumento en la temperatura no se extiende en el sentido noroeste hasta la zona de la estación Cedral y que está restringido a la zona del embalse. En cuanto a la magnitud del cambio sobre el transecto B, se puede ver la misma disminución con la altura y que también llega hasta 1000 msnm. En el panel c) de ambas figuras se presenta la humedad relativa. En la Figura 6.16c se puede ver que el mayor cambio para esta variable se presenta en la zona del embalse y hacia la estación La Parroquia (marcador 2). Este cambio estaría condicionado por el aumento en la temperatura y el hecho de que el aumento en la relación de mezcla de vapor de agua en superficie no se observa en la zona de la estación La Parroquia. Para alturas mayores, se notan contornos similares a los que se pueden ver en la Figura 6.16a, indicando que el cambio en la humedad relativa está dominado por el contenido de humedad a mayores niveles de altura. Esto también se observa en la Figura 6.17c. La humedad relativa desde la superficie hasta aproximadamente 600 msnm sobre la zona del embalse está dominada por el cambio en la temperatura. Se observa una disminución de aproximadamente 5%, mientras que en la zona de la estación Cedral y a alturas mayores, se tiene el mismo comportamiento que en la relación de mezcla de vapor de agua, indicando que es el contenido de humedad el que domina el comportamiento de la humedad relativa.

Sección transversal A, d04-0.333 km
 Fecha: 2013-01-01_11:00 UTC
 Hora Local: 06:00

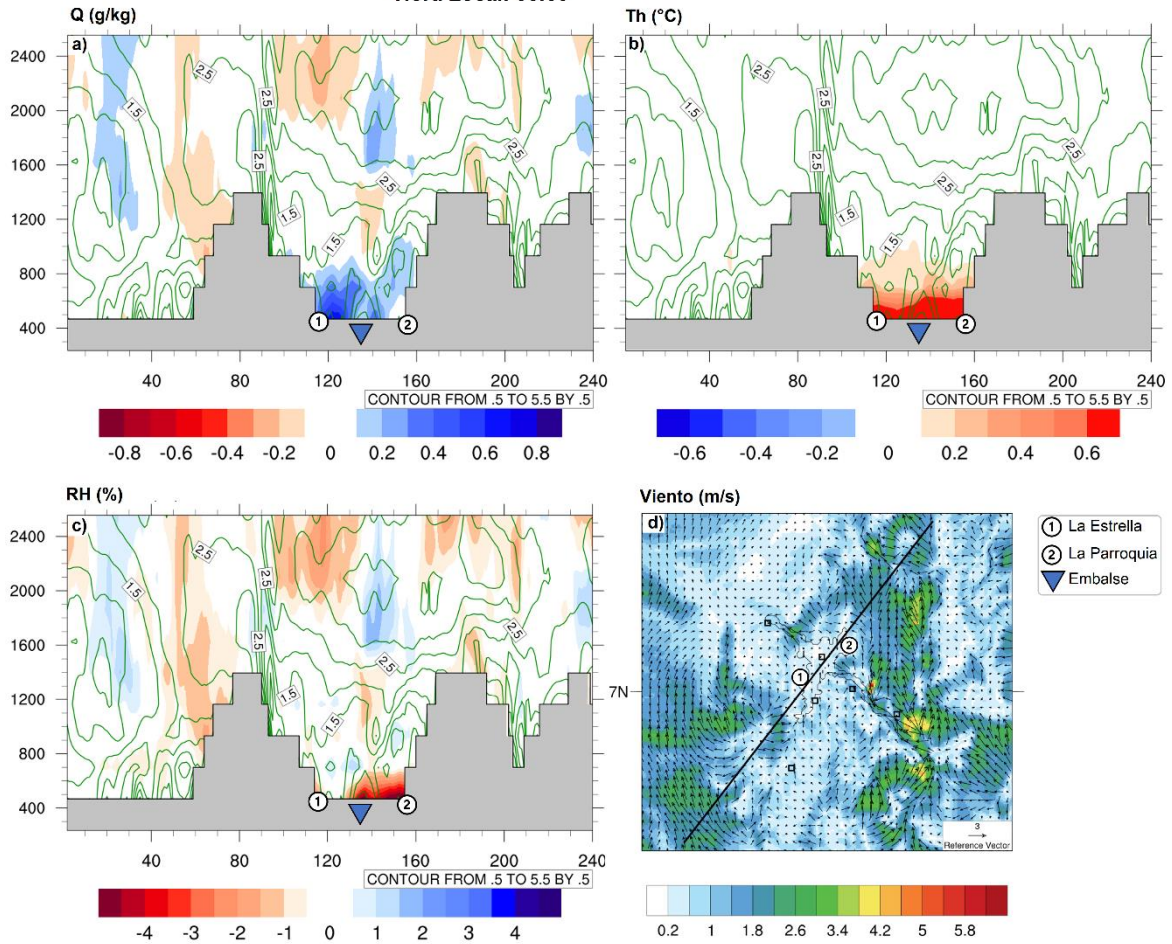


Figura 6.16. Sección transversal A a las 6 qm para las variables a) relación de mezcla de vapor de agua, b) temperatura potencial y c) humedad relativa. La línea en el panel d) tiene representa la sección transversal y los vectores corresponden a los vientos horizontales con el objetivo de ayudar en la interpretación de la dirección de los vientos en la vertical representados por los contornos verdes en los paneles a), b) y d)

Sección transversal B, d04-0.33 km
 Fecha: 2013-01-01_11:00 UTC
 Hora local: 06:00

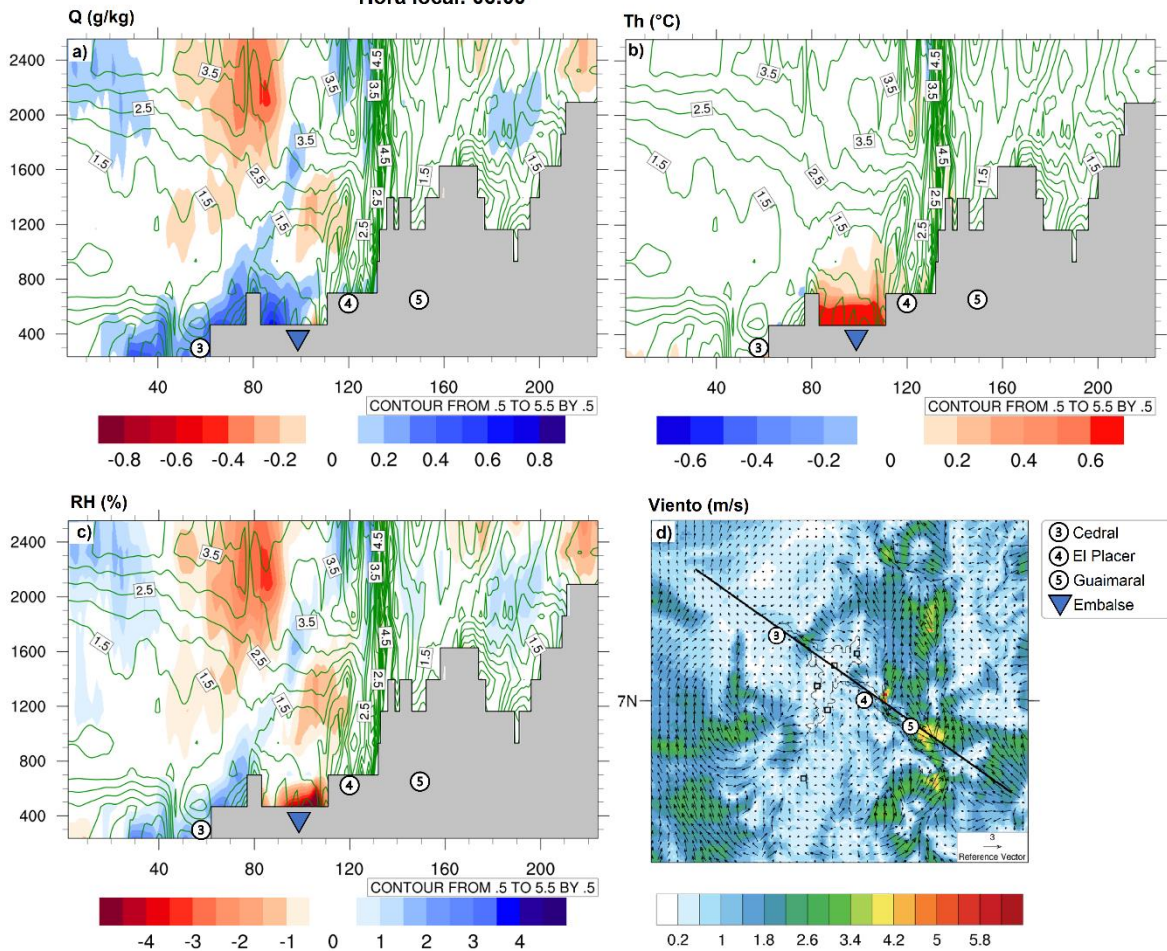


Figura 6.17. Sección transversal B a las 6 qm para las variables a) relación de mezcla de vapor de agua, b) temperatura potencial y c) humedad relativa. La línea en el panel d) tiene representa la sección transversal y los vectores corresponden a los vientos horizontales con el objetivo de ayudar en la interpretación de la dirección de los vientos en la vertical representados por los contornos verdes en los paneles a), b) y d)

En la Figura 6.18 y Figura 6.19 se presentan las diferencias entre los experimentos (LULCC - CTRL) en las variables a las 2 pm para la sección transversal A (Figura 6.18) y la sección transversal B (Figura 6.19). En la Figura 6.18a se identifica que el cambio superficial en la relación de mezcla de vapor de agua en la zona del embalse se encuentra dividido en aumentos entre 0.4 y 0.6 g/kg hacia la zona de la estación La Estrella (marcador 1) y disminuciones de alrededor de 0.2 g/kg hacia la zona de la estación La Parroquia. Esto no es lo esperado para esta sección, pues en la Figura 6.7d no se identifican reducciones cerca de la superficie; por el contrario, se observan aumentos de hasta 0.8 g/kg cerca de la superficie en toda la zona delimitada por el embalse para este paso de tiempo (2 pm). Por otra parte, en las dos laderas que dan hacia el cuerpo de agua, se identifican aumentos de la humedad de alrededor de 0.4 g/kg, que se extienden en la vertical hasta aproximadamente 1500 msnm. Además, se identifican disminuciones de esta variable entre los 1600 y 2400 msnm. Para este paso de tiempo, la disminución de humedad en la altura podría deberse a que, como se discute a continuación, se tiene un perfil menos inestable debido a la diferencia en la temperatura potencial, lo que inhibiría la mezcla en la vertical. Lo anterior podría generar condiciones más secas en los niveles superiores en el experimento LULCC con respecto a CTRL, a pesar de tener aparentemente más

humedad en la superficie hacia la zona de La Estrella, según indica la Figura 6.18a, y en toda la zona delimitada del cuerpo de agua, según indica Figura 6.7d. En la Figura 6.19a se identifica un pequeño contorno que indica un aumento superficial de la temperatura potencial cerca de la zona del embalse, de aproximadamente 0.2 g/kg. Por otra parte, lo más notable en esta figura es la disminución en la humedad observada a partir de los 1000 msnm en la zona en la que está ubicado el embalse, y que se extiende hacia el sureste, abarcando todos los niveles en la vertical presentados en la figura. Se observan disminuciones de hasta 0.8 g/kg para la zona cercana a la estación Guaimaral (marcador 5). Como se mencionó, esto se podría deber a la estabilidad causada por una menor temperatura potencial, como se discute a continuación. En la Figura 6.18b) se puede observar que el experimento LULCC tiene una temperatura potencial más fría con respecto a CTRL para la zona superficial sobre el embalse, y que esta menor temperatura se extiende hacia las laderas noreste y suroeste de la ubicación del cuerpo de agua. Lo anterior significa un perfil vertical menos inestable, es decir, con menor mezcla en la vertical con respecto al experimento CTRL, lo que dificulta que la humedad llegue desde la superficie hasta los niveles superiores de la vertical. Por otra parte, teniendo en cuenta el caso de la temperatura, este aire más fresco alcanza las zonas de La Estrella (marcador 1) y de La Parroquia (marcador 2). El mayor cambio de temperatura se observa cerca de la superficie, extendiéndose hasta aproximadamente 800 msnm en ambas laderas, donde las temperaturas son aproximadamente 0.6 °C menores en el experimento LULCC. Este cambio se hace gradualmente menor a medida que se aleja de la superficie, hasta aproximadamente los 1600 msnm, donde la temperatura en el experimento LULCC es aproximadamente 0.2 °C menor que en CTRL. Para la sección transversal B se puede identificar que las temperaturas más frías se extienden superando los límites del embalse hacia el sureste, llegando casi hasta la localización de la estación Guaimaral (marcador 5), lo que refuerza nuestra hipótesis de una mayor estabilidad que impide la mezcla de la humedad en la vertical, generando así una disminución de la humedad en los niveles más altos. Cerca de la ubicación de la estación El Placer (marcador 4), se puede ver que la diferencia en la temperatura se observa hasta aproximadamente 1600 msnm, siendo 0.2°C menor para el experimento LULCC. En la Figura 6.18c se muestra la diferencia de humedad relativa para la sección transversal A. En esta se puede identificar un comportamiento similar al de las variables relación de mezcla de vapor de agua y temperatura. Particularmente, se tiene un aumento en la humedad relativa, con una forma similar a la que se identifica para la disminución en la temperatura que se extiende sobre las laderas del noreste y suroeste, alcanzando la ubicación de las estaciones La Estrella y La Parroquia (marcadores 1 y 2, respectivamente). Específicamente en la zona de las laderas, se tienen aumentos en la relación de mezcla de vapor de agua y disminución en la temperatura, lo que explica los aumentos en la humedad relativa, de entre 3 y 4%. Cerca de la superficie del embalse, se tiene un aumento de 1 y 2%, el cual también es consecuente con los cambios en el contenido de humedad y la temperatura. En la Figura 6.19c se puede ver que cerca de la superficie del embalse y hasta la zona de la estación El Placer (marcador 4), se tienen aumentos en la humedad relativa, de entre 2 y 3%. En la altura, se pueden identificar cambios mixtos entre aumentos y disminuciones de humedad relativa, relacionados con el comportamiento de la relación de mezcla de vapor de agua, puesto que la temperatura no tiene cambios en la altura, indicando que el contenido de humedad domina los cambios en la humedad relativa para estos niveles de la vertical.

Sección transversal A, d04-0.333 km
 Fecha: 2103-01-01_19:00 UTC
 Hora local: 14:00

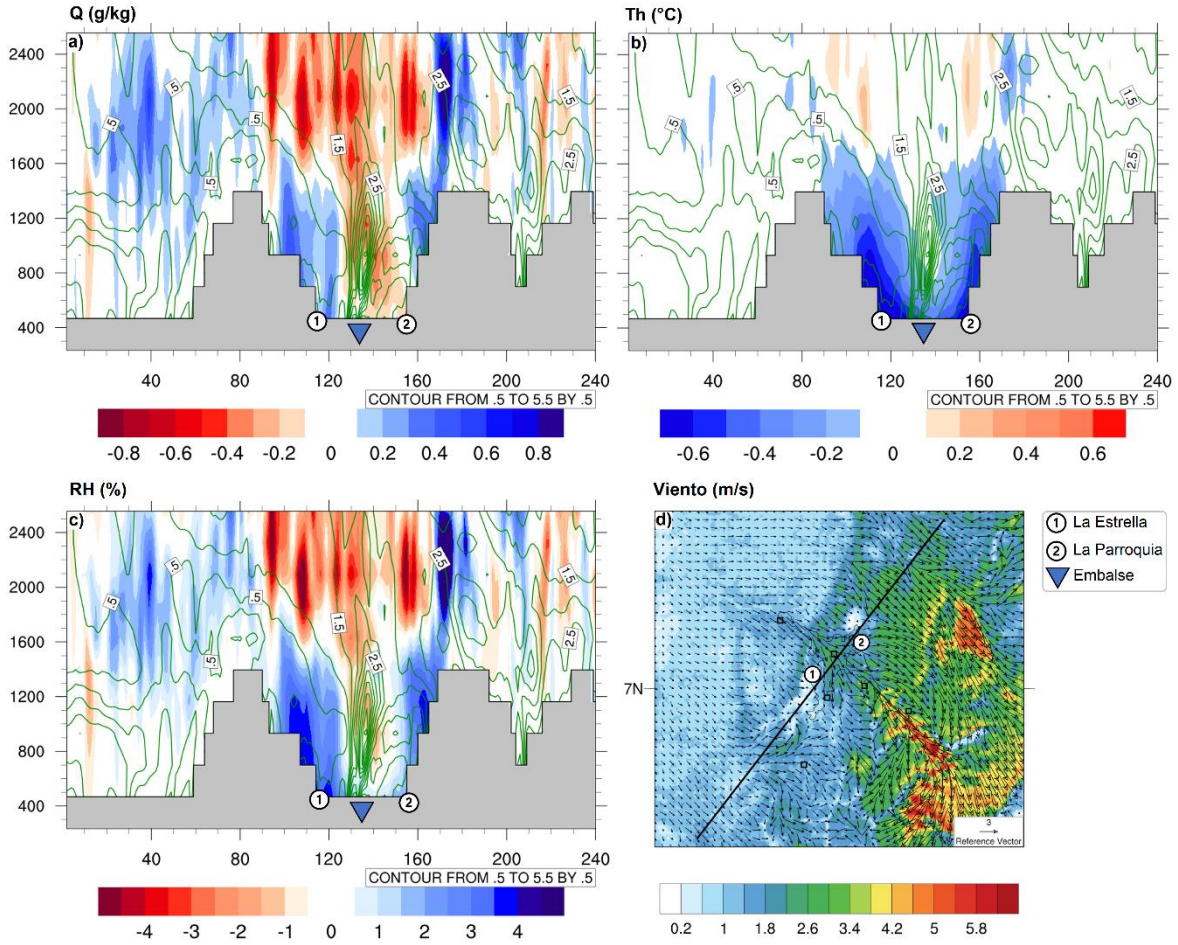


Figura 6.18. Sección transversal A a las 2 pm para las variables a) relación de mezcla de vapor de agua, b) temperatura potencial y c) humedad relativa. La línea en el panel d) tiene representada la sección transversal y los vectores corresponden a los vientos horizontales con el objetivo de ayudar en la interpretación de la dirección de los vientos en la vertical representados por los contornos verdes en los paneles a), b) y d)

Sección transversal B, d04-0.333 km
 Fecha: 2013-01-01_19:00 UTC
 Hora local: 14:00

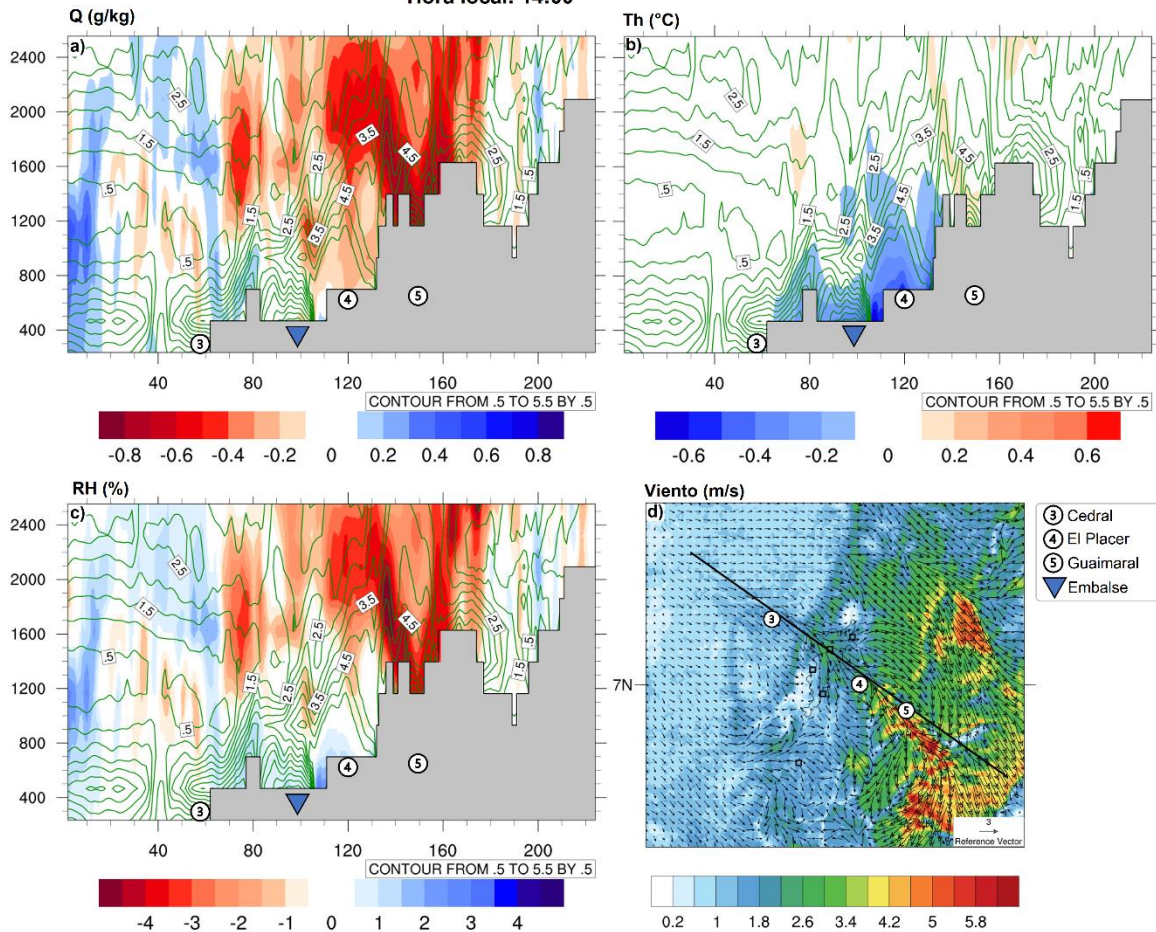


Figura 6.19. Sección transversal B a las 2 pm para las variables a) relación de mezcla de vapor de agua, b) temperatura potencial y c) humedad relativa. La línea en el panel d) tiene representada la sección transversal y los vectores corresponden a los vientos horizontales con el objetivo de ayudar en la interpretación de la dirección de los vientos en la vertical representados por los contornos verdes en los paneles a), b) y d)

6.4. Discusión y conclusiones

Los resultados de las simulaciones de alta resolución (~ 300 m) considerando la presencia del embalse Topocoro pueden ser comparables con lo encontrado por Degu et al. (2011), quienes analizaron 92 embalses en Estados Unidos mediante datos de reanálisis. Estos autores analizan la variación de diferentes variables atmosféricas con respecto a la distancia a cada embalse. Por su parte, este Trabajo de Investigación considera dos escenarios: uno asociado a la cobertura original en la región de estudio y otro que considera la presencia del embalse. Degu et al. (2011) exponen que las variables humedad específica, evaporación y CAPE (las últimas dos no son tenidas en cuenta en nuestra investigación) tienen variaciones en relación con la distancia al cuerpo de agua, pero estas variaciones dependen del tipo de clima, encontrando que para un clima húmedo subtropical, no se identifican grandes variaciones. Nuestro estudio, correspondiente a una región tropical, sugiere que la presencia del embalse no genera cambios significativos en la relación de mezcla de vapor de agua. Los cambios de la relación de mezcla de vapor de agua en las zonas cerca del embalse identificados en nuestra investigación sugieren cambios totales de aumentos de hasta 1% con respecto a las condiciones sin

embalse. Por su parte, Degu et al. (2011) también reportan cambios pequeños en esta variable para diferentes distancias con respecto al cuerpo de agua, en embalses localizados en un clima húmedo subtropical.

Para el embalse de las tres gargantas en China, Song et al. (2017) encuentran que el comportamiento de la temperatura está dominado, entre otras cosas, por una dinámica en el forzamiento entre la disminución del albedo y el aumento en los flujos de calor latente, ocasionados por el agua del embalse, por lo que en los meses de verano, la temperatura es menor debido a que aumentan los flujos de calor latente, mientras que en invierno, la temperatura es más cálida. Esta dinámica se basa en que uno de los impactos claros del cuerpo de agua es un aumento en la evaporación, lo cual no ocurre en todas las localizaciones y climas, como lo mencionan Degu et al. (2011) y como se puede identificar en los experimentos llevados a cabo por Winchester et al. (2017), quienes realizan experimentos cambiando el agua de los lagos por otras coberturas. Particularmente, en sus experimentos, la cobertura de bosque tiene un mayor flujo de calor latente, en promedio, que la cobertura original de lagos. Lo anterior es similar a lo identificado en nuestra investigación, pues los flujos de calor latente en la zona del embalse son menores en el experimento LULCC (con presencia de embalse) que en CTRL (con coberturas originales sin embalse) (ver Figura 6.11). Además, Winchester et al. (2017) identifican que, para las horas de la mañana, los flujos de calor latente son mayores para el agua que en las coberturas ubicadas en los alrededores del cuerpo de agua y que en los otros escenarios con coberturas terrestres, lo cual también concuerda con el comportamiento del flujo de calor latente observados en nuestras simulaciones (ver Figura 6.6). De esta manera, la dinámica entre el cambio en el albedo y los cambios en el flujo de calor latente dependiendo de la temporada reportada por Song et al. (2017) no constituyen un factor general que domine los impactos generados en la temperatura con la ubicación de un embalse.

Así, los impactos de un embalse estarían condicionados por el lugar en que se instala y el clima de ese lugar, pues el clima y las coberturas preexistentes pueden condicionar la ocurrencia de un cambio en los flujos de calor latente y/o sensible. Además, la topografía del lugar también es importante, pues determina la circulación de los vientos. Como muestran nuestros resultados, parte de los impactos que sobrepasan la máscara del embalse ocurren por transporte (e.g. de humedad) asociado a los vientos (advección). Así, los impactos que ocurren cerca del área de cualquier embalse deberían, en principio, estar relacionados con la topografía y su efecto en los vientos. Además, se observan impactos esperados, como la disminución del albedo, la atenuación del ciclo diario de temperatura, y la aceleración de los vientos, debido a las características físicas de la superficie que se modifica. Sin embargo, los mecanismos que generan advección, así como la dirección del transporte, dependerán de la topografía, mientras que los cambios en los flujos de calor latente dependerán de las coberturas reemplazadas y el clima del lugar, pues pese a tener una superficie de aguas abiertas disponible, los flujos de calor latente no necesariamente aumentan en nuestras simulaciones con embalse.

Particularmente, los mayores cambios que identificamos se dan específicamente en el lugar donde se ubica el cuerpo de agua, y no tanto en los alrededores: (i) disminución en el albedo de aproximadamente 60% (0.2 a 0.08), (ii) disminución en la amplitud del ciclo diario de temperatura, con aumentos en los valores mínimos de hasta 16.78% (22.78°C a 26.60°C) en la mañana y disminuciones en los valores máximos de hasta 10% (31.55°C a 28.28°C) para el medio día, y (iii) aceleraciones en los vientos de aproximadamente 301% (0.45 m/s a 1.86 m/s) para las horas de la mañana. En las zonas de las estaciones (i.e. sobre tierra), los cambios son menores. La atenuación del ciclo diario de temperatura se observa en la zona de las estaciones La Estrella, El Marqués, La

Parroquia, y El Placer, donde se identifica que llegan los vientos acelerados desde el cuerpo de agua. De estas estaciones, La Estrella presenta el impacto más grande al ciclo diurno de temperatura, con aumentos en las temperaturas mínimas de hasta 2.9% (23.58°C a 24.26°C) y disminuciones en las máximas de hasta 2% (30.6°C a 30°C). Además, La Estrella también es la zona por fuera del embalse con mayores aumentos en los vientos, de hasta 55% (0.61 m/s a 0.95 m/s) para un momento en la madrugada.

Por otra parte, se identifica que dentro de los posibles cambios generados por el embalse se encuentra la modificación de la estabilidad atmosférica en la vertical. Principalmente, las modificaciones en la temperatura potencial indican que la presencia del embalse generaría una atmósfera menos estable en la mañana para LULCC con respecto a CTRL, debido a las temperaturas más cálidas que se extienden desde el cuerpo de agua hasta aproximadamente 800 msnm. Por otra parte, las simulaciones muestran que el embalse genera un perfil vertical menos inestable en la tarde para LULCC con respecto a CTRL, pues las temperaturas más frescas del cuerpo de agua en estos momentos del día se extienden hasta aproximadamente 1200 msnm.

Capítulo 7: Discusión y conclusiones generales

En este Trabajo de Investigación se buscó responder a la pregunta ¿qué variaciones en variables representativas del clima local pueden asociarse al cambio de cobertura relativo a la presencia de un embalse en una región tropical? En particular, este estudio se centra en el embalse Topocoro, ubicado en el departamento de Santander en Colombia. Para ello, se desarrollaron análisis basados en información de estaciones in situ y satelitales, así como simulaciones regionales de alta resolución.

Este Trabajo de Investigación se fundamentó en el balance de energía superficial como herramienta principal para tratar de comprender el impacto que puede generar el llenado del embalse y se utilizaron dos metodologías para llegar a una aproximación a la respuesta de la pregunta de interés: (i) a partir del análisis de observaciones de estaciones y sensores remotos; y (ii) a partir del desarrollo de experimentos de modelación. Ambas aproximaciones, i.e. el uso de observaciones y modelación, han sido usadas en diferentes investigaciones para atender a inquietudes relacionadas con cambios de cobertura (e.g. Degu et al., 2011; Hossain et al., 2012; Woldemichael et al., 2012; Woldemichael et al., 2014; Cerón et al., 2021).

Para el análisis basado en observaciones, se utilizaron datos de estaciones meteorológicas en el área de influencia del embalse Topocoro (estaciones N/I), así como en localizaciones en una escala más regional, para estaciones nacionales por fuera del área de influencia del embalse, en la región Andina particularmente. También se usó información del índice ONI para tener en cuenta la ocurrencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), al ser uno de los modos de variabilidad dominantes de la hidroclimatología colombiana a escala interanual (e.g. Poveda, 2004). Además, para complementar la información superficial, se usaron datos de sensores remotos de albedo, provenientes del producto MODIS MCD43A3 (Schaaf & Wang, 2015).

Para complementar el análisis observacional, esta investigación desarrolló simulaciones atmosféricas regionales con el modelo WRF (Skamarock et al., 2021) considerando experimentos para dos escenarios, uno con las coberturas originales del modelo (CTRL) y otro cambiando dichas coberturas por el embalse (LULCC), con el objeto de identificar las principales diferencias en las variables superficiales y verticales relacionadas con el balance de energía y el clima del lugar, asociadas a la presencia del embalse.

La información obtenida desde las observaciones tiene sus limitaciones, tanto por la cantidad de variables disponibles como por el periodo de registro cubierto por observaciones. Por una parte, las variables disponibles de observaciones no son suficientes para hacer un seguimiento detallado del balance de energía, en cuanto que no se tiene información disponible para cada uno de sus términos, lo que evita identificar las causas de las variaciones en las variables e identificar el factor causante de esas variaciones. Además, los registros disponibles para la región de estudio tienen una extensión temporal limitada con respecto al momento antes del llenado del embalse, con solo dos años de datos disponibles. Por esta razón, se hizo uso de la información para las estaciones en otras localizaciones más alejadas del cuerpo de agua, que además permite extender el rango temporal de análisis. Si bien las estaciones por fuera del área de influencia no permiten identificar directamente posibles impactos causados por el embalse, permiten identificar si hay señales de variaciones que ocurren dentro y fuera del área del embalse, al compararlas con la información de las estaciones N/I, i.e. al identificar variaciones similares que ocurren en ambas bases de datos. Además, como estas estaciones tienen una mayor extensión temporal, permiten identificar otros cambios de ese tipo en las series de tiempo, i.e. variaciones asociadas al ENSO para eventos de los que no se tiene registro en las estaciones N/I.

De esta manera, los datos para las observaciones, más allá de la identificación de cambios y su atribución a la presencia del embalse, se usaron para identificar cambios importantes que no son atribuibles al embalse en primera instancia. Como discuten Hossain et al. (2012), atribuir la causalidad de un cambio al llenado de un embalse es altamente complejo (similar para cualquier cambio de cobertura llevado a cabo por el ser humano), pues existe una gran cantidad de interacciones que no son inducidas por el embalse. Por esta razón, esta investigación buscó relacionar las variaciones de temperatura y humedad relativa en la región con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, identificando que por lo menos el 50% de la varianza de estas variables, para los grupos de estaciones empleados, se debe a la ocurrencia de eventos ENSO. Esto deja un 50% restante de la varianza de estas variables en la región que estaría relacionado con otras interacciones, dentro de las cuales podría estar un impacto generado por el embalse. Particularmente, luego de remover la señal del ENSO en los datos, también se encuentran variaciones en la temperatura para las estaciones N/I, aunque generalmente la magnitud del cambio es menor con respecto al cambio en las series originales.

El análisis de otras variables observadas en las estaciones meteorológicas, como radiación incidente y precipitación, indica que, en general, no hay variaciones significativas en el área de influencia del embalse para los periodos de registro de las estaciones, con lo que se concluye que no ha habido un cambio entre los periodos Antes y Después del llenado del embalse. Es importante resaltar que la estación Cedral, que reporta cambios significativos en radiación incidente y precipitación, está ubicada al otro lado de la presa y alejado del cuerpo de agua.

Un cuerpo de agua es una superficie menos rugosa que las coberturas originales de vegetación, por lo cual un cambio entre las dos coberturas tiene potencial para cambiar la velocidad de los vientos. Precisamente, para algunas de las estaciones N/I se logró identificar aceleración en los vientos entre los periodos Antes y Después del llenado del embalse, por lo que el cambio de cobertura y la aceleración de los vientos podrían estar relacionados. En principio, estos cambios podrían estar relacionados con una disminución de la rugosidad, por lo que la fricción generada por la superficie disminuye, generando una aceleración de los vientos. De esta manera, los vientos acelerados pueden adveccionar energía y humedad hacia las zonas cercanas sobrepasando el cuerpo de agua.

El análisis de los datos satelitales de MODIS permitió identificar que el embalse genera un cambio drástico del albedo en el lugar que queda inundado, con una disminución de cerca del 85%. En las coberturas alrededor del área de influencia también se presentan disminuciones, de máximo 15% en algunas de las zonas como El Marqués, y que pueden estar relacionadas con variaciones/cambios particulares de las coberturas en cada sitio.

De este modo, la información observacional permite concluir que después del llenado del embalse no se identifican cambios generalizados en el área de influencia para las variables relacionadas con el balance de energía de las que se tienen información, como radiación incidente y precipitación (que se relaciona con los flujos de calor latente), mientras que para el albedo, que modificaría las cantidades de radiación neta, se tienen modificaciones en los sitios de todas las estaciones, pero estos pueden estar relacionados con cambios particulares del uso del suelo en el lugar de cada estación. Por otra parte, para variables como temperatura y humedad relativa se tiene que las variaciones más drásticas estarían explicadas, en al menos un 50%, por la ocurrencia de eventos ENSO, lo que deja un porcentaje de contribución por parte de otras variaciones, relacionado con otra gran cantidad de interacciones.

Los experimentos de simulación también indican que, al introducir un cuerpo de agua, los cambios más drásticos se generan específicamente en la zona inundada. Gracias a la disponibilidad de

variables entregadas por las simulaciones realizadas, este Trabajo de Investigación pudo identificar que en la zona del cuerpo de agua se da (i) disminución en el albedo de aproximadamente 60% (0.2 a 0.08), (ii) aceleraciones en los vientos de hasta 301% (0.45 m/s a 1.86 m/s) para momentos en la mañana, y (iii) variaciones en la temperatura a lo largo del día, con aumento de los valores mínimos de hasta 16.78% (22.78°C a 26.60°C) y disminución de los valores máximo de 10% (31.55°C a 28.28°C). Por otra parte, se pudo identificar que, contrario a lo que se esperaría para un cuerpo de agua (que es una fuente directa de evaporación), los cambios en flujos de calor latente son diversos a lo largo del día, encontrando un aumento del flujo de calor latente desde la cobertura del embalse solamente en horas de la noche y madrugada (en comparación con las coberturas originales). Este mismo comportamiento ha sido reportado por Winchester et al. (2017). Además, según Degu et al. (2011), dependiendo del clima del sitio de interés, la presencia de un embalse no representa cambios importantes en el contenido de humedad, puesto que hay localizaciones donde el ambiente preexistente es ya lo suficientemente húmedo (bajo déficit de presión de vapor) y un cuerpo de agua no representaría aumentos de humedad. En nuestro caso, el contenido de humedad para la zona del embalse se mantiene similar entre los escenarios durante la mañana y el día, presentando aumentos únicamente en la tarde y noche, con hasta un 15.64% (de 17.27 g/kg a 19.97 g/kg) más de humedad a las 7 pm en el escenario con embalse, por ejemplo.

Los análisis desarrollados en este Trabajo de Investigación, i.e. análisis de observaciones y de experimentos de simulación, tienen sus limitaciones. Por ejemplo, con las observaciones fue posible identificar algunos cambios, incluso luego del filtro de la señal del ENSO, pero no se puede atribuir que tales cambios sean causados por el embalse. Por otra parte, en las simulaciones, aunque se pudo considerar el cambio de cobertura a un embalse, se cuenta con un periodo corto de 10 días que busca representar unas condiciones muy específicas para tratar de identificar los impactos solamente del embalse (i.e. aparte de modos como ENSO).

Pese a sus limitaciones y alcance originales, los resultados obtenidos mediante ambas aproximaciones convergen en un mismo punto: el embalse tiene potencial de generar impactos leves en las zonas alrededor del cuerpo de agua. Como se ha mencionado, las simulaciones desarrolladas permitieron identificar que los cambios que se producen sobre el cuerpo de agua pueden generar advección de humedad y temperaturas más bajas (altas) hacia las zonas de las estaciones cercanas durante el día (la noche y madrugada), ocasionando cambios totales de alrededor de 0.5% para la temperatura, el contenido de humedad y la humedad relativa, y 9% en la velocidad de los vientos. Por su parte, en las observaciones se tienen cambios totales pequeños en las variables temperatura y humedad relativa, luego de realizar el filtro de la señal del ENSO. En este punto, se hace importante mencionar que de la misma manera en que las observaciones indican un aumento de la temperatura luego de realizar el filtro del ENSO, el cambio total en la temperatura para las simulaciones también indica un aumento. Esto se debe a que la advección de temperaturas cálidas en la noche y la madrugada supera la advección de temperaturas más frescas en el día, lo que también se podría relacionar con el comportamiento de la temperatura máxima, mínima y del DTR identificado para las estaciones.

Estos resultados son inherentes a las características y topografía particulares del embalse Topocoro, por lo que no sería prudente asumir que la magnitud de los impactos que esta investigación identifica son esperables en otros embalses. Por ejemplo, en embalses con otras formas y topografía, los vientos más fuertes sobre el cuerpo de agua podrían llevar aire más fresco hacia regiones ubicadas a mayores distancias del embalse que las encontradas en nuestro estudio. Sin embargo, este Trabajo de Investigación aporta un avance importante en la comprensión de los cambios que pueden ocurrir específicamente en el sitio que se inunda (cambios en flujos, temperatura, humedad y vientos), así

como la forma en que la circulación de los vientos puede conectar algunos impactos en otras zonas cerca al lugar inundado. Finalmente, este Trabajo de Investigación presenta un solo caso de estudio, por lo que sería importante realizar estudios asociados a otros embalses en el país para fortalecer nuestra comprensión de los impactos de este tipo de obras en el hidroclima de Colombia.

Anexo A: Climatología para las variables meteorológicas en la zona

A continuación, se presenta la descripción del comportamiento climatológico para las variables de las estaciones del “Proyecto de monitoreo del comportamiento climatológico en el área de influencia de la Central Hidroeléctrica Sogamoso” instaladas por Natura/Isagen (referidas como N/I en adelante), así como para la temperatura y humedad relativa para las estaciones NOAA (ver capítulo 3 para más detalle sobre las estaciones).

A.1. Radiación incidente en el área de influencia

En la Figura A.1 se presenta el ciclo anual multianual de radiación incidente para dos de las estaciones N/I en el área de influencia, generado para los datos en el periodo de registro (2012-2018). Como se observa en la Figura A.1, la estación Guaimaral tiene su pico máximo de radiación en el mes de febrero con un valor de aproximadamente 510 W/m^2 (valor más alto para toda el área de influencia), mientras que el segundo pico ocurre en el mes de septiembre con un valor aproximado de 470 W/m^2 . Para la estación La Estrella, los valores máximos ocurren entre los meses de julio, agosto y septiembre, con un valor máximo de 400 W/m^2 en septiembre. Este comportamiento identificado en La Estrella es similar para el resto de las estaciones. La ocurrencia generalizada de los valores máximos entre los meses de julio, agosto y septiembre para las estaciones se puede deber a la posición de la tierra con respecto al sol y que coincide con la ocurrencia de la temporada seca climatológica (ver sección A.2. Precipitación).

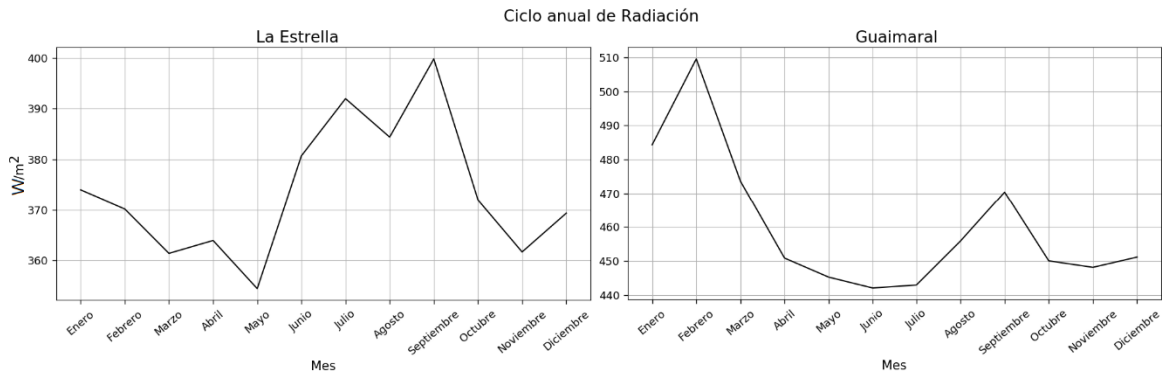


Figura A.1. Ciclo anual multianual (2012-2018) de radiación incidente por las estaciones N/I La Estrella y Guaimaral

En la Figura A.2 se presenta el ciclo diurno promedio para todo el periodo de registro en dos de las estaciones mediante diagramas de cajas, donde las cajas representan las horas. Se identifica que el pico máximo de radiación se da entre las 11 am y la 1 pm a lo largo del área de influencia, lo cual concuerda con el ciclo diurno solar y el momento de mayor altitud del sol al medio día. Como se observa, la estación Guaimaral al medio día registra valores cercanos a los 1000 W/m^2 al mediodía y valores medios de aproximadamente 800 W/m^2 . Estos son los valores más elevados registrados entre las estaciones N/I, lo cual tiene sentido pues la estación Guaimaral se encuentra en una zona de bosque seco tropical. Por el contrario, la estación Villa Mónica presenta valores de hasta 800 W/m^2 al mediodía y valores medios de aproximadamente 600 W/m^2 . Para las otras estaciones (El Placer, La Parroquia, La Estrella y Cedral), los valores máximos de radiación entre las horas del mediodía se encuentran alrededor de los 750 W/m^2 , siendo Marqués la que tiene valores más cercanos a 800 W/m^2 .

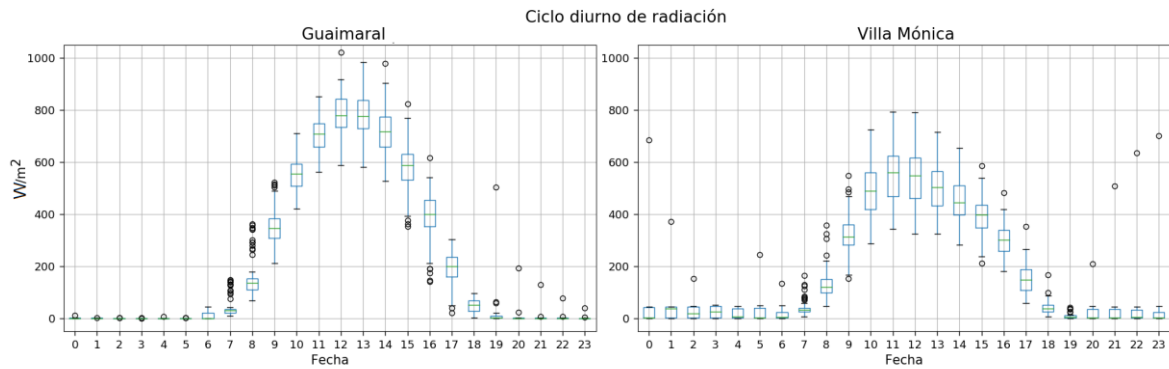


Figura A.2. Ciclo diario de radiación para todo el periodo de registro (2012-2018) para las estaciones Guaimaral y Villa Mónica

A.2. Precipitación

En la Figura A.3 se observa el ciclo anual multianual de precipitación (valores en mm/día) para algunas de las estaciones en el área de influencia. En general, como se puede ver en la Figura A.3, las estaciones exhiben dos temporadas húmedas en los meses de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, lo que coincide con la climatología registrada por IDEAM para la región y el departamento de Santander (ver: http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.htmlgico_IDEAM). Para las estaciones La Estrella, Cedral y La Parroquia (Las primeras dos estaciones mostradas en La Figura A.3) se identifica que el segundo pico de precipitaciones del año es en promedio 3 mm/día más elevado que el primer pico del año, mientras que para las estaciones Placer, Villa Mónica, El Marqués y Guaimaral (las dos últimas estaciones mostradas en la Figura A.3), los dos picos máximos en el año tienen valores similares.

La estación con valores de precipitación más bajos en el área de influencia es Guaimaral, con un promedio alrededor de los 1.6 mm/día y valores de aproximadamente 3 mm/día para las temporadas de lluvias. La estación con valores de precipitación más elevados es Cedral, con un promedio alrededor de 7 mm/día y valores de aproximadamente 14 mm/día para el mes de noviembre en la temporada húmeda. Para el resto de las estaciones, los valores son más similares con promedios alrededor de los 4 mm/día mensuales.

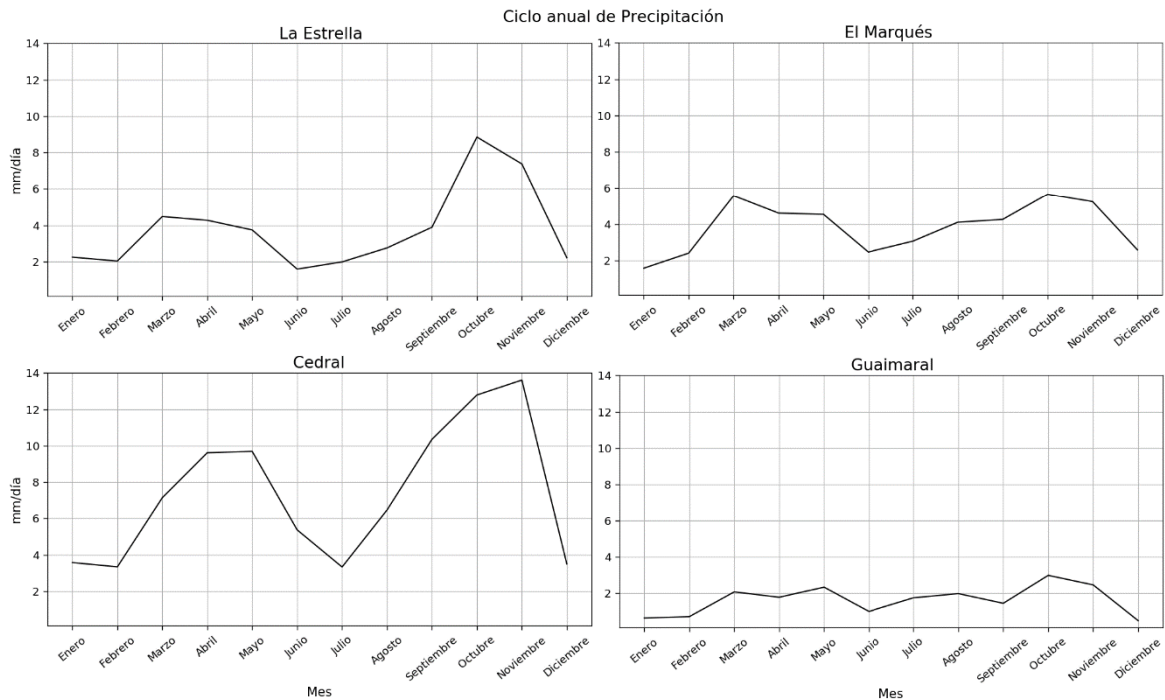


Figura A.3. Ciclo anual multianual (2012-2020) de precipitación en mm/día para las estaciones La Estrella, El Marqués, Cedral, y Guaimaral

A.3. Velocidad y dirección del Viento

En la Figura A.4 se presenta el ciclo anual multianual entre los años 2012 y 2018 para la velocidad del viento. En general, se puede observar que se presentan valores máximos alrededor de los meses de agosto, septiembre y octubre, con algunas de las estaciones como La Estrella Villa Mónica, El Marqués y La Parroquia mostrando otros máximos entre enero y febrero (Ver Figura A.4 para el caso de La Estrella).

Como se puede ver en la Figura A.4, la estación con las velocidades del viento más altas es el Placer, con velocidades por encima de 2 m/s a lo largo del año y una velocidad aproximada de 2.4 m/s para octubre, el mes con las velocidades más altas registradas. Esto se debe a que El Placer es la estación más elevada en el área de influencia y, por lo tanto, se encuentra expuesta a vientos que se aceleran más al estar más alejados de la fricción que se genera con la superficie. Para el resto de las estaciones, con excepción de Cedral que tiene velocidades superiores a 1 m/s para el mes con la velocidad más alta, los valores están por debajo de 1 m/s.

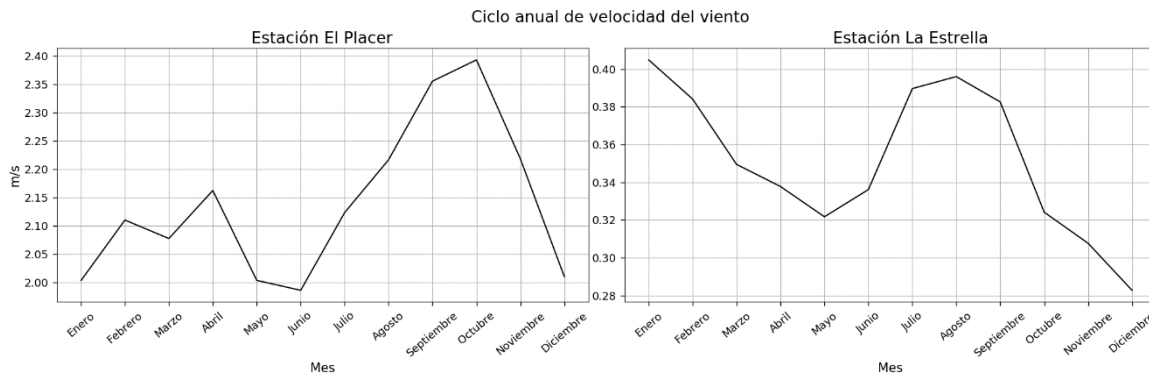


Figura A.4. Ciclo anual multianual (2012-2018) de velocidad del viento en las estaciones N/I El Placer y La Estrella

Además, se realizó un análisis mediante rosas de vientos, separadas por bloques promediados de 6 horas, de manera que se tienen los bloques entre medianoche y 6am (*Madrugada*), 6am y mediodía (*Mañana*), mediodía y 6pm (*Tarde*), y 6pm y medianoche (*Noche*) a lo largo de todo el periodo de registro. Las rosas de vientos correspondientes a estos bloques para las estaciones en el área de estudio se pueden observar en la Figura A.5. Como se puede ver, durante la *Madrugada*, los vientos fluyen en general desde el sur en toda la zona de influencia, con una leve desviación desde el suroriente en Parroquia, El Placer y Guaimaral, y desde el suroccidente en La Estrella. Para el bloque de la *Mañana*, se mantiene la dirección dominante desde el sur, aunque hay pequeñas variaciones en todas las estaciones, principalmente en La Estrella, que en este bloque tiene una dirección dominante desde el suroriente. En el bloque de la *Tarde* también domina la dirección desde el sur con un sentido desde el suroccidente más notorio en Cedral y El Placer, mientras que en las estaciones Villa Mónica y Guaimaral se observa desde el suroriente. Para la *Noche*, la dirección es desde el suroccidente en La Estrella y El Placer, mientras que en El Marqués y Guaimaral es desde el suroriente. En general, el flujo de viento en el área de influencia está dominado por una componente desde el sur en todos los momentos del día.

Para la velocidad, como se puede ver en la Figura A.5 se presentan aumentos entre *Mañana* y *Tarde* para Parroquia, Placer, Cedral, El Marqués y Guaimaral, mientras que las demás estaciones permanecen con velocidades similares. Entre los bloques de la *Tarde* y la *Noche* se presenta un aumento solamente en La Parroquia, mientras que para el resto de las se presenta una disminución en la velocidad. Así, en general los aumentos en la velocidad se dan entre la *Mañana* y la *Tarde*, mientras que las velocidades más bajas se presentan en la *Noche* y la *Madrugada*. La estación El Placer es la que presenta las velocidades más altas a lo largo del día, con velocidades para el bloque de la *Tarde* superiores a 2.4 m/s (ver Figura A.5). Le siguen la estación Cedral, Marqués y Guaimaral, que alcanzan velocidades en el bloque de la *Tarde* entre 1.2 y 1.6 m/s, mientras que las otras estaciones no superan 1 m/s de velocidad a lo largo del día.

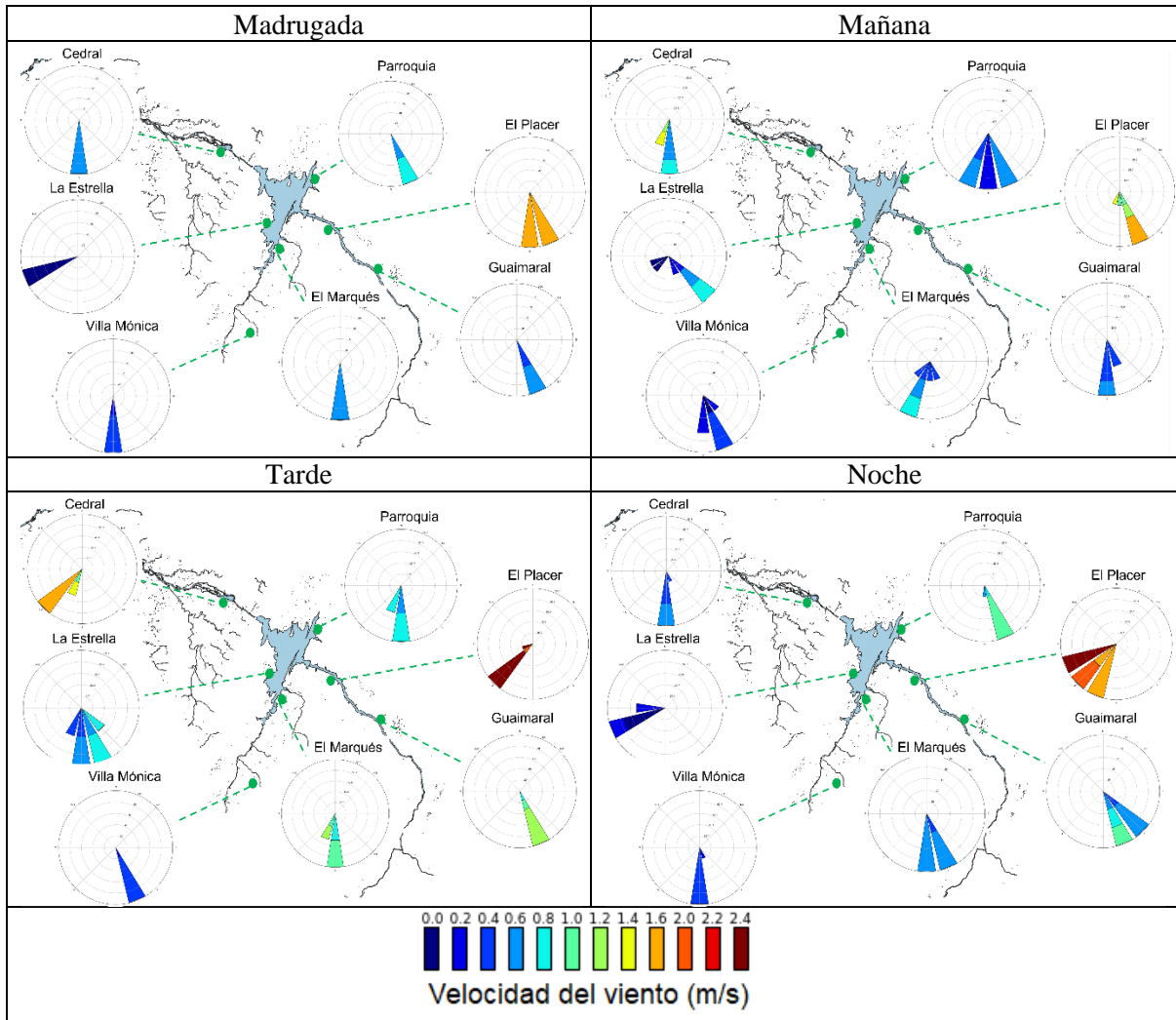


Figura A.5. Rosas de vientos para las estaciones N/I en el área de influencia del embalse para diferentes momentos del día, separados en bloques de 6 horas: medianoche-6am (bloque Madrugada), 6am-medioidía (bloque Mañana), mediodía-6pm (bloque Tarde), y 6pm-medianoche (bloque Noche)

A.5. Temperatura local

En la Figura A.6 se presenta el ciclo anual de temperatura promedio para diferentes horas del día, así como para la temperatura máxima y la temperatura mínima en la estación El Marqués (es similar para el resto de las estaciones N/I). Como se puede observar, la temperatura sigue un ciclo anual bimodal con dos picos de temperatura máxima al año relacionados con la ocurrencia de las dos temporadas secas para la región (ver sección Precipitación).

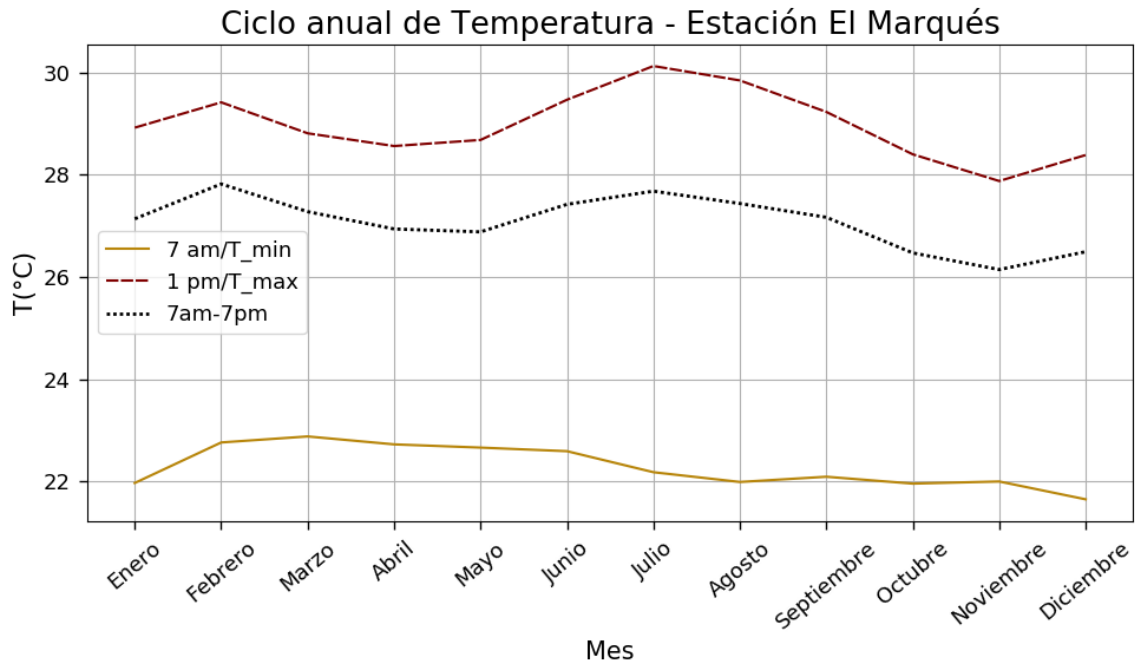


Figura A.6. Ciclo anual de temperatura para la estación N/I EL Marqués. Se presenta la serie para temperatura máxima, mínima y el promedio del día

Aunque la magnitud de la temperatura es diferente entre las estaciones de medición, lo que se puede deber principalmente a las diferentes alturas en las que están localizadas (ver ubicación de las estaciones en capítulo 3 - Figura 3.1), se identifica que la segunda temporada seca del año (entre los meses de junio, julio y agosto), es decir el segundo pico de temperaturas en el año, es en el que la temperatura máxima toma los mayores valores, mientras que para la temperatura media diaria, ambos picos tienen valores similares. La variación promedio para la temperatura a lo largo del año es de aproximadamente 2°C para la temperatura máxima y la temperatura media diaria. De igual manera, la temperatura mínima también presenta dos picos de temperatura, aunque menos pronunciados que los ya mencionados. Lo que más destaca en la temperatura mínima es un comportamiento semestral, donde se puede ver que durante los meses de enero a junio se exhiben valores un poco mayores a los que presenta para el resto de los meses del año. La variación de la temperatura mínima a lo largo del año es de aproximadamente medio grado centígrado. Estas variaciones pequeñas en la temperatura a lo largo del año tienen sentido, pues en regiones tropicales las variaciones más altas en la temperatura ocurren a lo largo del día.

Ciclo diurno

En la Figura A.7 se presenta el ciclo diurno promedio de temperatura para dos estaciones N/I. Como se puede observar, el rango de variación de temperatura durante el día no presenta cambios muy grandes entre las estaciones de medición, estando entre 8°C y 9°C aproximadamente, a excepción de las dos estaciones ubicadas a una mayor elevación (El Placer y Villa Mónica), para las cuales el rango es de entre 4°C y 6°C. Además, en la Figura A.7 se puede notar el efecto de la altura en la temperatura al identificar que los valores para la estación Cedral, que es la más baja de todas, son más elevados al compararlos con los valores para la estación El Marqués.

Por otra parte, se encuentra una diferencia en la hora de ocurrencia del pico de temperatura máxima en el ciclo diurno para algunas estaciones. Para las estaciones La Estrella, El Marqués, Guaimaral y El Placer, el pico se da entre 1 y 2 de la tarde, mientras que para las otras estaciones el pico ocurre después, aproximadamente entre 3 y 4 de la tarde (ver Figura A.7). No se encuentra un patrón altitudinal o de ubicación con respecto al embalse al que se pueda atribuir este comportamiento, por lo que se espera que tenga que ver con la forma en que las estaciones están expuestas a la incidencia de radiación, así como a las condiciones de vegetación en el lugar de ubicación de las mismas.

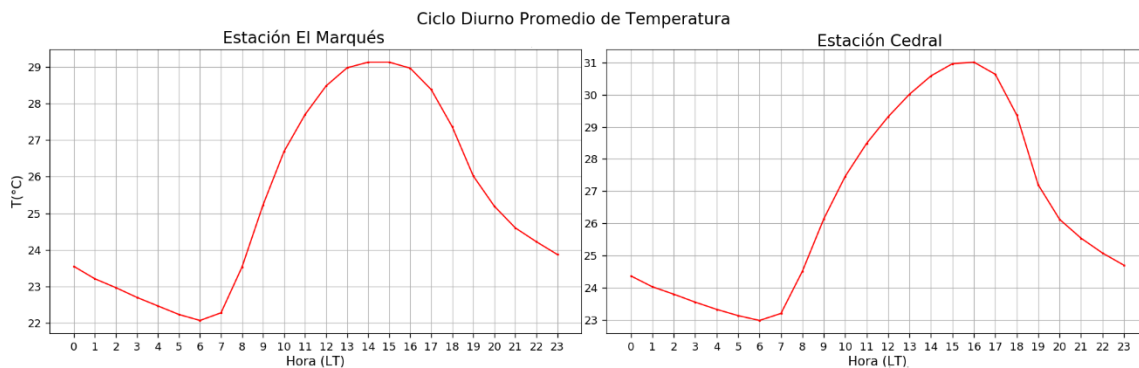


Figura A.7. Ciclo diurno promedio de temperatura para las estaciones N/I El Marqués y Cedral. Marqués: entre 1 y 2pm. Azul: entre 3 y 4pm

La Figura A.8 presenta de manera resumida la información para los ciclos anual y diurno para todas las estaciones N/I, donde se puede ver claramente el efecto de la ubicación altitudinal en los colores más fríos que dominan los contornos para las estaciones Villa Mónica y El Placer. También es posible ver el mencionado comportamiento bimodal a lo largo del año, así como los desfases en la hora de ocurrencia de la temperatura máxima.

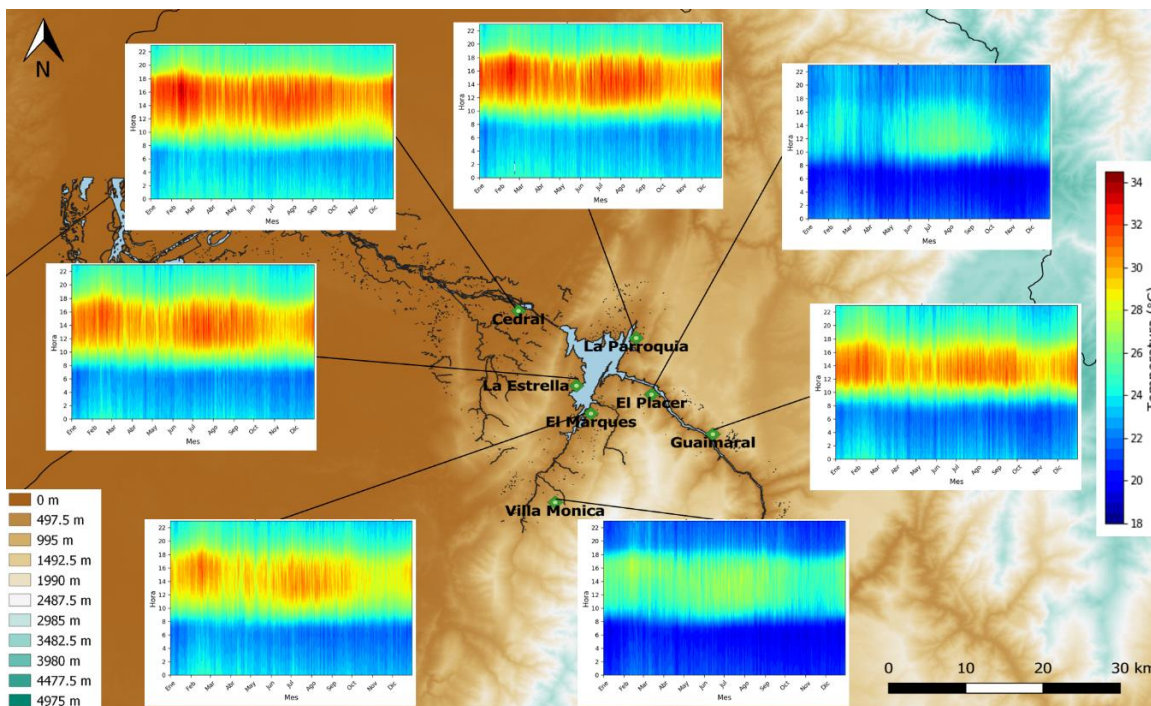


Figura A.8. Contornos de temperatura para las estaciones N/I. La escala de colores muestra valores entre 18 y 34°C

A.6. Temperatura regional

En la Figura A.9 se presenta el ciclo anual de temperatura promedio a lo largo de las horas del día, así como para la temperatura máxima y la temperatura mínima para dos de las estaciones NOAA. De igual manera que para la temperatura de las estaciones N/I, se identifican dos picos de temperatura indicando un comportamiento bimodal de la variable. En este caso, se identifican comportamientos similares entre algunas de las estaciones. San Antonio del Táchira, Camilo Daza, José María Córdova y Alfonso Bonilla Aragón exhiben comportamientos similares, y de la misma manera Palo Negro, Yariguíes y El Dorado. La diferencia que muestra el primer grupo de estaciones mencionado es que alcanzan una mayor magnitud de la temperatura en el segundo pico del año, mientras que el segundo grupo alcanza valores con mayor magnitud en el primer pico y, además, la diferencia entre el primer y el segundo pico no es tan grande para el segundo grupo de estaciones como lo es para el primer grupo (Figura A.9).

En cuanto a las temperaturas mínimas, las estaciones Palo Negro, Yariguíes, El Dorado, José María Córdova y Alfonso Bonilla Aragón exhiben un comportamiento similar al de las estaciones N/I, que muestran temperaturas aproximadamente medio grado más altas durante la primera mitad del año que en la segunda mitad, con la excepción de El Dorado, donde la diferencia es de aproximadamente 2°C . Para las estaciones Camilo Daza y San Antonio, esta variable aumenta durante la primera mitad del año hasta llegar a un pico en junio, donde se mantiene relativamente estable hasta septiembre y luego comienza a disminuir. La variación durante el año es de aproximadamente 2°C en estas estaciones. Estas variaciones de 2°C en la temperatura mínima exhibidas en El Dorado, Camilo Daza y San Antonio son las más altas observadas para la temperatura mínima entre todas las estaciones consideradas en este documento.

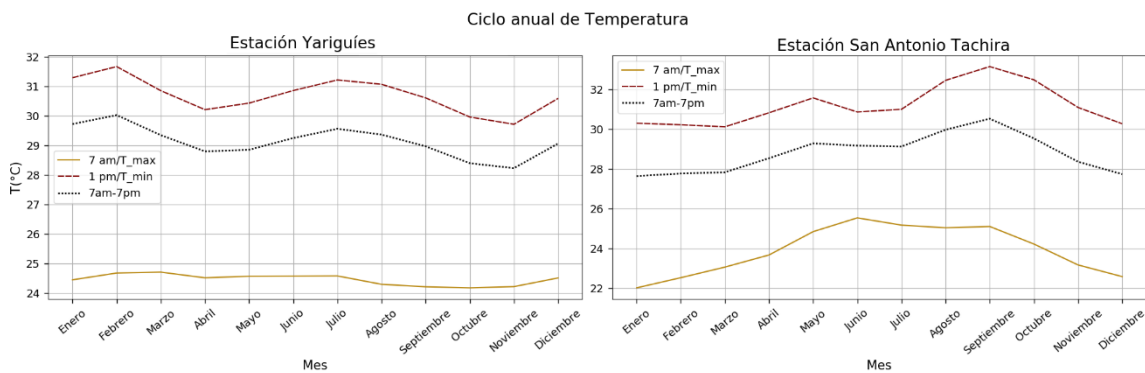


Figura A.9. Ciclo anual de temperatura para las estaciones NOAA Yariguíes y San Antonio del Táchira. Series para Tmax, Tmin y temperatura promedio del día

Ciclo diario

En la Figura A.10 se presenta el ciclo diario promedio de temperatura para las estaciones Yariguíes y San Antonio del Táchira. Como se puede observar, el rango de variación de la temperatura es de aproximadamente 7°C para Yariguíes y aproximadamente 6°C para San Antonio. Para el resto de las estaciones, el rango es similar y se encuentra entre los 6°C y los 7°C , con las excepciones de Alfonso Bonilla Aragón con un rango de 9°C y El Dorado con un rango de 8°C .

De igual manera que para las estaciones N/I, se encuentra que la estación Yariguíes tiene su pico de temperatura máxima más hacia la tarde que las otras estaciones. Para este caso, se podría considerar

que la razón de este comportamiento es la ubicación de la estación con respecto al embalse, pues es la única de las cuatro estaciones NOAA que está al oeste del mismo; sin embargo, esto no es consistente con el hecho de que las estaciones N/I, que están más cerca al embalse, presentan esta misma condición y en ellas no se encuentra un patrón con respecto a la ubicación. Por esto, se podría asumir que la causa de este retraso en el pico debe estar relacionada con las condiciones de la ubicación de la estación y la forma en que éstas afectan la insolación en la misma.

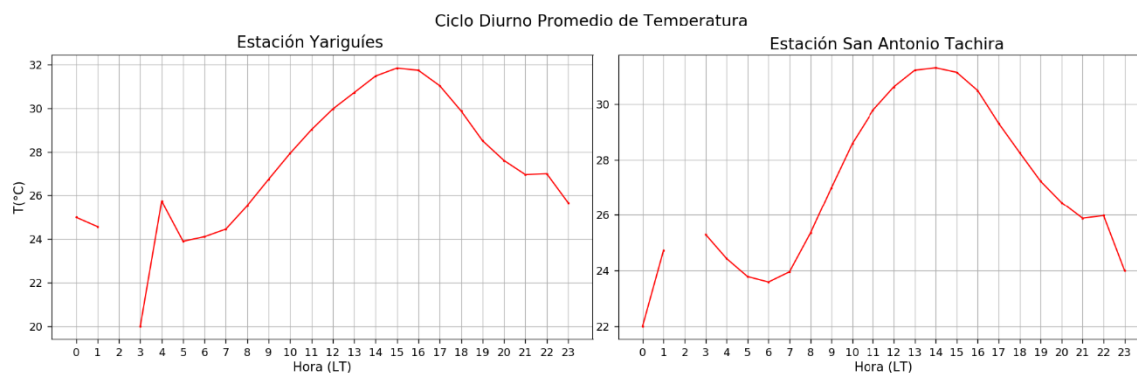


Figura A.10. Ciclo diurno promedio de temperatura para las estaciones NOAA Yariguíes y San Antonio del Tachira

De manera análoga a la sección anterior, la Figura A.11 (para las estaciones en la escala regional: Palo Negro, Yariguíes, Camilo Daza y San Antonio del Tachira) y la Figura A.12 (Para las estaciones en la escala nacional: Alfonso Bónilla Aragón, José María Córdova y El Dorado) permiten observar todo lo comentado en esta caracterización. Es clara la similitud destacada para las estaciones San Antonio de Táchira, Camilo Daza, Alfonso Bonilla Aragón y José María Córdova, así como Palo Negro, Yariguíes y El Dorado, donde se pueden identificar los colores más cálidos en el segundo pico del año para el primer grupo de estaciones y lo contrario para el otro grupo. Además, se puede apreciar el efecto de la altura con respecto al nivel del mar en la temperatura, dado que las estaciones José María Córdova y El Dorado muestran temperaturas 10°C por debajo de las observadas para las demás estaciones (comparar escalas de colores), y estas estaciones son las más altas superando los 2000 msnm de elevación.

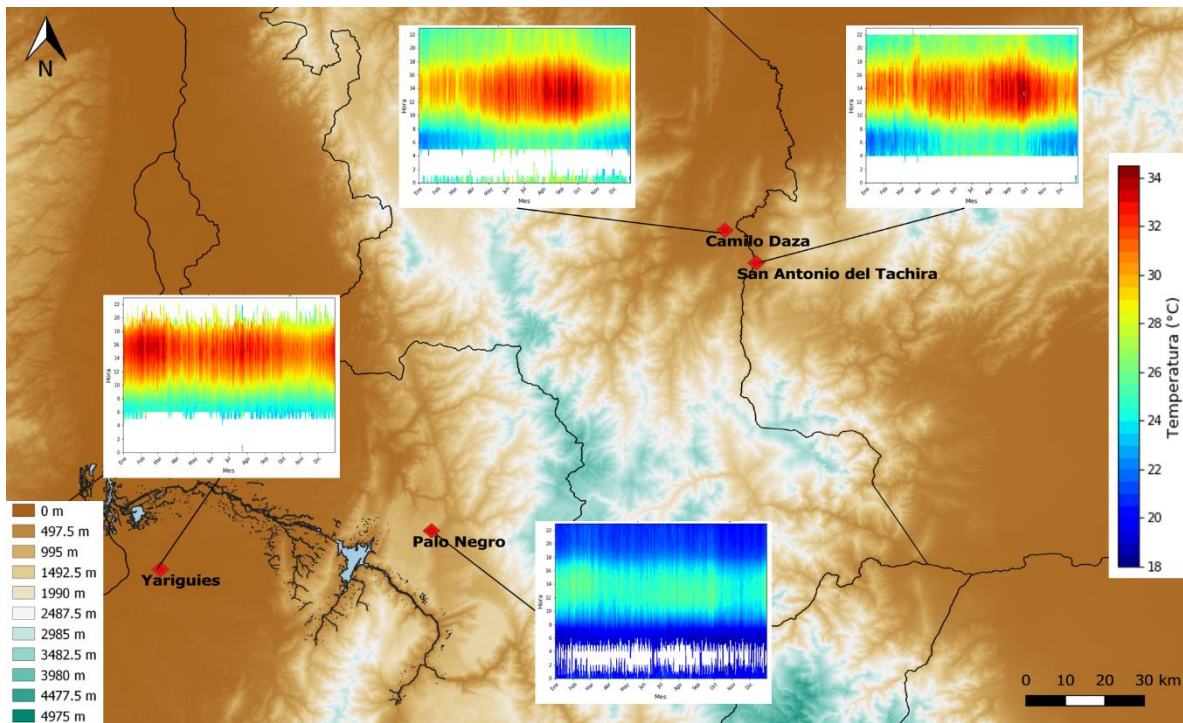


Figura A.11. Contornos de temperatura para las estaciones NOAA en la escala regional

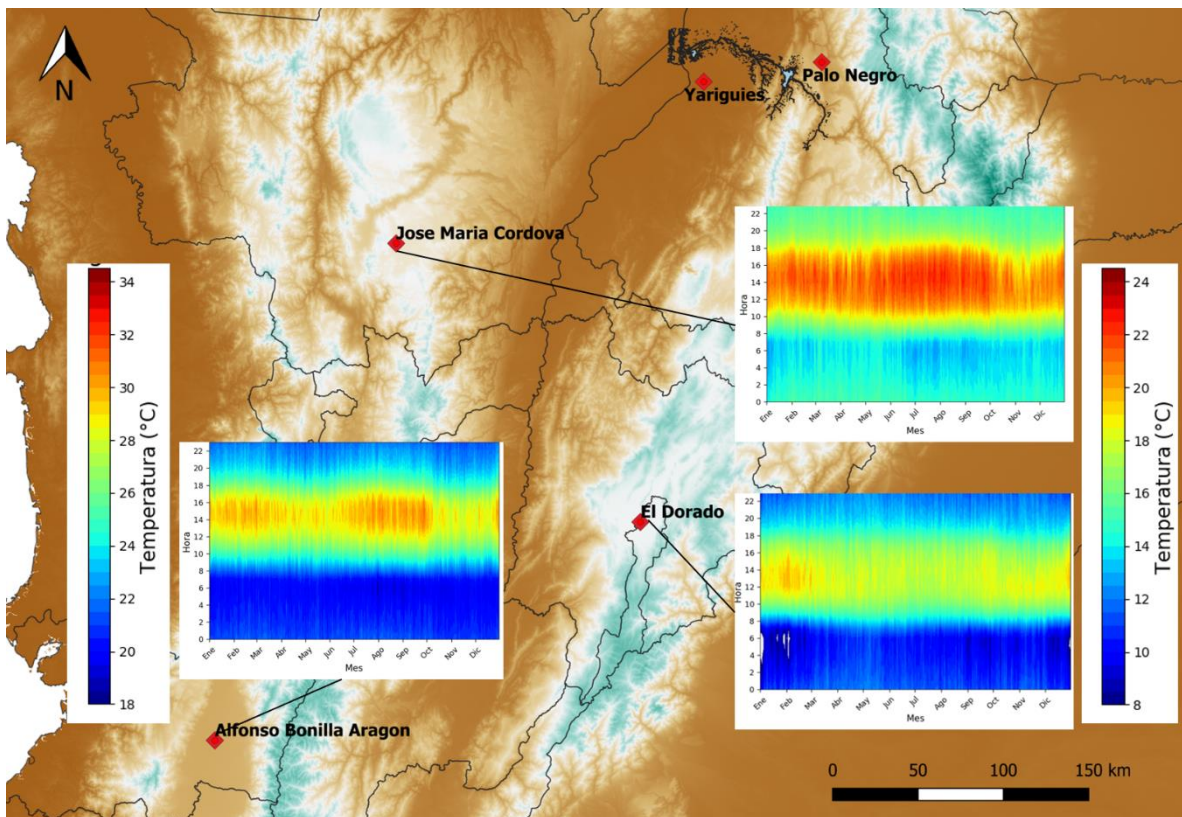


Figura A.12. Contornos de temperatura para las estaciones NOAA en la escala nacional. La escala de colores de la derecha es para las estaciones José María Córdova y El Dorado

A.7. Humedad relativa local

La Figura A.13 presenta el ciclo anual multianual para la variable humedad relativa en la estación El Marqués (similar en todas las estaciones). Se identifica un comportamiento que también es bimodal a lo largo del año, pero que es contrario al de la temperatura, con la ocurrencia de los máximos en humedad relativa en fase con las temporadas de lluvia (ver sección **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y los momentos en que la temperatura es más baja (marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre). También, el segundo pico del año es más alto que el primero, relacionado con el segundo mínimo de temperaturas en la estación, que es un poco más bajo que el primero. En general, las humedades mínima y media para el día presentan más variación a lo largo del año que la máxima y valores de menor porcentaje de humedad, entre el 70% y 80%, mientras que la máxima, al estar relacionada con los valores de temperatura más bajos, presenta valores entre el 80% y 90%. Nuevamente las variaciones más importantes se presentan a lo largo del día más que a lo largo de los meses.

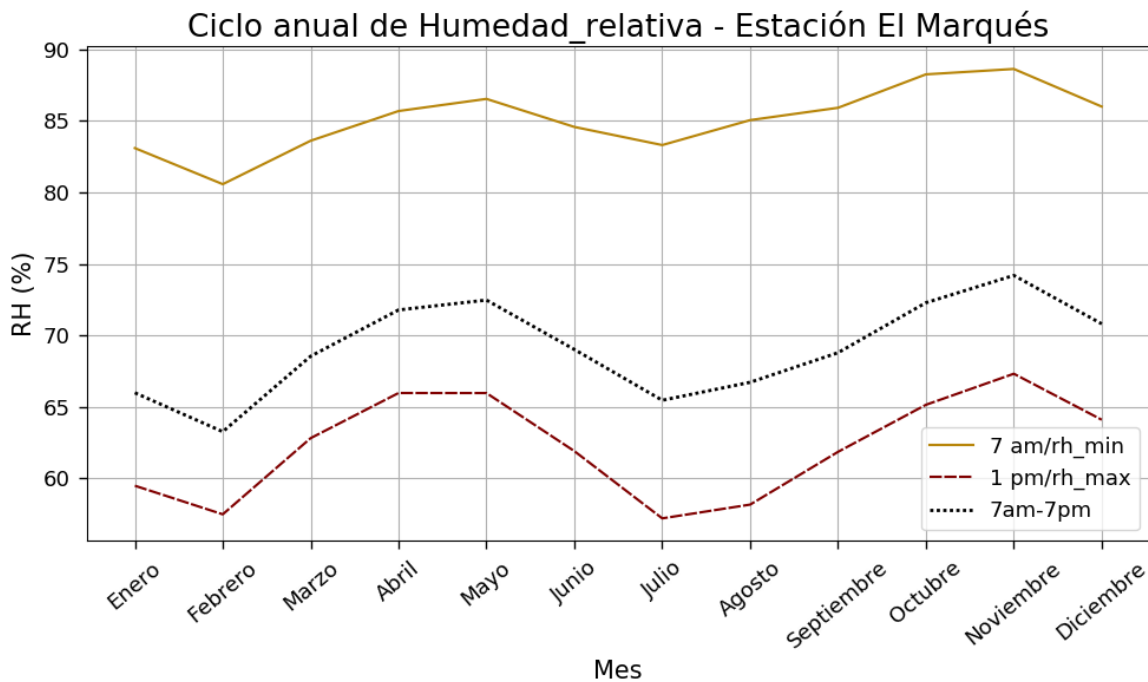


Figura A.13. Ciclo anual multianual de humedad relativa en la estación N/I El Marqués. Se presenta la serie para la humedad relativa promedio durante el día (7am-7pm), la humedad relativa máxima (7am) y la mínima (1pm)

Ciclo diario

Similar a lo que ocurre con los valores a lo largo del año, para el ciclo diario se encuentra un comportamiento de la humedad relativa que es contrario al de la temperatura, donde los valores más altos y cercanos a la saturación se tienen en las horas de la mañana, aproximadamente entre 6 am y 8 am. En la Figura A.14 se presenta el ciclo diario de humedad relativa para las estaciones El Marqués y Cedral. Los valores de humedad relativa más bajos se alcanzan en los momentos entre el mediodía y la tarde (esto es similar para todas las estaciones). También se identifica la diferenciación en el momento del mínimo entre los grupos de estaciones (similar a lo mencionado para la ocurrencia del máximo en temperatura), donde para las estaciones Cedral, Villa Mónica y Parroquia ocurre entre las 3 pm y las 4 pm, mientras que en El Marqués, La Estrella, El Placer y Guaimaral ocurre entre 1 pm

y 2 pm (Ver Figura A.14). Este comportamiento estaría dominado por el comportamiento de la temperatura como se comentó anteriormente.

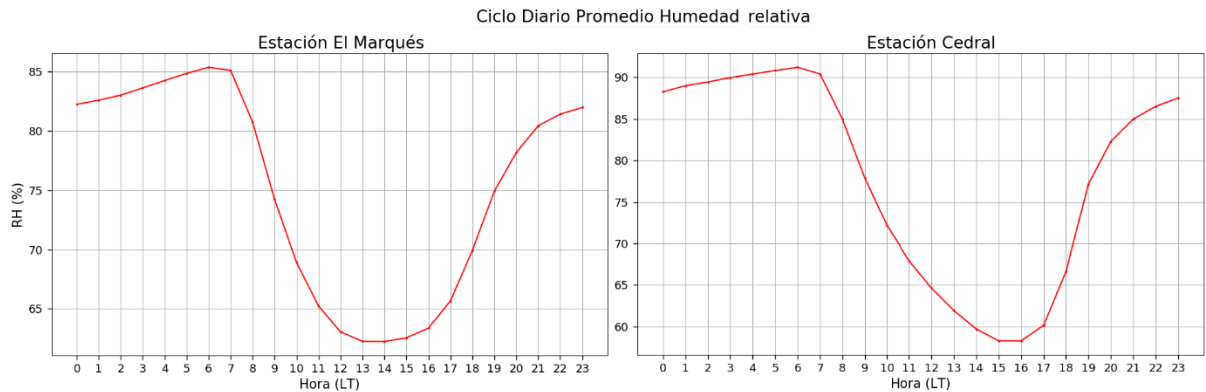


Figura A.14. Ciclo diario promedio de humedad relativa para las estaciones N/I El Marqués y Cedral. Marqués: entre 1 y 2pm. Azul: entre 3 y 4pm

La Figura A.15 muestra los contornos para todas las estaciones donde se puede apreciar espacialmente los comportamientos descritos en las dos escalas temporales (anual y diurna). Es de resaltar, que se puede identificar los valores de humedad más bajos para la estación Guaimaral, que se encuentra ubicada en una zona de Bosque Seco, y se diferencia de las demás estaciones porque en los momentos de humedad relativa máxima, asociados a los momentos de temperaturas más bajas, la humedad permanece en valores alrededor del 70%, alejados de la saturación, mientras que en el resto de estaciones, las temperaturas más bajas se asocian con valores cercanos a la saturación en la humedad relativa. En la estación Guaimaral, también es de interés resaltar que en los momentos de temporada de lluvias, los valores de humedad relativa para la mañana alcanzan valores más altos.

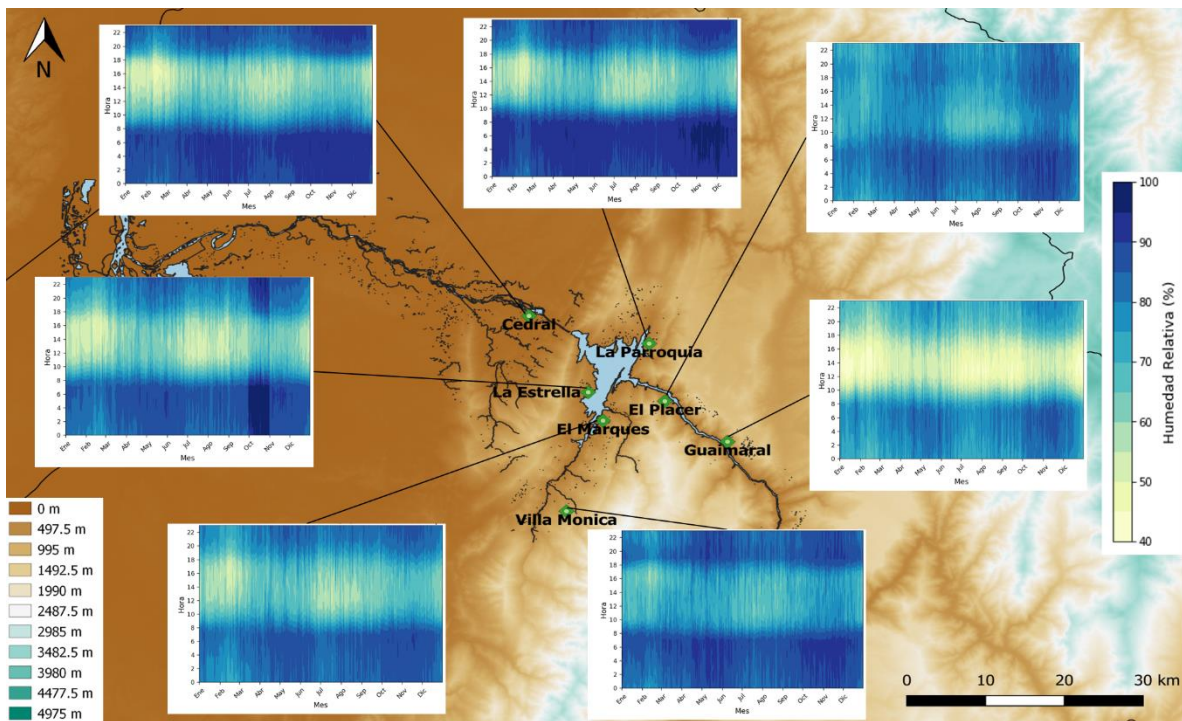


Figura A.15. Contornos de humedad relativa para las estaciones N/I

A.8. Humedad relativa regional

En la Figura A.16 se presentan los ciclos anuales multianuales de humedad relativa máxima, mínima y humedad promedio para el día para las estaciones Yariguíes y San Antonio del Tachira. Como se puede ver en la Figura A.16, se encuentra el comportamiento bimodal esperado para la variable (sobre todo en sus valores mínimos y promedio a lo largo del día), con los picos máximos entre los meses de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre (temporadas en que la temperatura exhibe los mínimos). Además, se puede observar que los valores para la humedad relativa máxima en la estación Yariguíes están por encima del 90% a lo largo de todo el año. Este comportamiento de la humedad relativa máxima es similar en las estaciones Palo Negro, Alfonso Bonilla Aragón, José María Córdova, y El Dorado. Por otra parte, el comportamiento en las estaciones Camilo daza y San Antonio del Tachira para la humedad relativa máxima a lo largo del año es similar al de la estación San Antonio (Ver Figura A.16), con un descenso a valores alrededor del 70% para los meses de junio-julio-agosto (temporada seca). Es de interés resaltar que la estación San Antonio del Tachira (Camilo Daza es similar), tienen valores más lejanos de la saturación (alrededor de 50%) en los momentos de sus mínimos para la humedad mínima y la humedad promedio a lo largo del día, mientras que los valores en el resto de estaciones permanecen alrededor de 70% (60%).

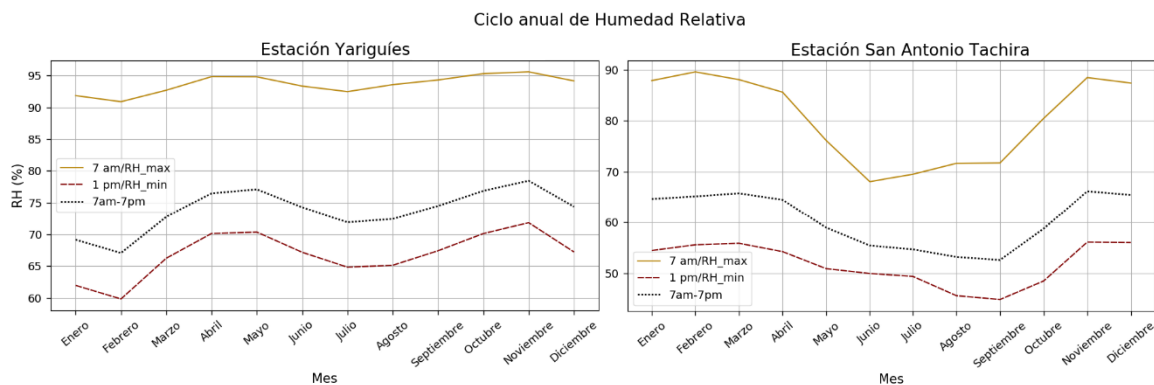


Figura A.16. Ciclo anual multianual de humedad relativa para las estaciones NOAA Yariguíes y San Antonio del Tachira

Ciclo diario

En la Figura A.17 se presenta el ciclo diario promedio de humedad relativa en las estaciones Yariguíes y San Antonio del Táchira. El comportamiento es similar al descrito para las estaciones N/I, con los valores más cerca de la saturación en las horas de la noche y la mañana (cuando se tienen las temperaturas mínimas). Además, similar al comportamiento descrito por la temperatura, se identifica la ocurrencia del mínimo de humedad relativa en la estación Yariguíes entre 3 pm y 4 pm, mientras que para el resto de las estaciones el mínimo en la variable a lo largo del día ocurre similar a la estación San Antonio del Táchira, entre la 1 pm y las 2 pm (ver Figura A.17).

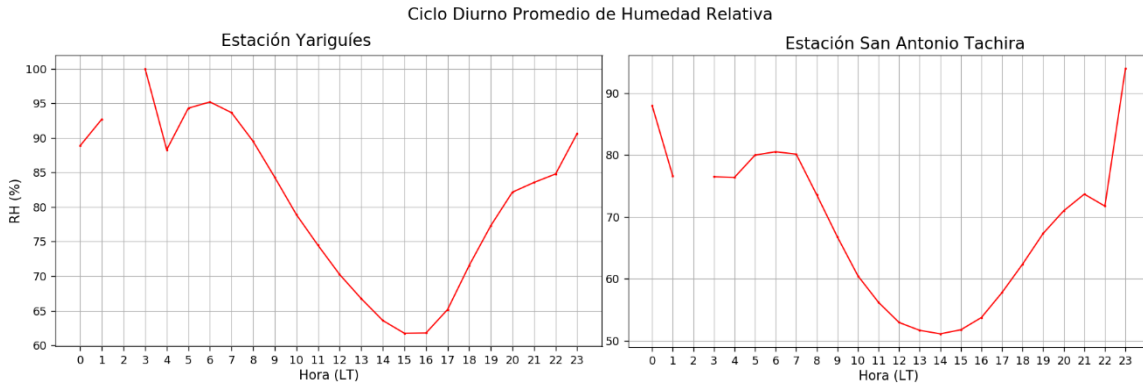


Figura A.17. Ciclo diurno promedio de humedad relativa para las estaciones N/I Yariguíes y San Antonio del Tachira

La Figura A.18 y Figura A.19 presentan un resumen de los comportamientos mencionados anteriormente para el ciclo anual y el ciclo diurno de humedad relativa. Entre las estaciones analizadas, la estación José María Córdova tiene valores más cercanos a la saturación para las horas de la mañana. También se puede observar que en las estaciones Camilo Daza y San Antonio del Táchira, los valores a lo largo del día son más bajos en las temporadas secas que en el resto de las estaciones, especialmente en horas de la noche y la mañana.

Se hace importante resaltar que, a pesar de las diferentes localizaciones y diferentes alturas con respecto al nivel del mar, el comportamiento de la humedad relativa es similar entre las estaciones y se ve muy influenciado por el comportamiento de la temperatura, más que por la localización lejos o cerca de una fuente de humedad, como el embalse en este caso. Por ejemplo, las estaciones NOAA tienen valores anuales de humedad relativa máxima más cercanos a la saturación que las estaciones N/I, estando estas últimas más cerca del embalse.

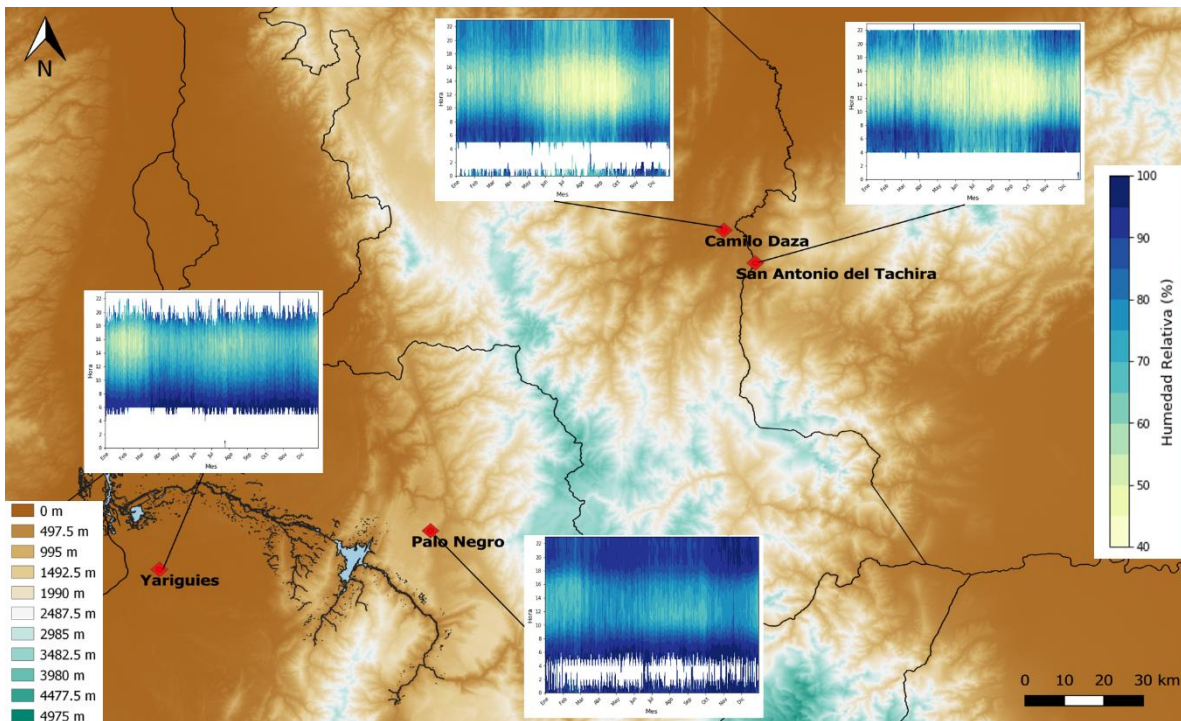


Figura A.18. Contornos de humedad relativa para las estaciones NOAA en la escala regional

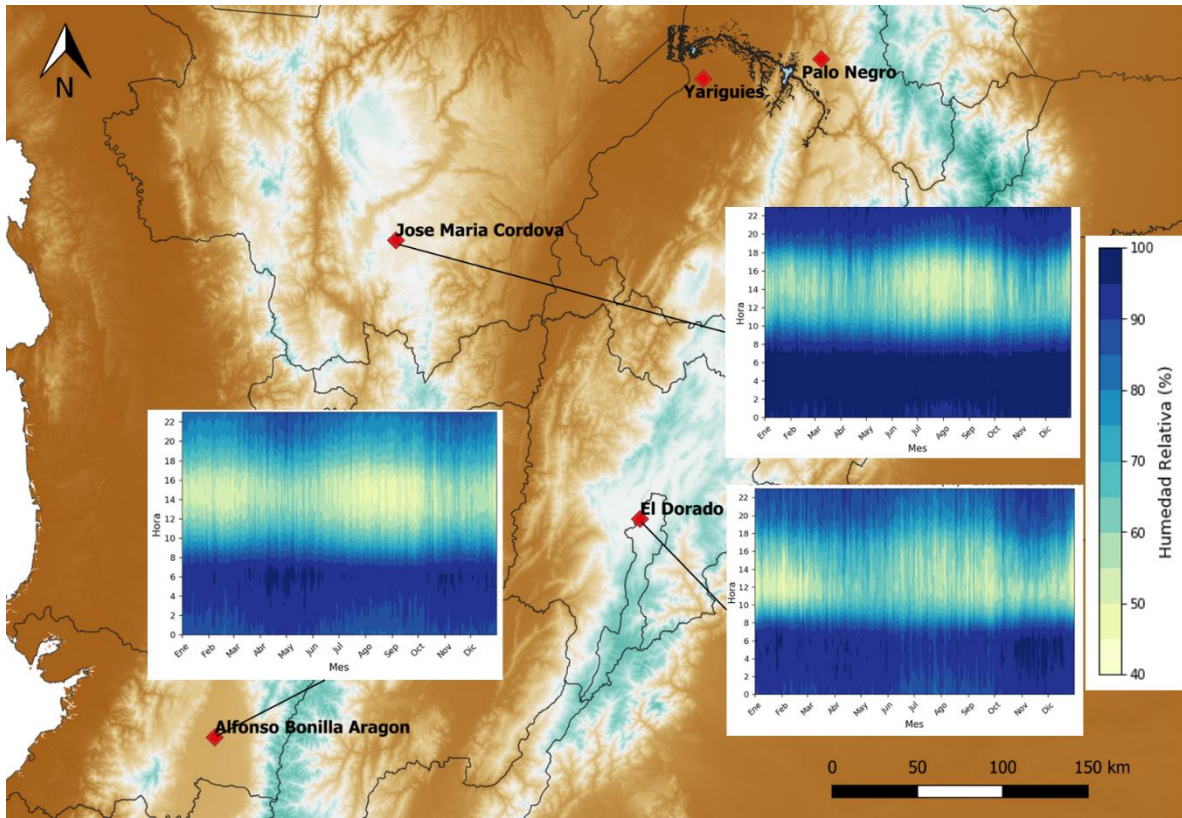


Figura A.19. Contornos de humedad relativa para las estaciones NOAA en la escala nacional. La escala de colores de la derecha es para las estaciones José María Córdova y El Dorado

Anexo B: Detalle de valores faltantes

En este anexo se presenta el detalle para los datos faltantes de las variables meteorológicas usadas en las estaciones N/I y NOAA (ver capítulo 3 para más detalle sobre las estaciones). Las figuras presentadas muestran el porcentaje de valores horarios faltantes para cada uno de los meses durante el periodo de registro en las variables radiación, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, provenientes de las dos bases de datos consideradas. Este periodo de registro puede cambiar dependiendo de la variable. Para la precipitación, el conteo es para valores horarios faltantes en el caso de N/I y valores diarios faltantes en el caso de NOAA.

Particularmente, las figuras para las estaciones N/I presentan dos tipos de barras. Las barras azules representan los valores faltantes que fueron reportados por el operador de las estaciones, mientras que las barras rojas representan valores faltantes que no fueron reportados, es decir, que se identificaron por primera vez mediante este procedimiento.

B.1. Radiación incidente N/I

El conteo de datos faltantes para la radiación incidente se realizó únicamente para las horas del día, entre 6am y 7pm, que son las horas en las que se identificó que los datos presentan valores de radiación a lo largo del período de medición. Para esta variable, el periodo de registro es entre enero de 2012 y diciembre de 2017. Las Figuras B.1 a B.7 presentan los valores faltantes horarios para esta variable. En general, se identificó una cantidad de información suficiente para realizar los análisis. Es importante aclarar que la radiación incidente no cuenta con información medida para otras estaciones en la escala regional o nacional.

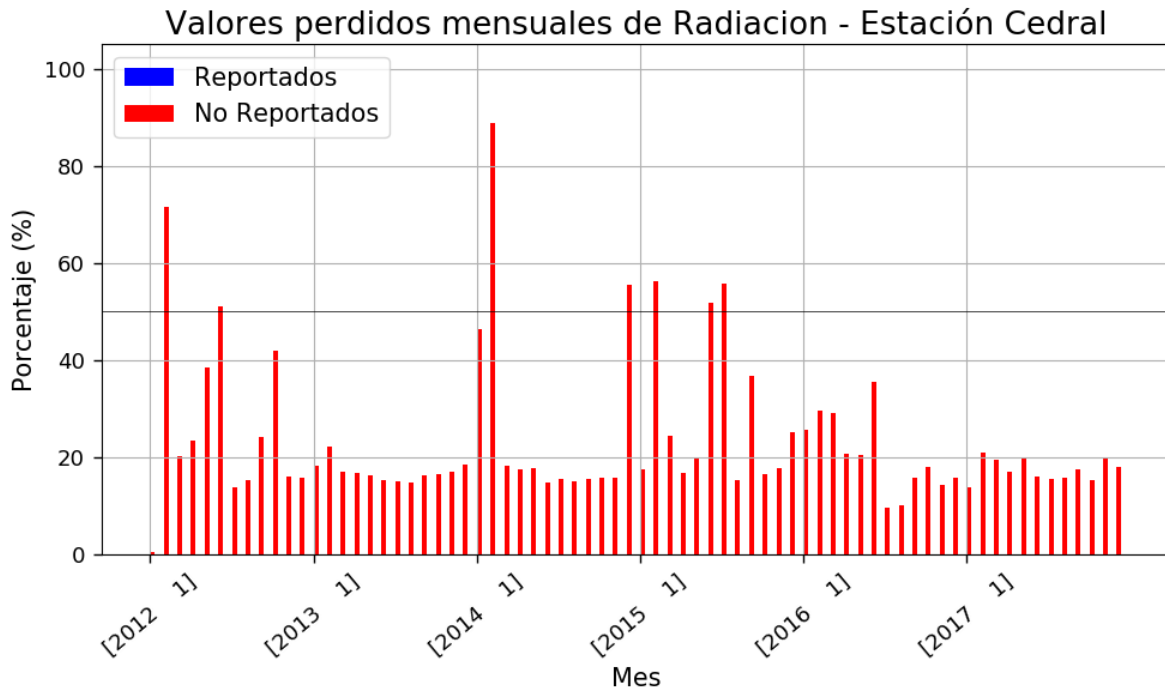


Figura B.1. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I Cedral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

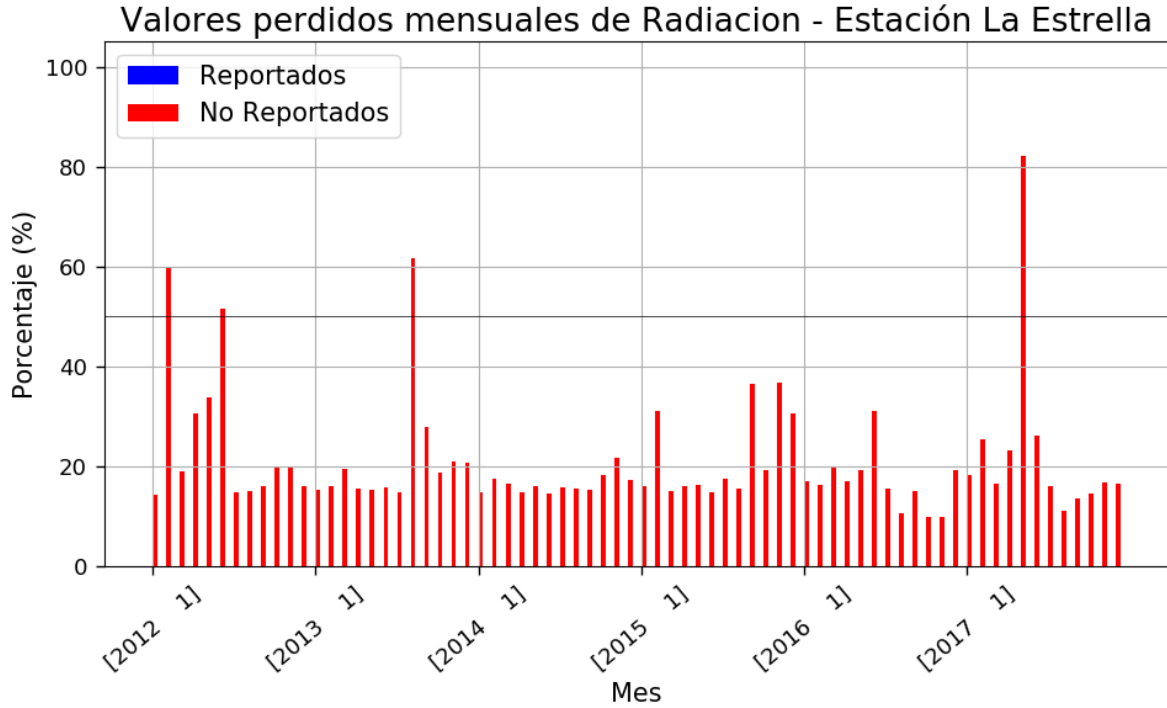


Figura B.2. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I La Estrella. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

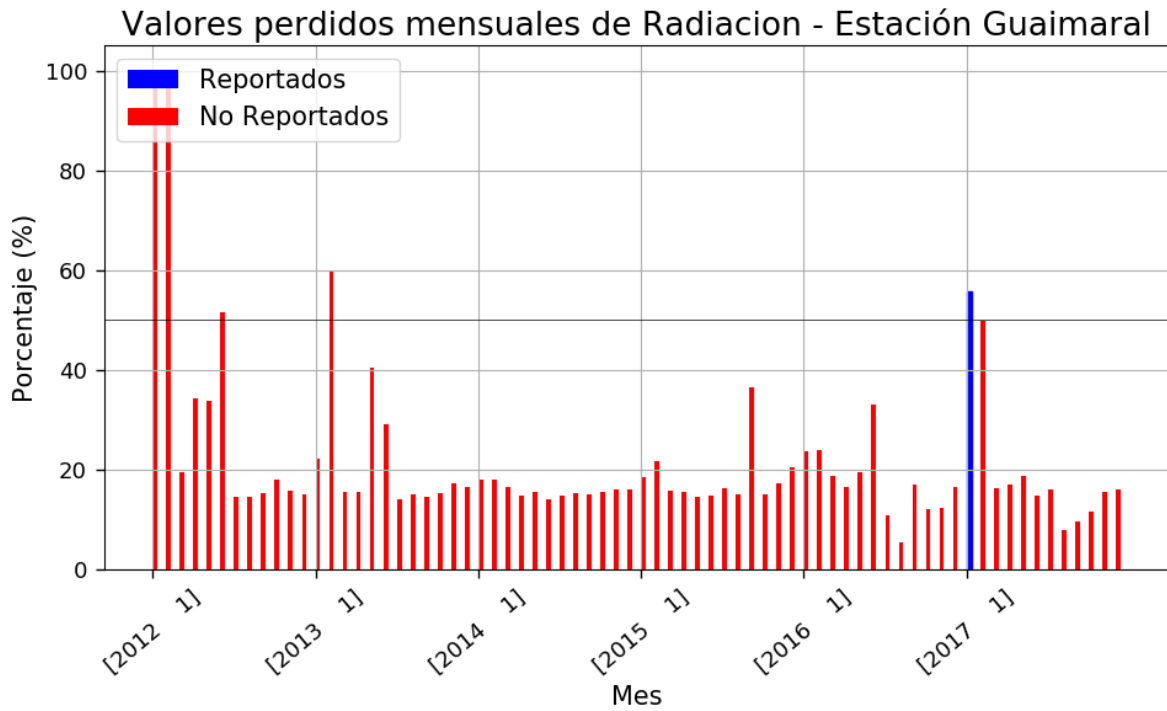


Figura B.3. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I Guaimaral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

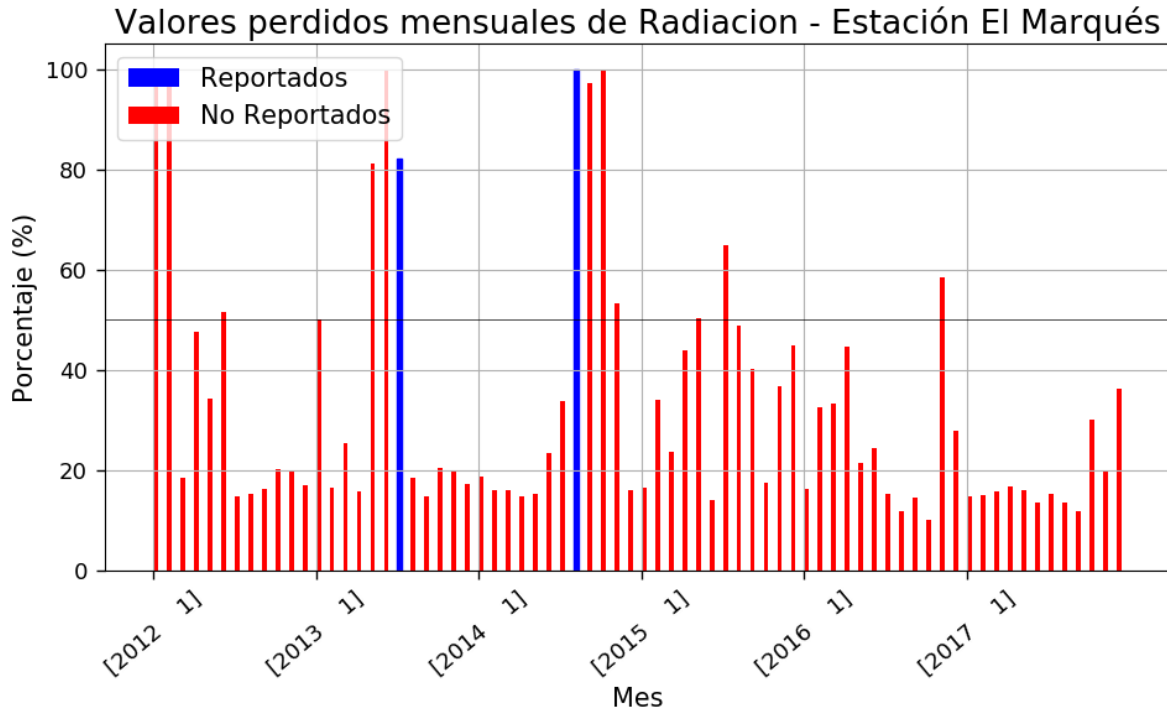


Figura B.4. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I El Marqués. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportado

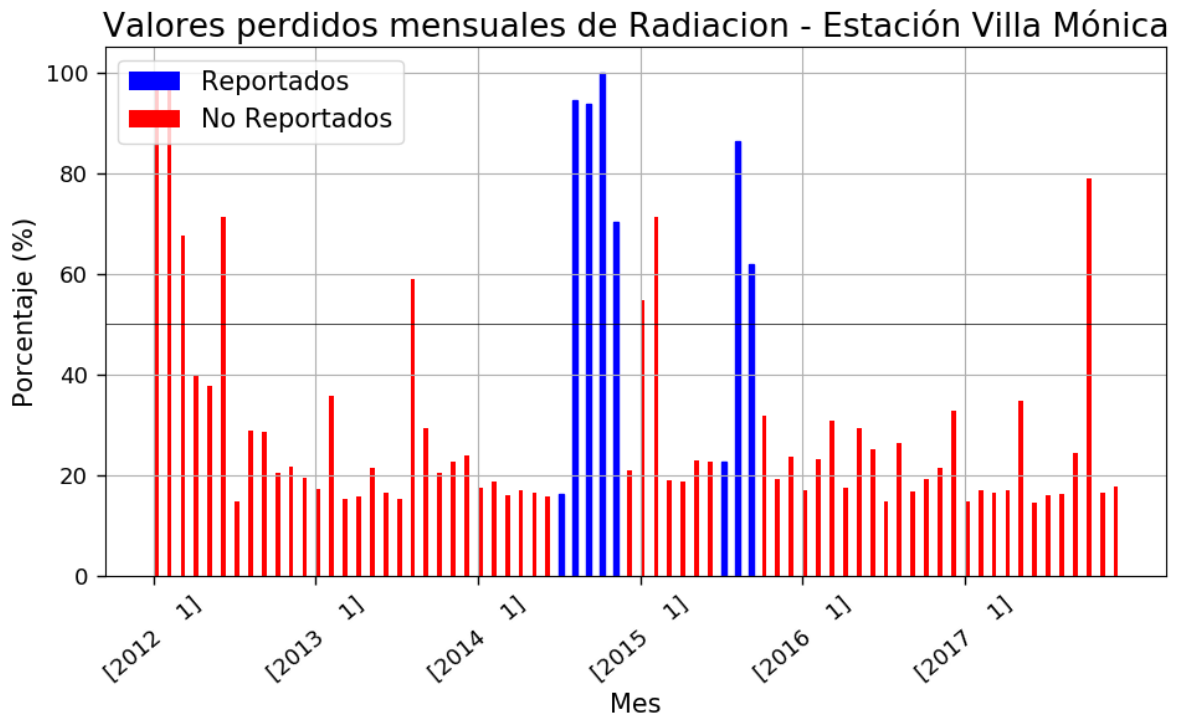


Figura B.5. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I Villa Mónica. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

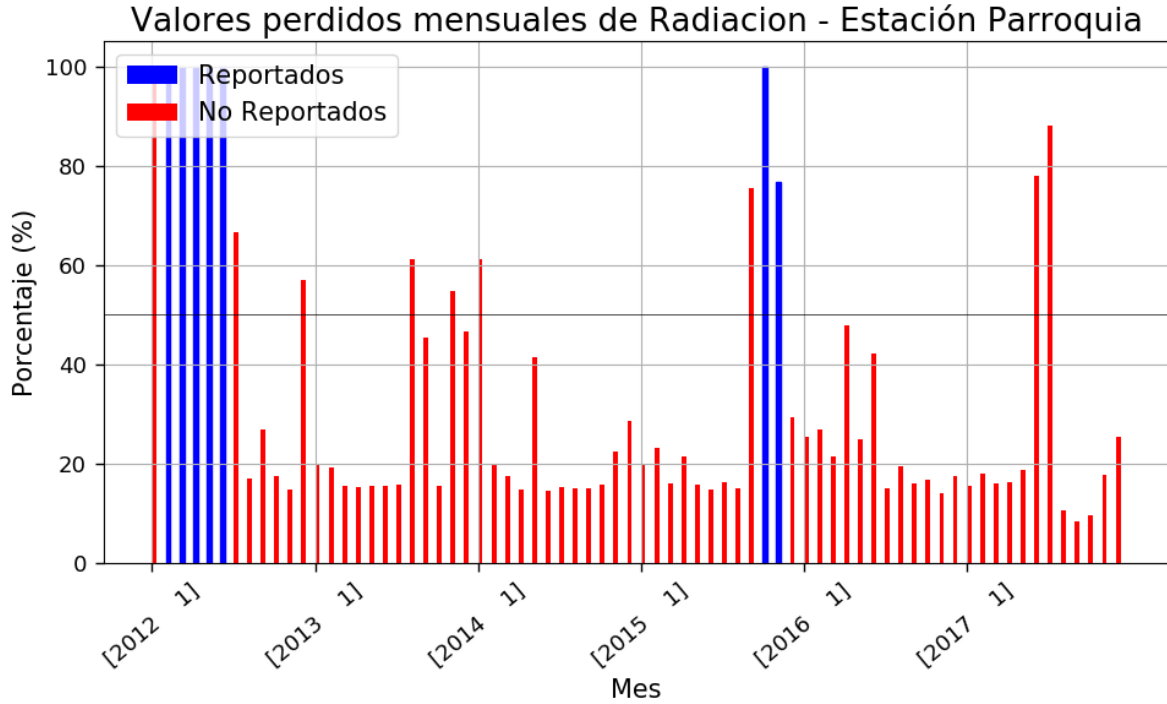


Figura B.6. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

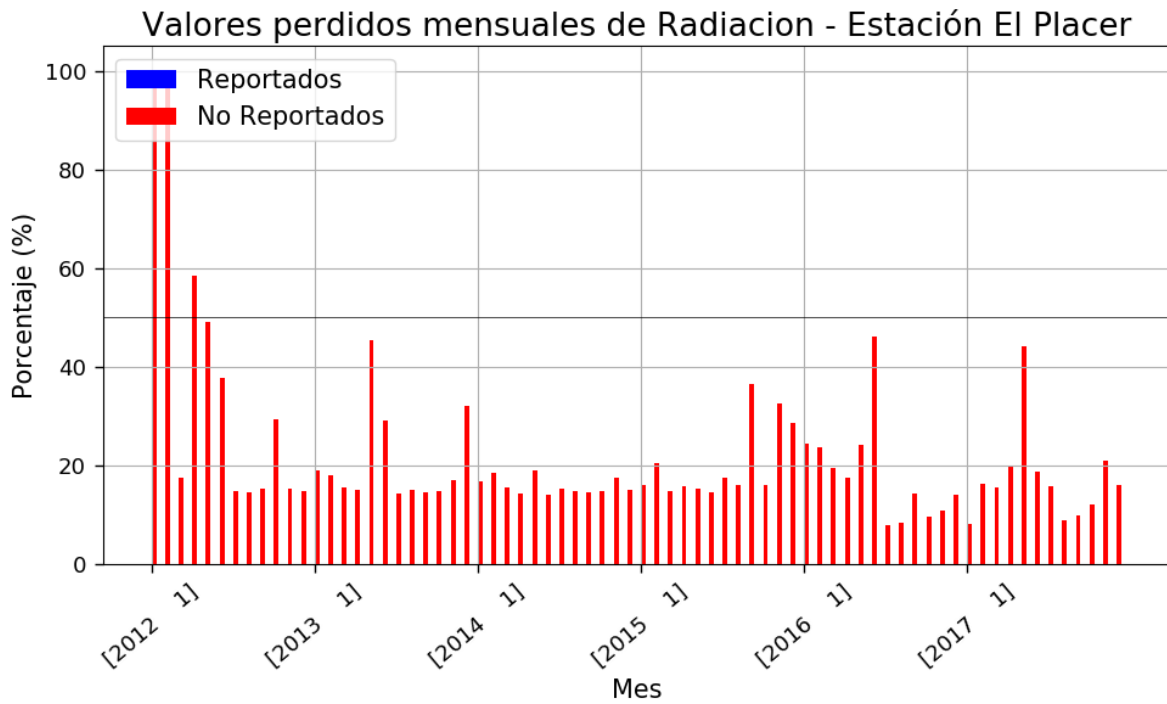


Figura B.7. Porcentaje de valores faltantes horarios de radiación para cada mes en la estación N/I El Placer. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

B.2. Precipitación N/I

La precipitación de las estaciones N/I cuenta con un periodo de registro entre enero de 2012 y octubre de 2020. Las Figuras B.8 a B.14 presentan los valores horarios faltantes para las estaciones N/I. Se identifica una cantidad de datos suficiente para los análisis.

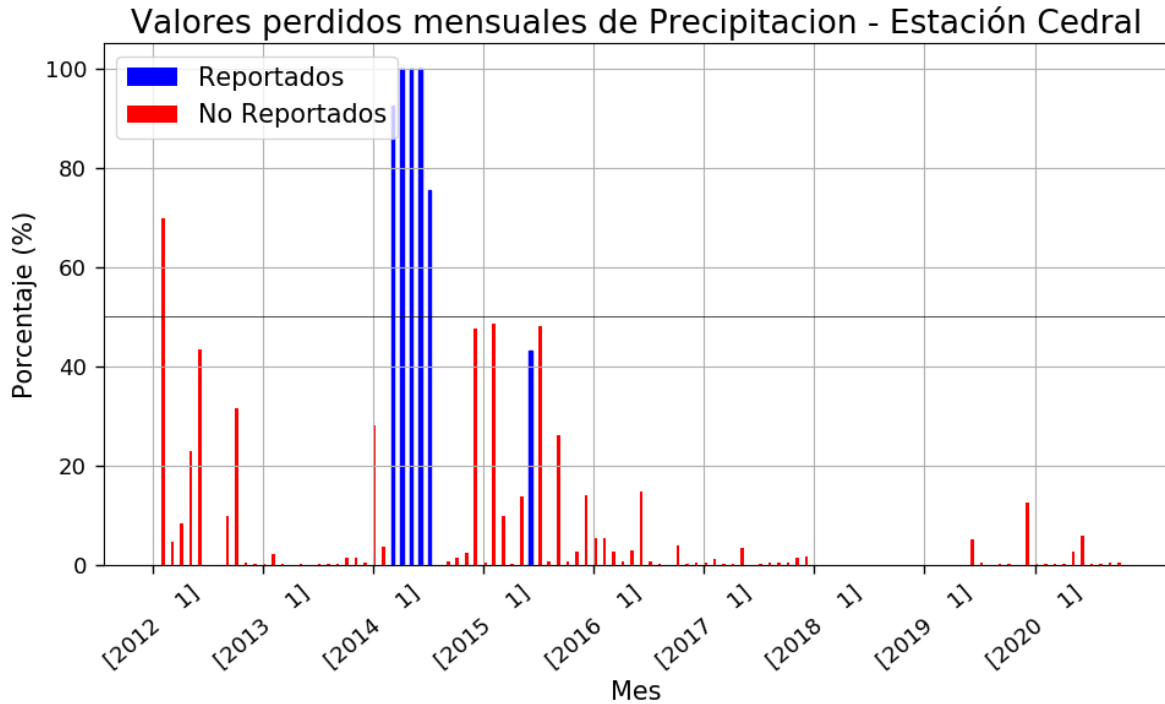


Figura B.8. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I Cedral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

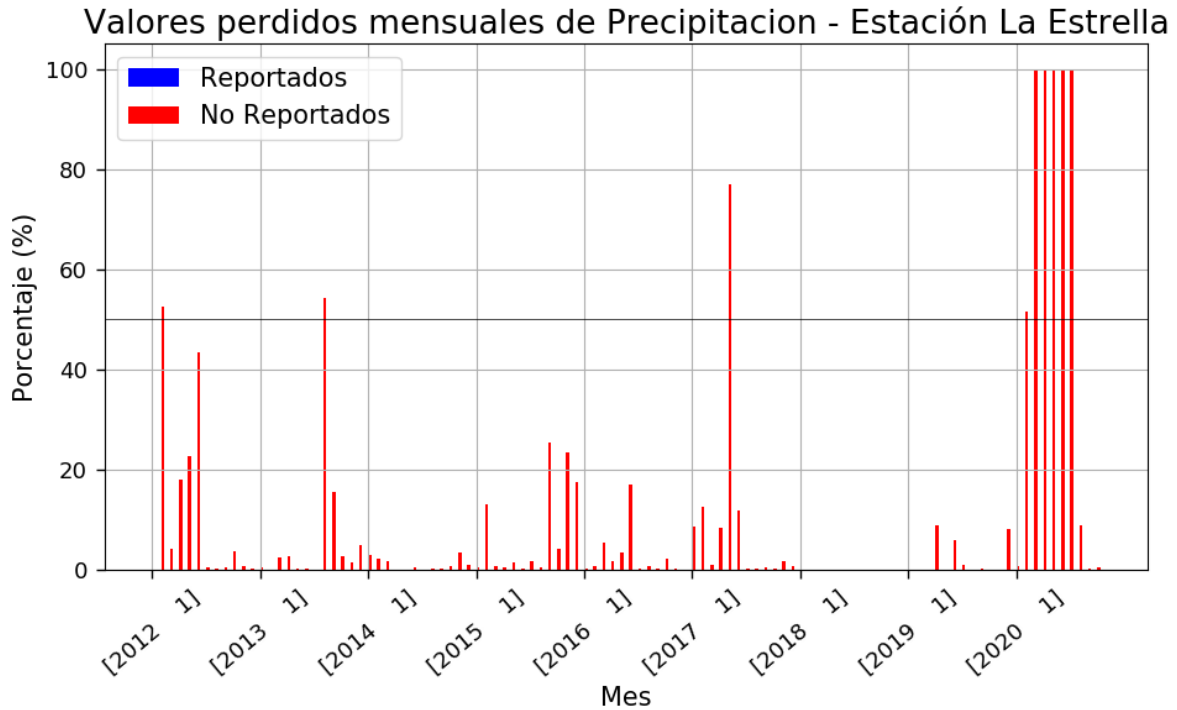


Figura B.9. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I La Estrella. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportado

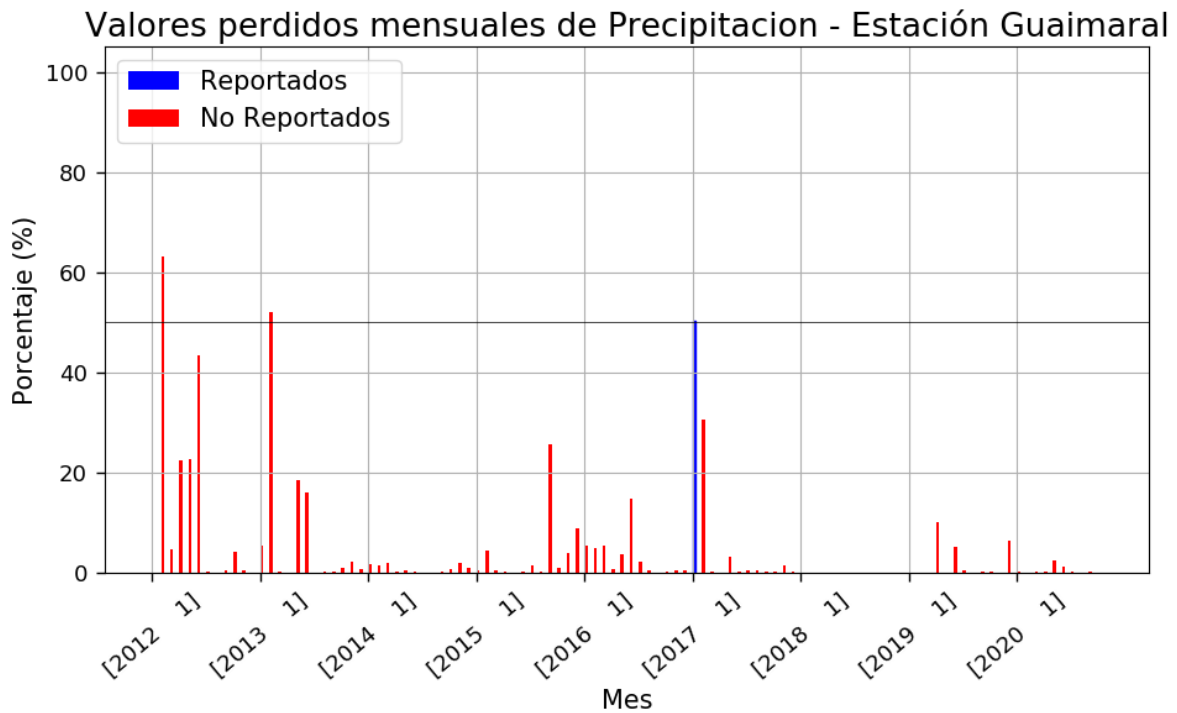


Figura B.10. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I Guaimaral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

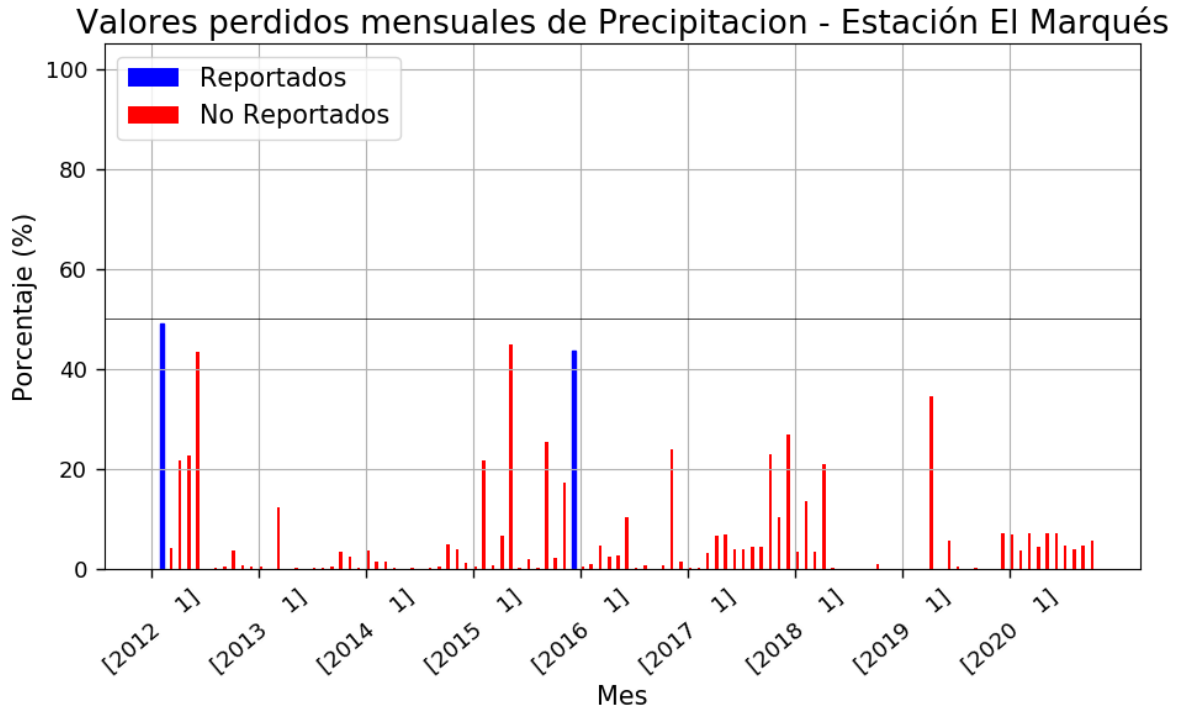


Figura B.11. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I El Marqués. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportado

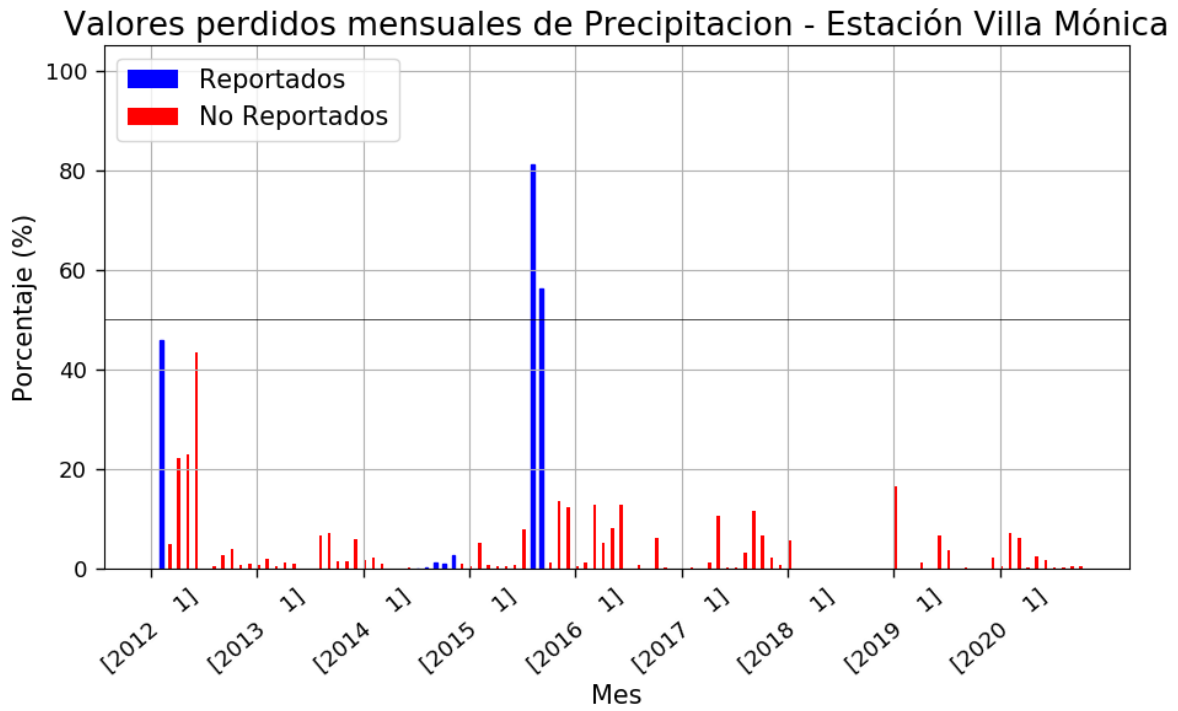


Figura B.12. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I Villa Mónica. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

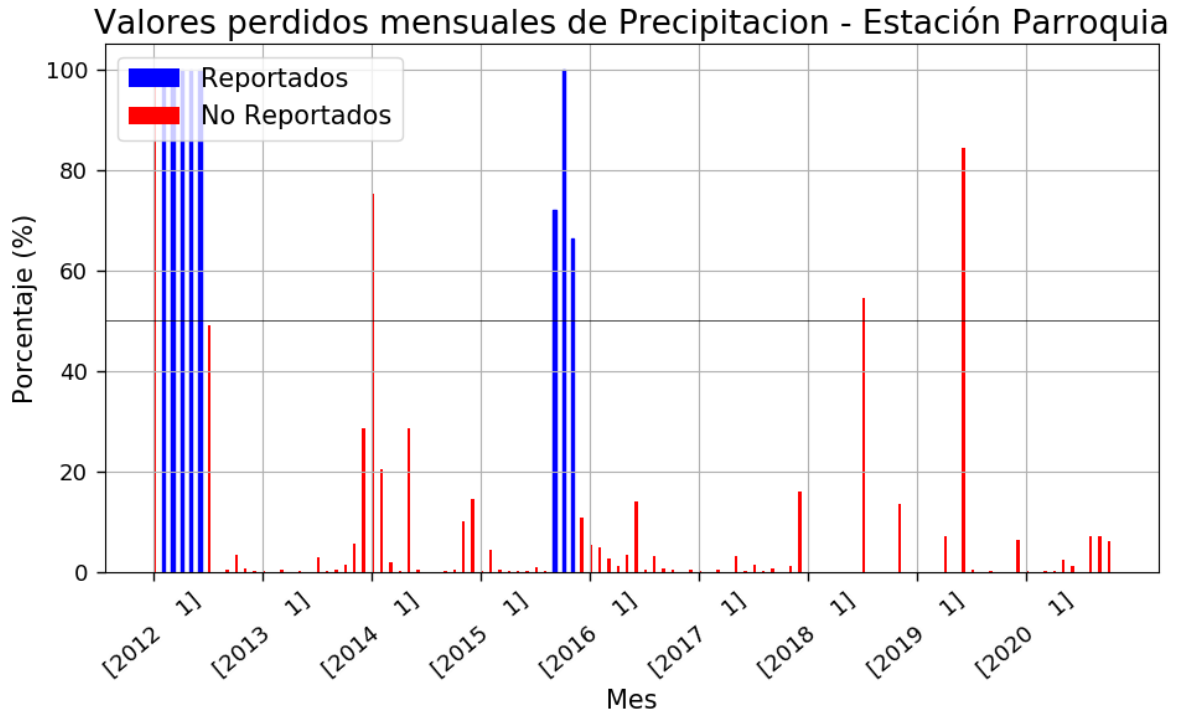


Figura B.13. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados



Figura B.14. Porcentaje de valores faltantes horarios de precipitación para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

B.3. Precipitación NOAA

La precipitación de las estaciones NOAA cuenta con un periodo de registro entre enero del año 2000 y octubre del año 2020. Las Figuras B.15 a B.21 presentan el porcentaje de valores diarios faltantes por mes para las estaciones NOAA. En las estaciones Alfonso Bonilla Aragón, Camilo Daza, El Dorado, Palo Negro y Yariguíes se presentan valores faltantes del 100% hacia el final del periodo de registro, pero la cobertura es suficiente para realizar los análisis.

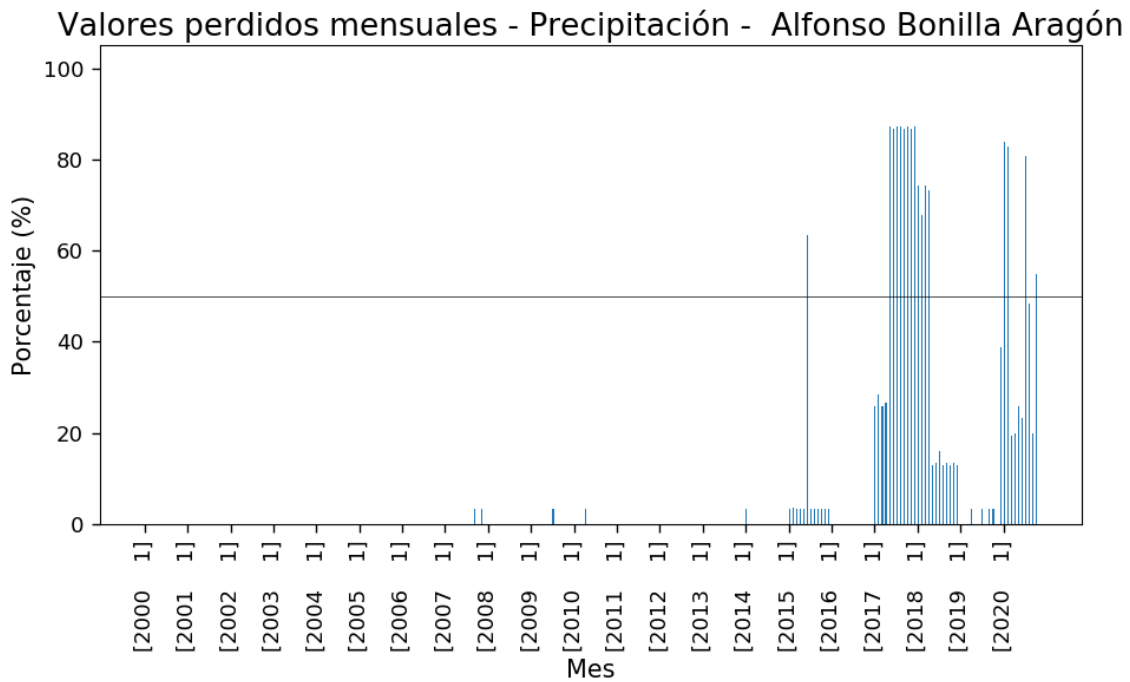


Figura B. 15. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA Alfonso Bonilla Aragón. La línea horizontal marca el 50%

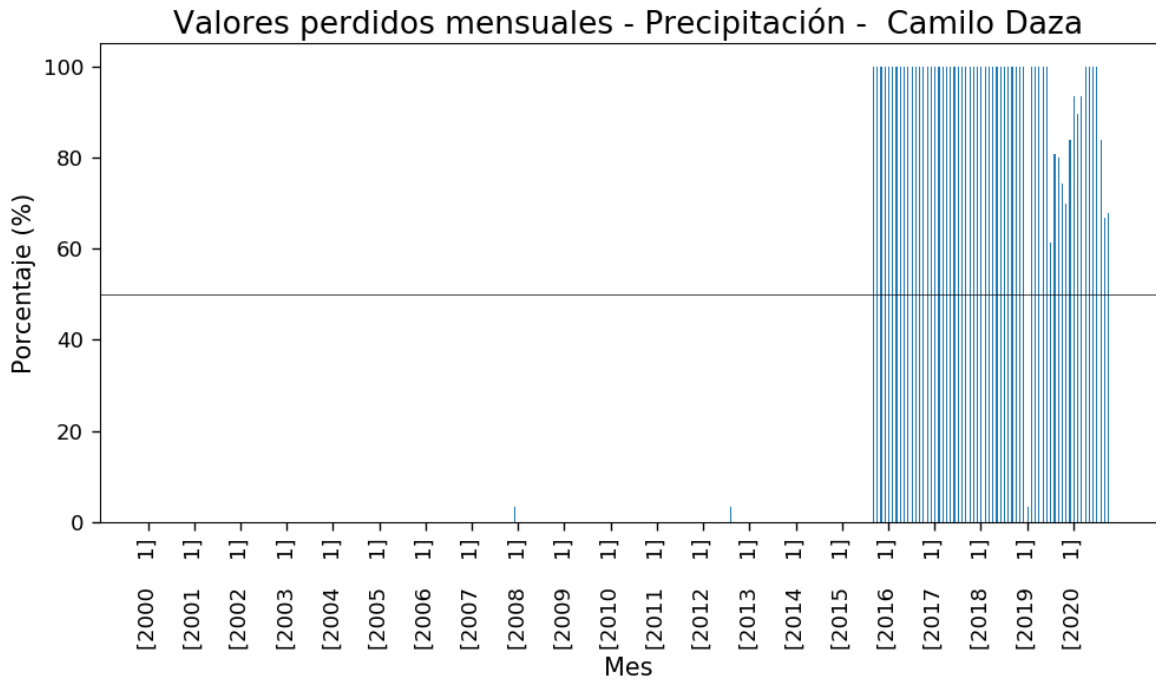


Figura B.16. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA Camilo Daza . La línea horizontal marca el 50%

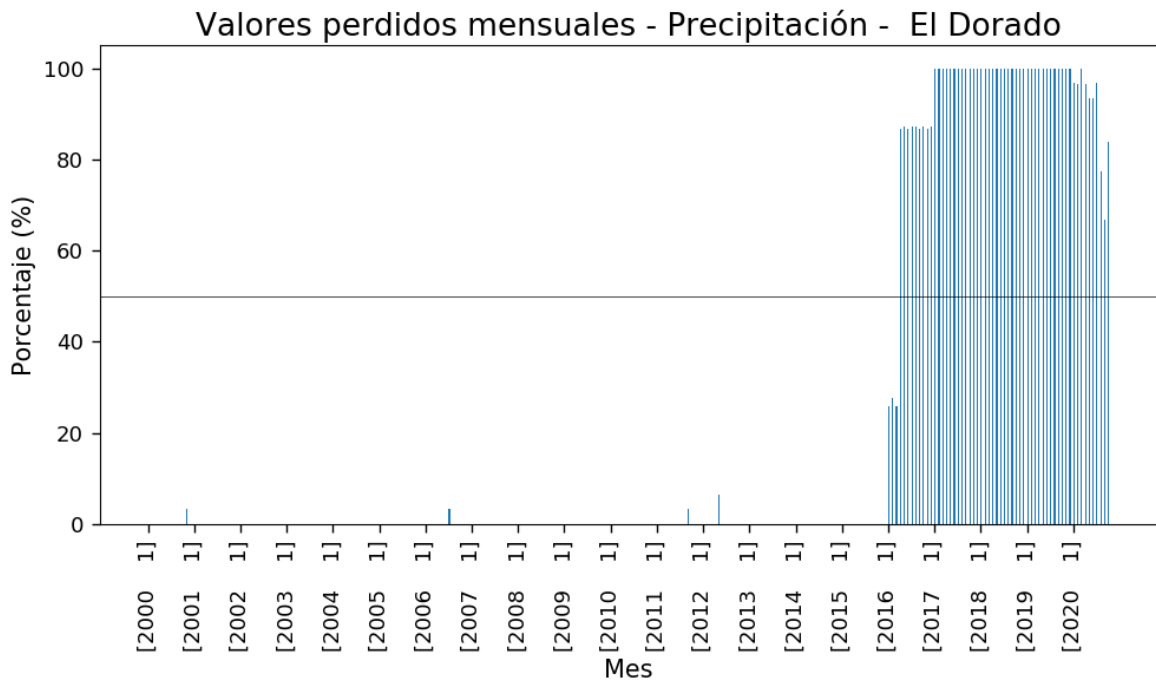


Figura B.17. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA El Dorado . La línea horizontal marca el 50%

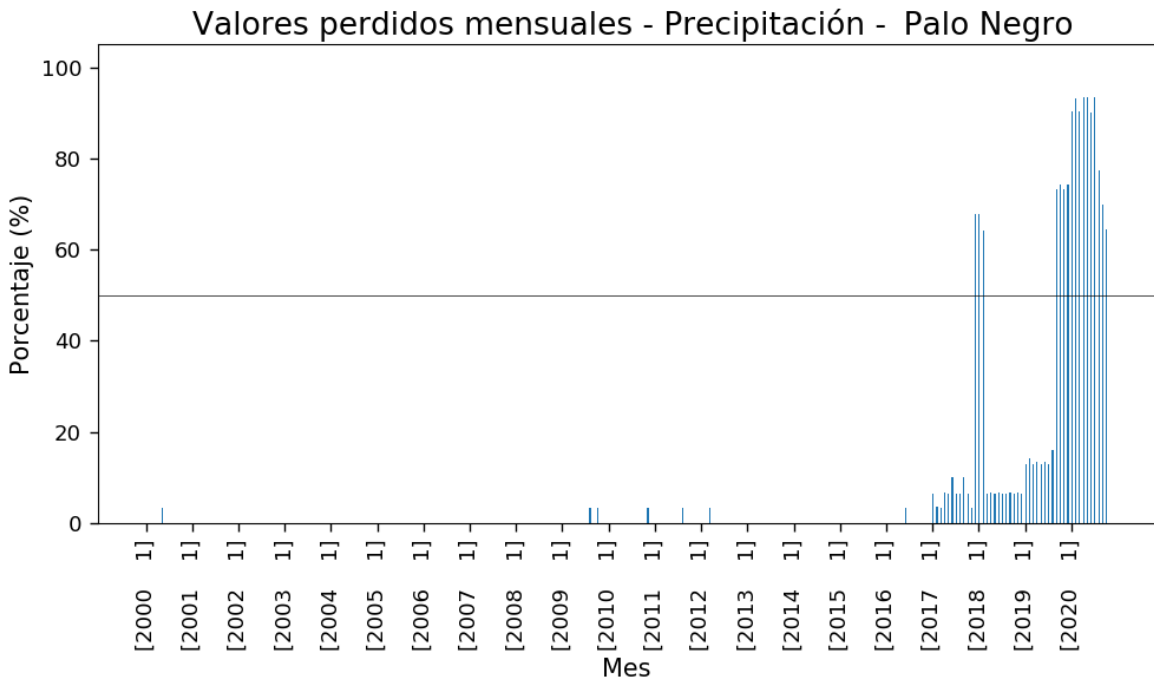


Figura B.18. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA Palo Negro . La línea horizontal marca el 50%

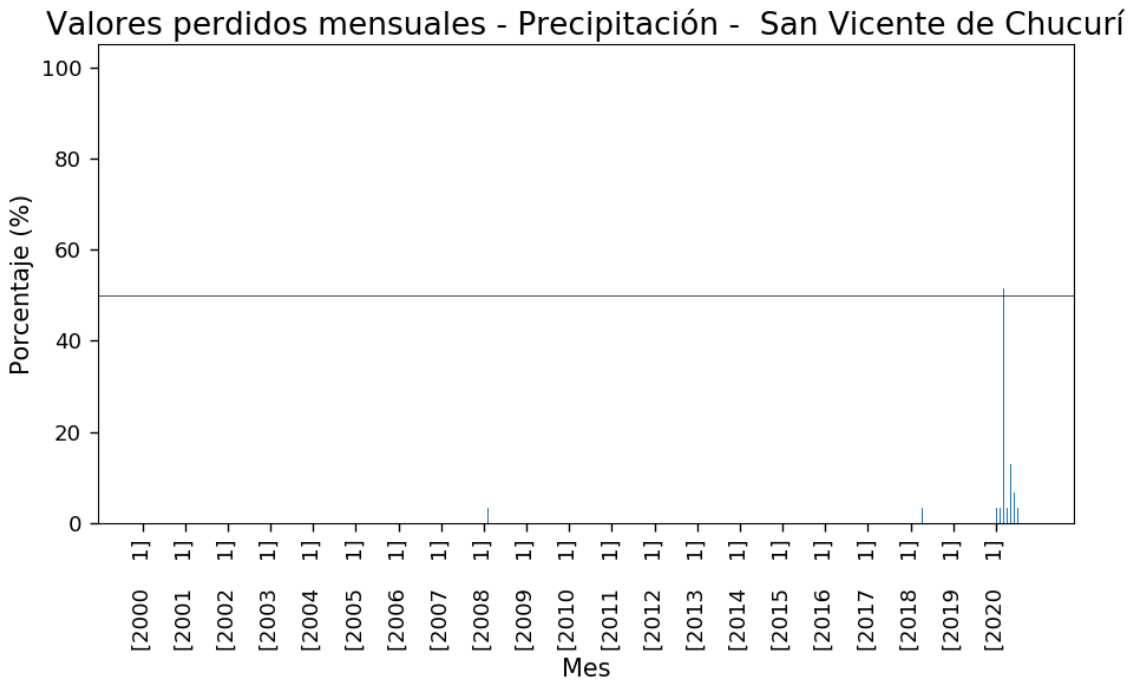


Figura B.19. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA San Vicente de Chucurí. La línea horizontal marca el 50%

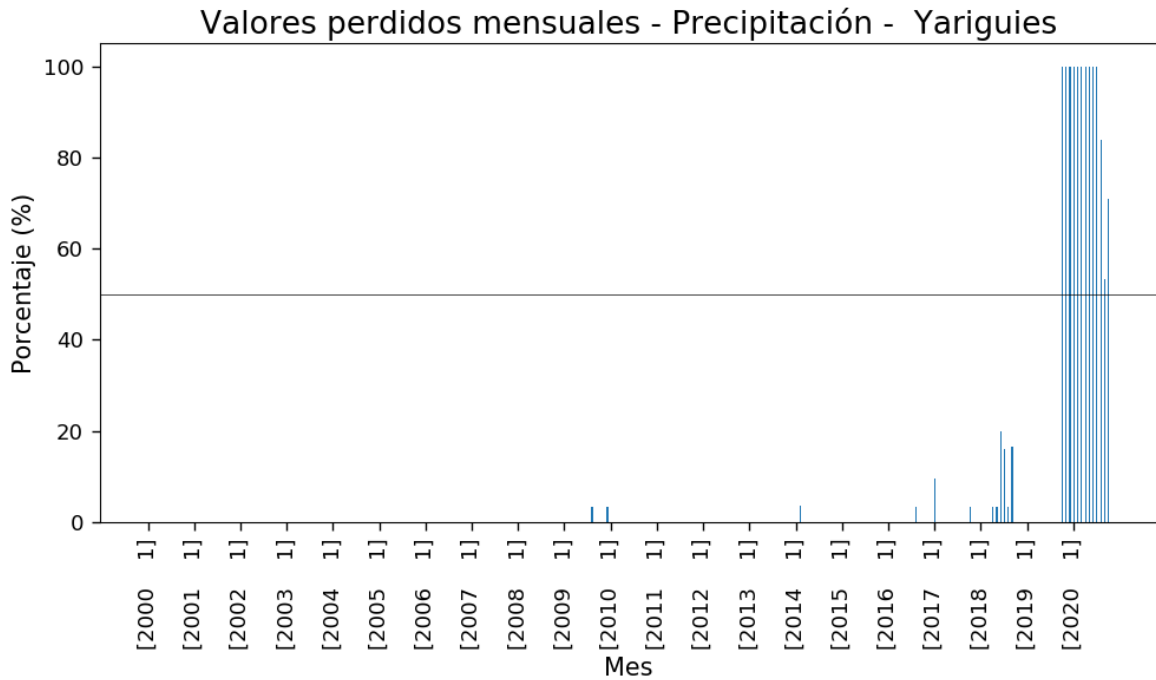


Figura B.20. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA AYariguies. La línea horizontal marca el 50%

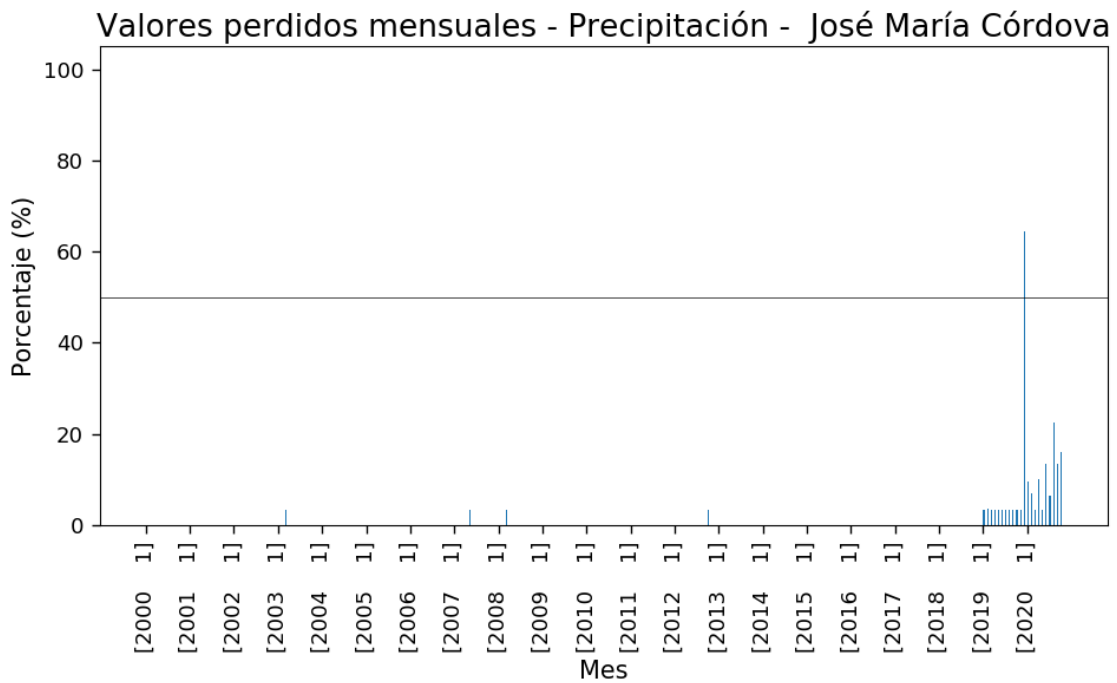


Figura B.21. Porcentaje de valores faltantes diarios de precipitación para cada mes en la estación NOAA José María Córdova. La línea horizontal marca el 50%

B.4. Velocidad y dirección Viento N/I

La velocidad y dirección del viento en las estaciones N/I fueron analizadas entre enero de 2012 y diciembre de 2017. Las Figuras B.22 a B.28 presentan el porcentaje de valores horarios faltantes por mes para la velocidad del viento (son los mismos para la dirección del viento). En general, la cantidad de datos disponible es suficiente para realizar los análisis. Para esta variable no se cuenta con datos de estaciones a nivel regional y/o nacional.

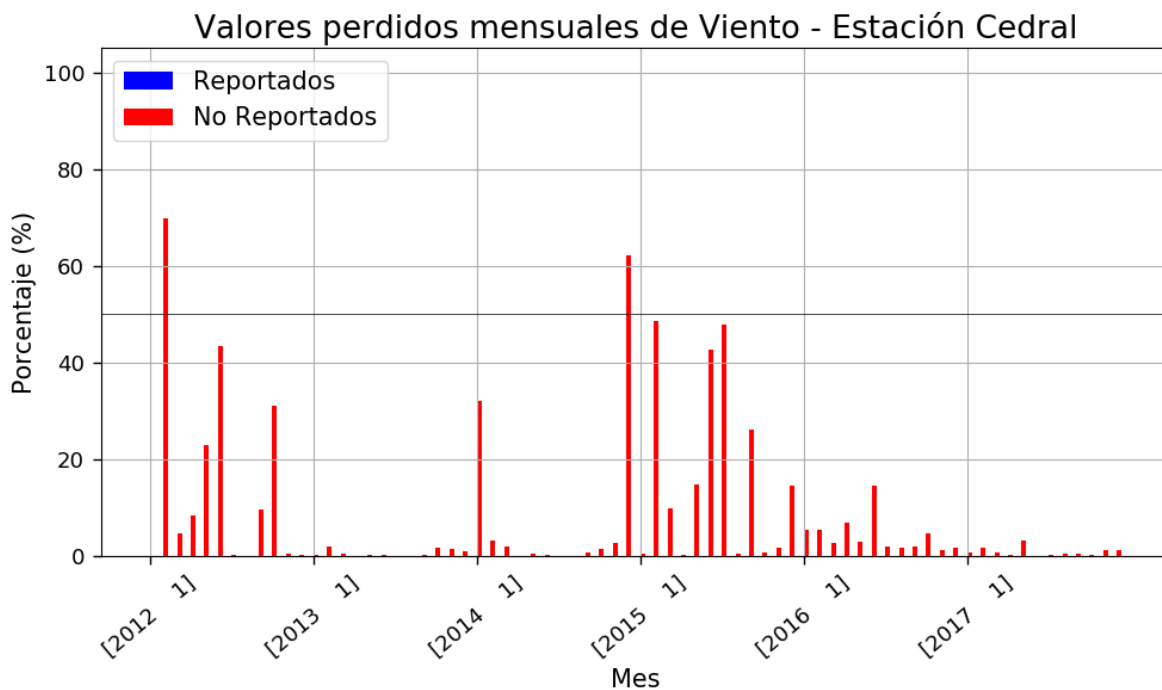


Figura B.22. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I Cedral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

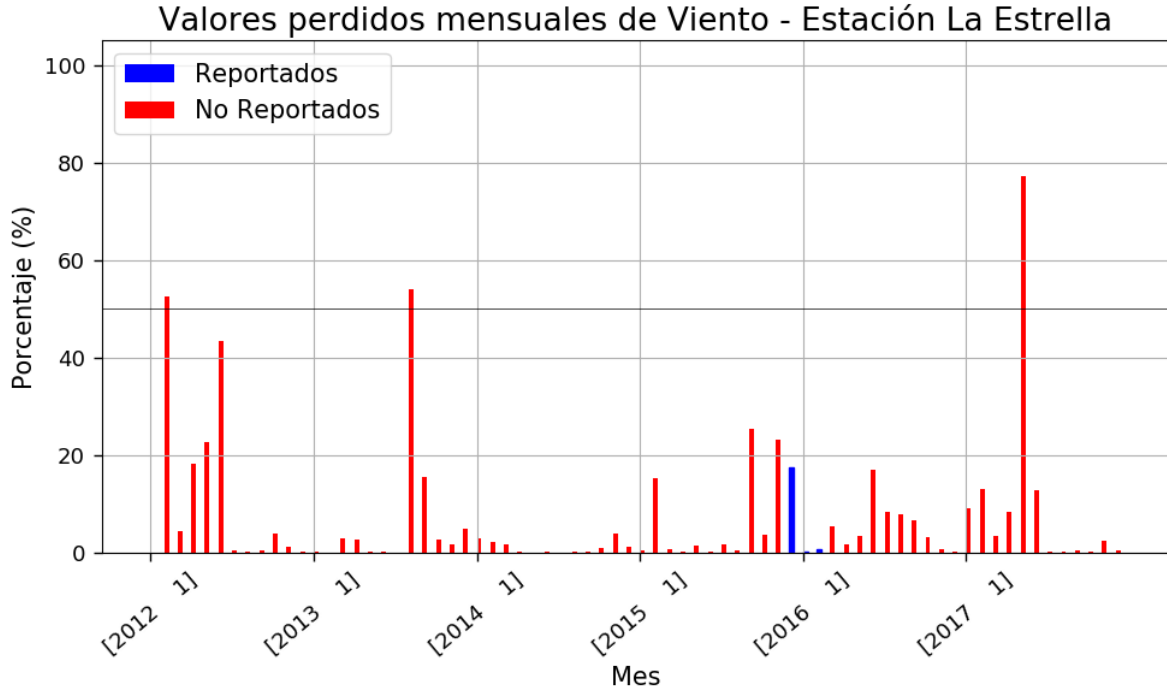


Figura B.23. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I La Estrella. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

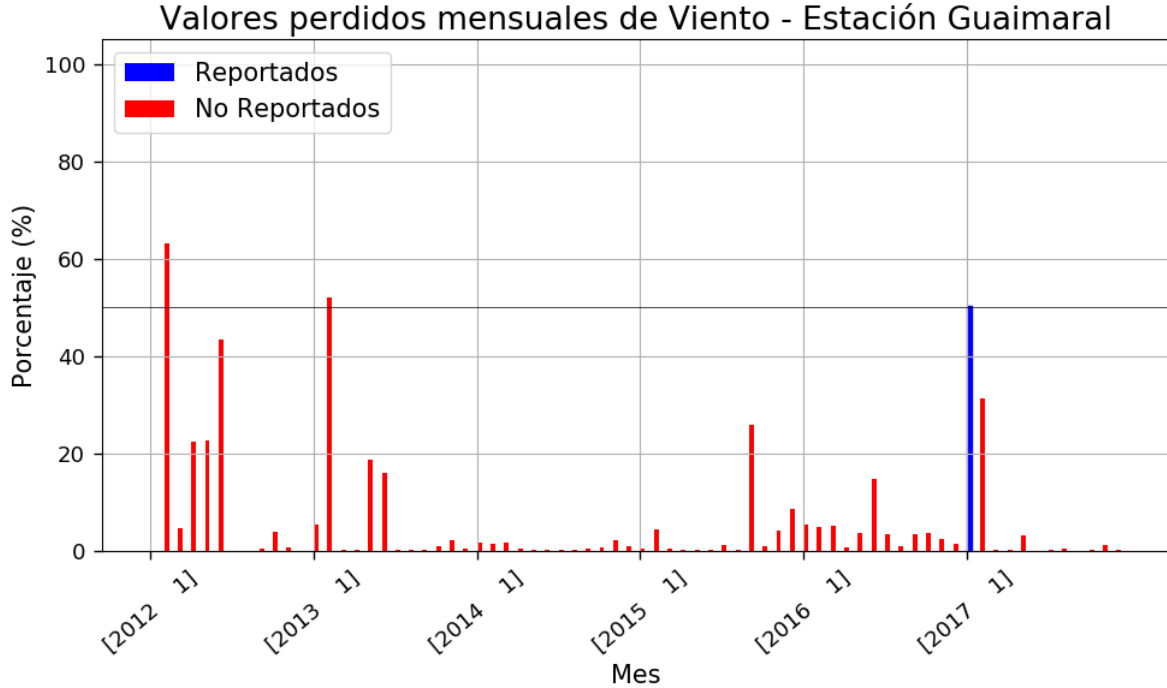


Figura B.24. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I Guaimaral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

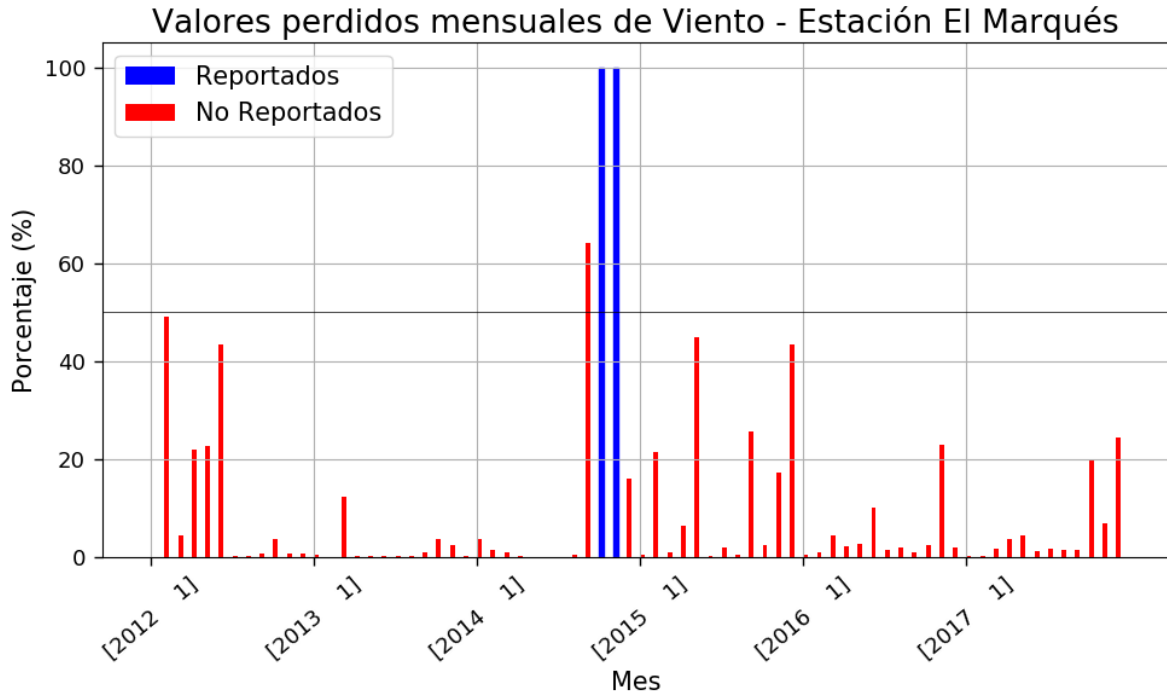


Figura B.25. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I El Marqués. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

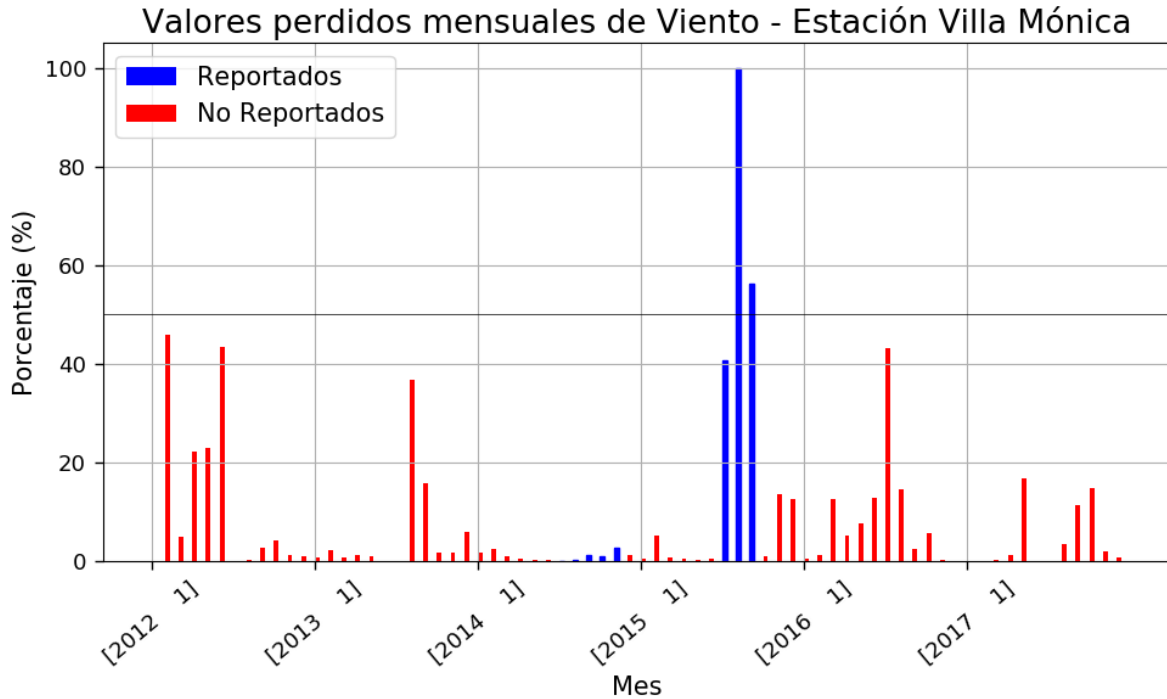


Figura B.26. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I Villa Mónica. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

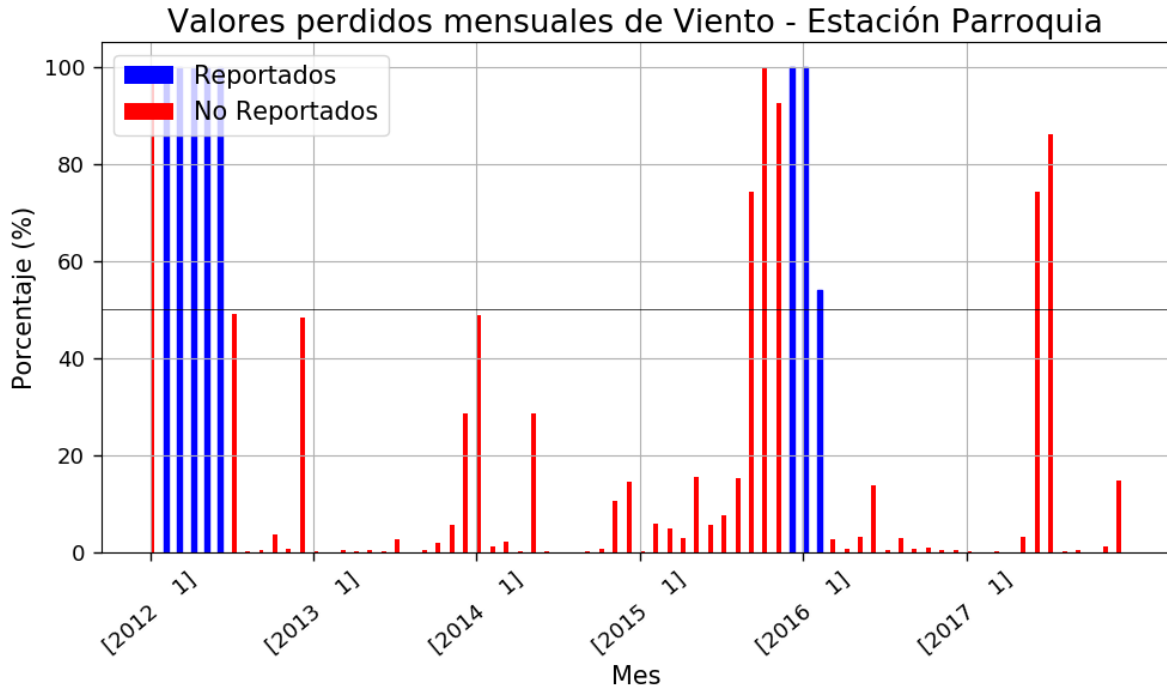


Figura B.27. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

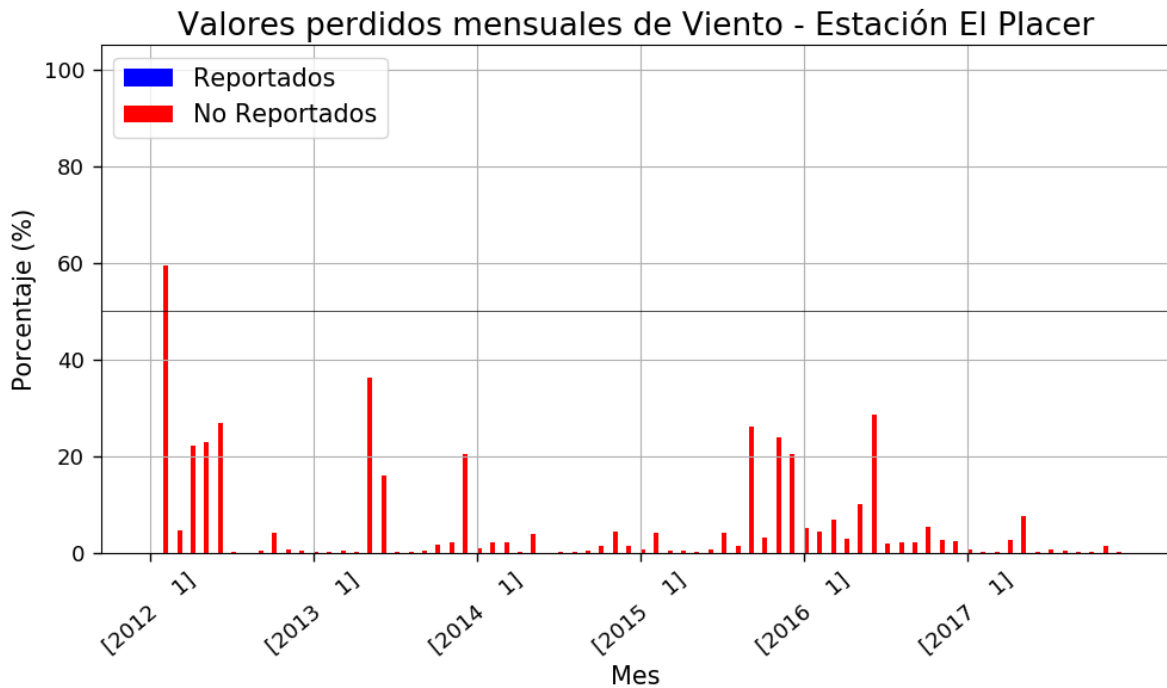


Figura B.28. Porcentaje de valores faltantes horarios de velocidad del viento para cada mes en la estación N/I El Placer. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

B.5. Temperatura N/I

La temperatura se analizó entre enero del año 2012 y octubre del año 2020. Las Figuras de la B.29 a la B.35 presentan los valores horarios faltantes para cada mes en el periodo de registro. En general los datos son suficientes para realizar los análisis.

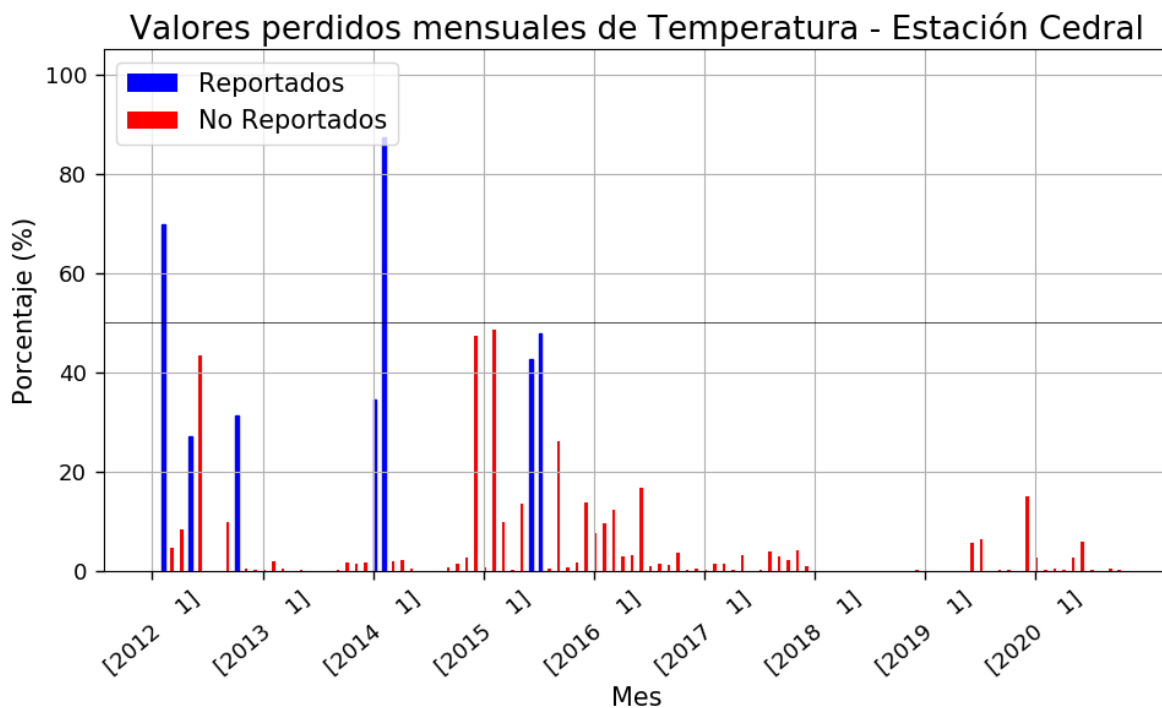


Figura B.29. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I Cedral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

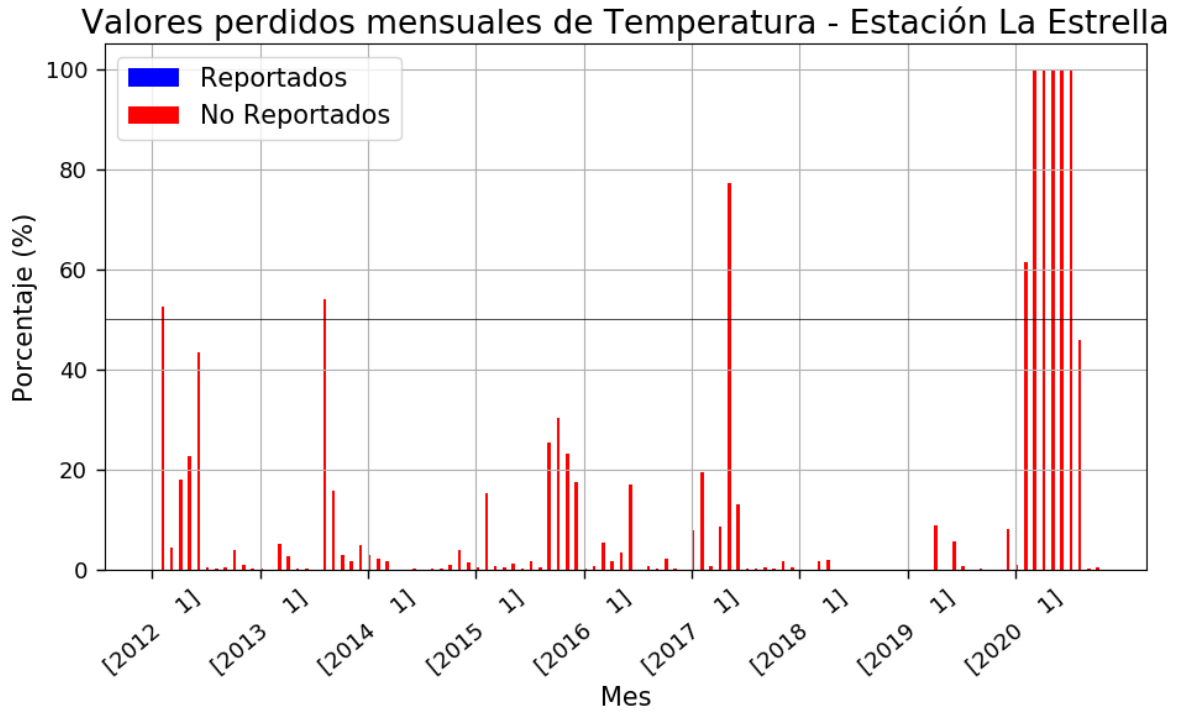


Figura B.30. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I La Estrella. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

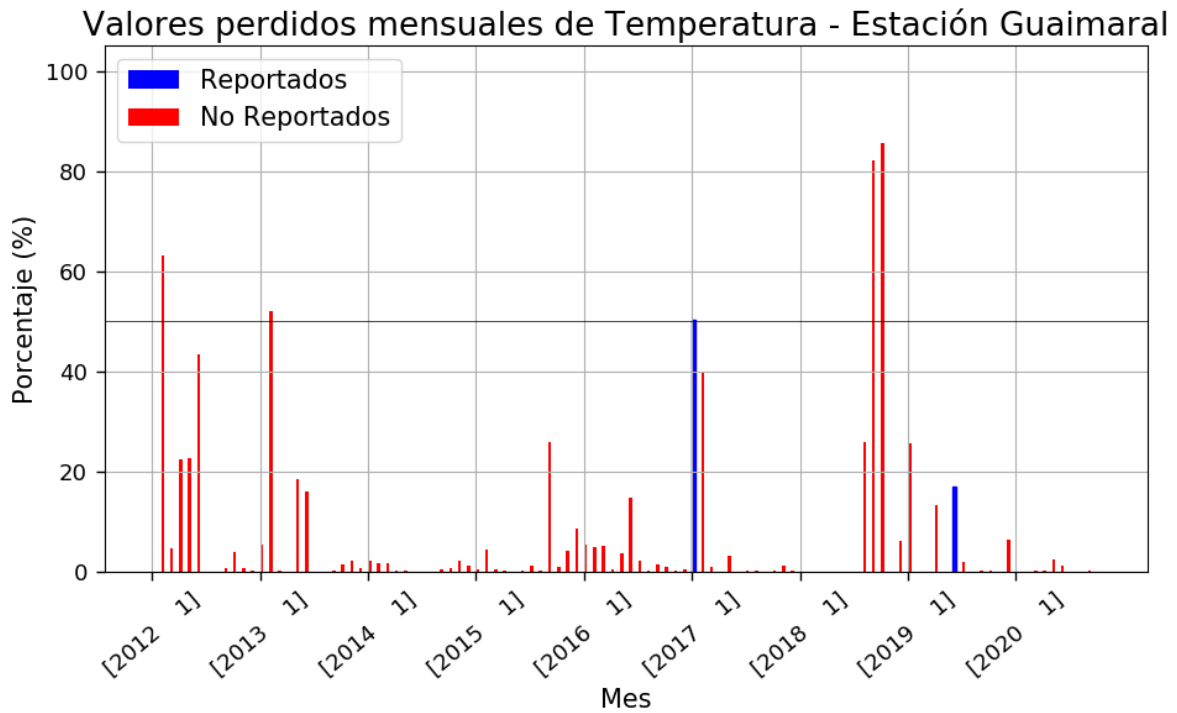


Figura B.31. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I Guaimaral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

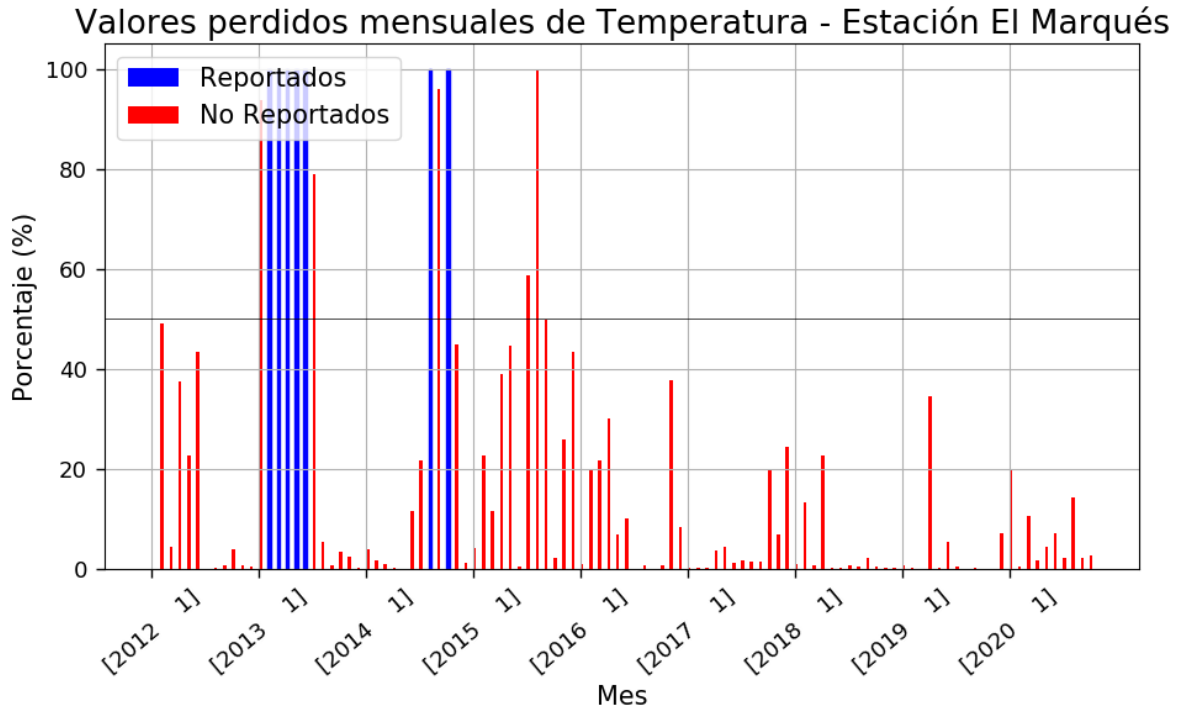


Figura B.32. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I El Marqués. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

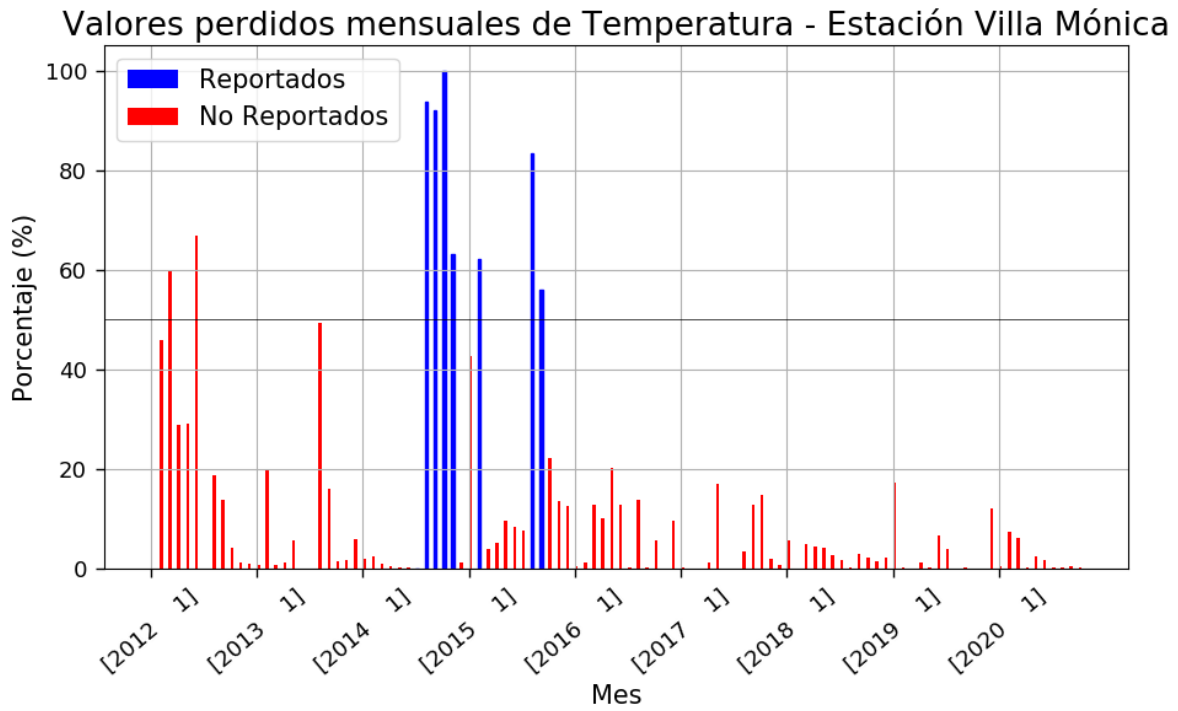


Figura B.33. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I Villa Mónica. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

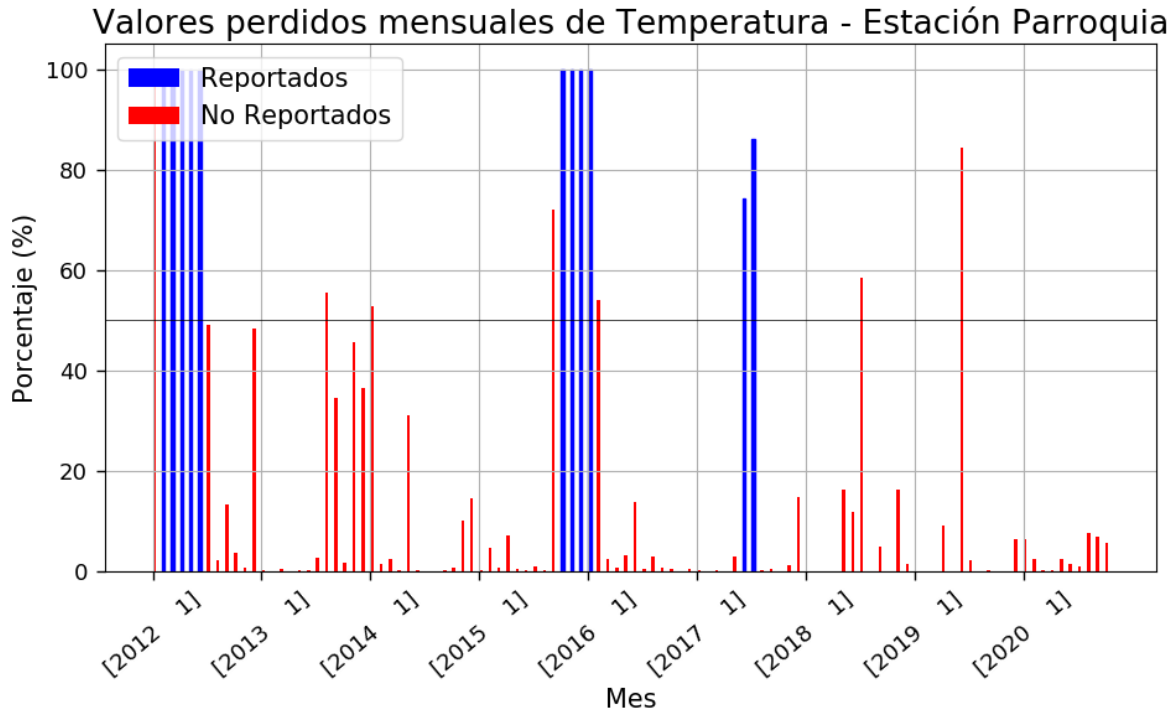


Figura B.34. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

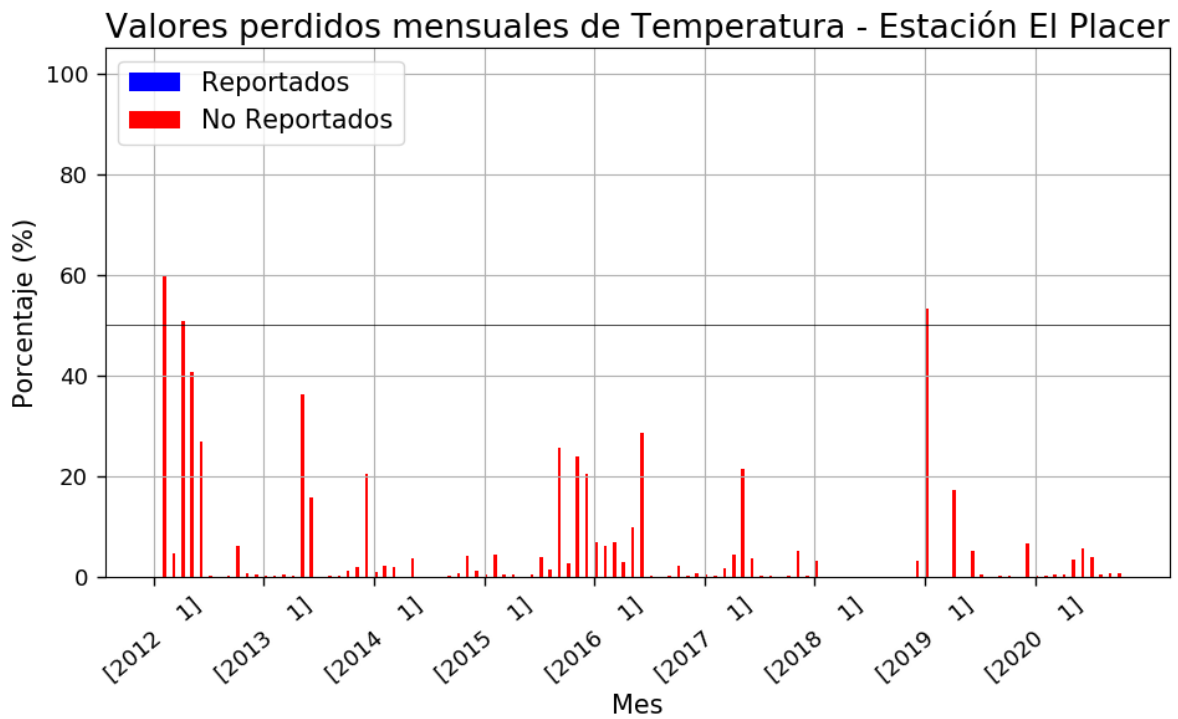


Figura B.35. Porcentaje de valores faltantes horarios de temperatura para cada mes en la estación N/I El Placer. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

B.6. Temperatura NOAA

Los valores faltantes para la temperatura en las estaciones NOAA son iguales para la humedad relativa, por lo que solo se presentaran las figuras para esta variable (Figuras de la B.36 a la B.42). Ambas se analizaron para un periodo de registro entre el 2006 y el 2019. En general los datos disponibles fueron suficientes para realizar los análisis.

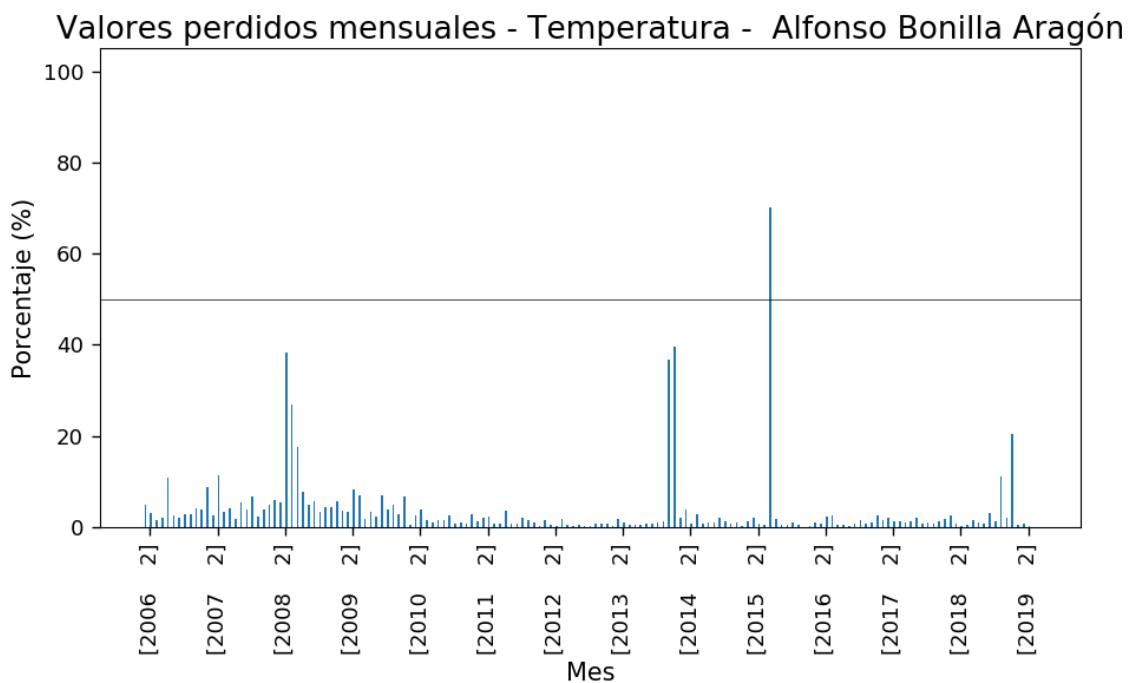


Figura B.36. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA Alfonso Bonilla Aragón. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

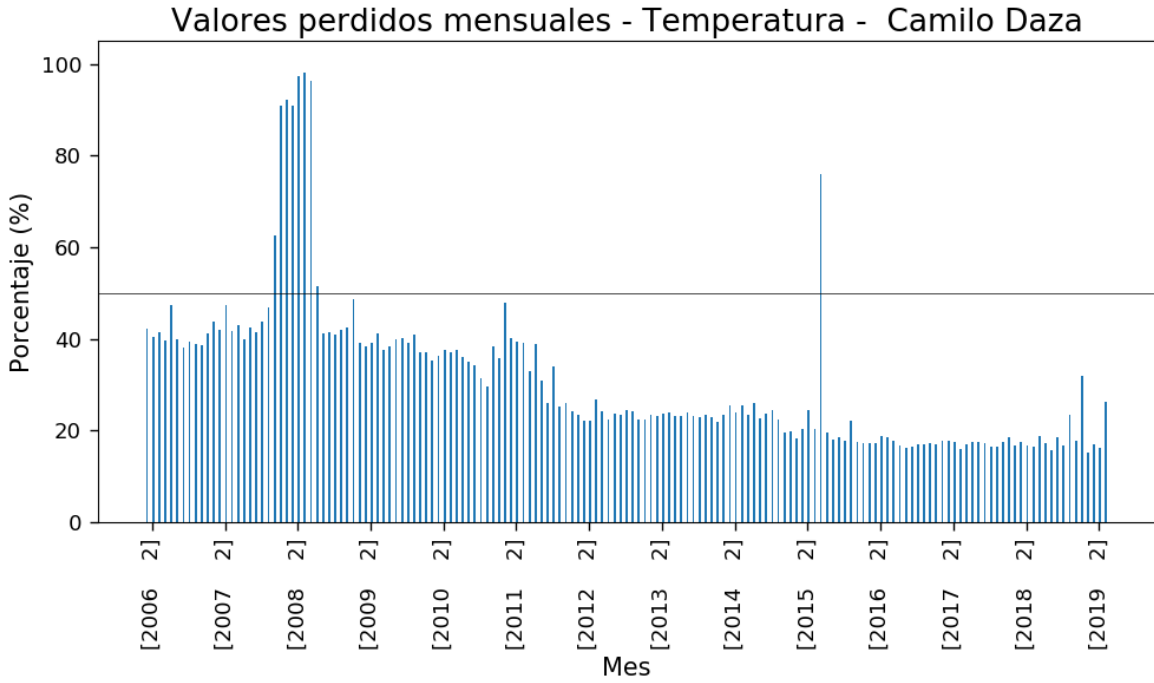


Figura B.37. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA Camilo Daza. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

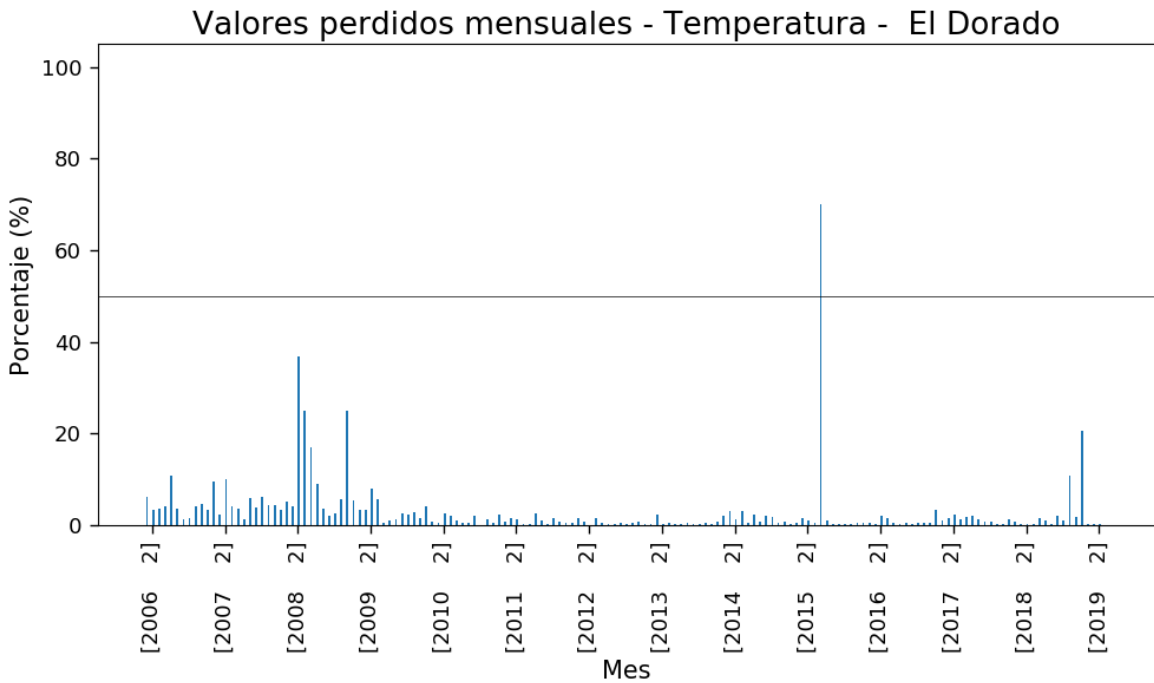


Figura B.38. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA El Dorado. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

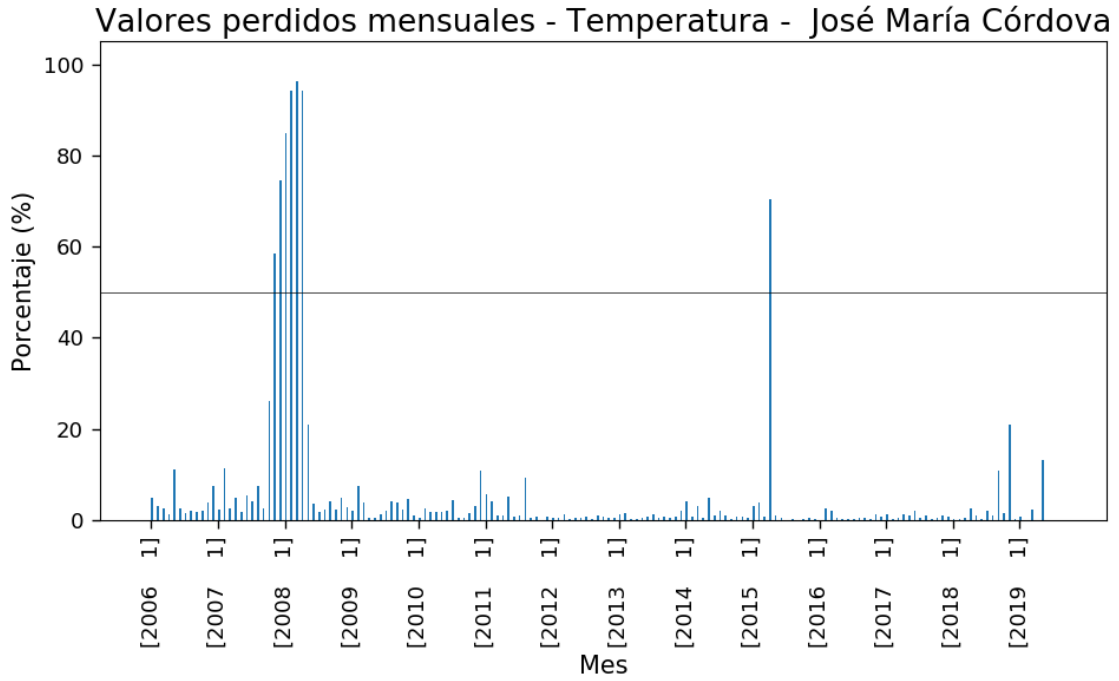


Figura B.39. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA José María Córdova. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

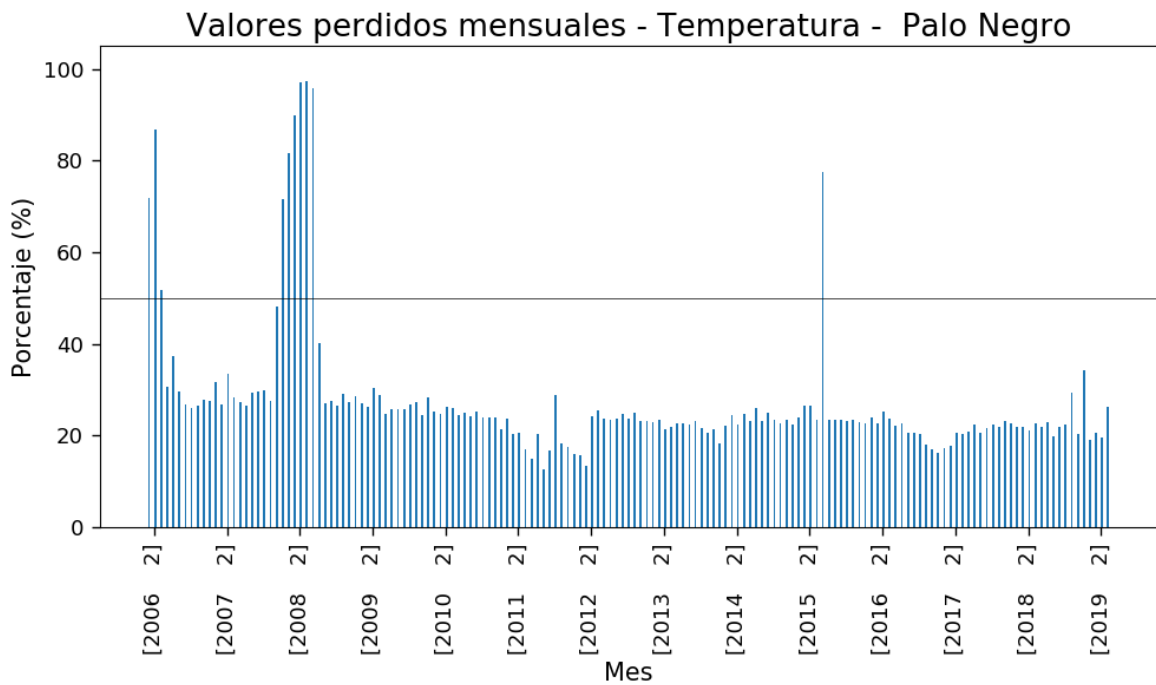


Figura B.40. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA Palo Negro. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

Valores perdidos mensuales - Temperatura - San Antonio Tachira

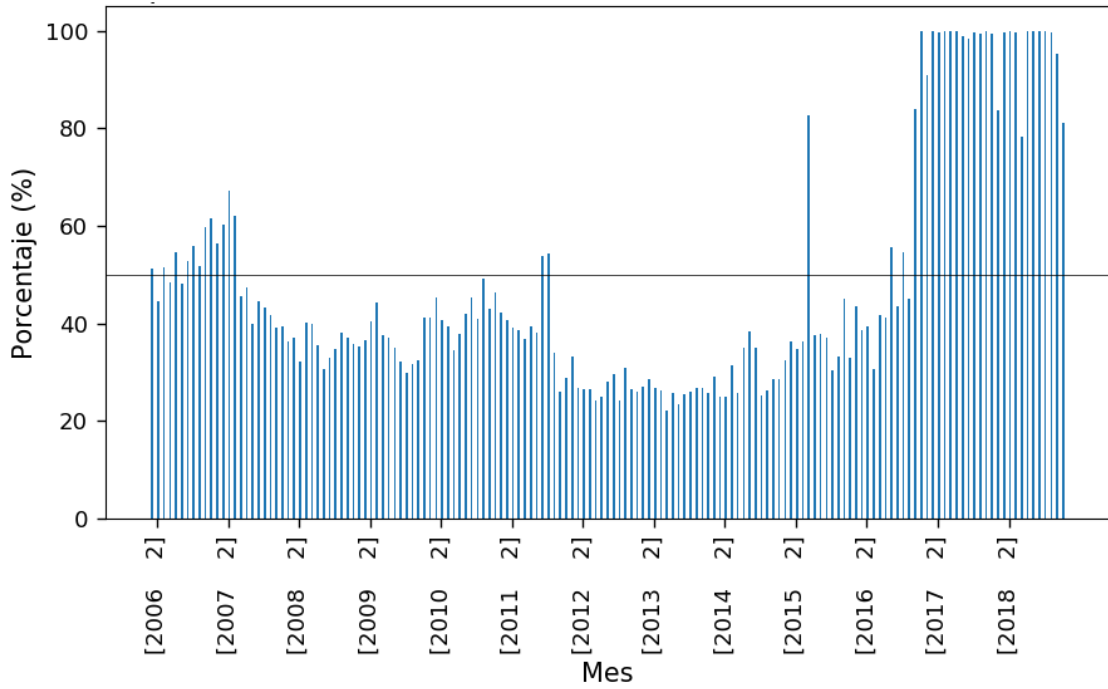


Figura B.41. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA San Antonio Táchira. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes

Valores perdidos mensuales - Temperatura - Yariguíes

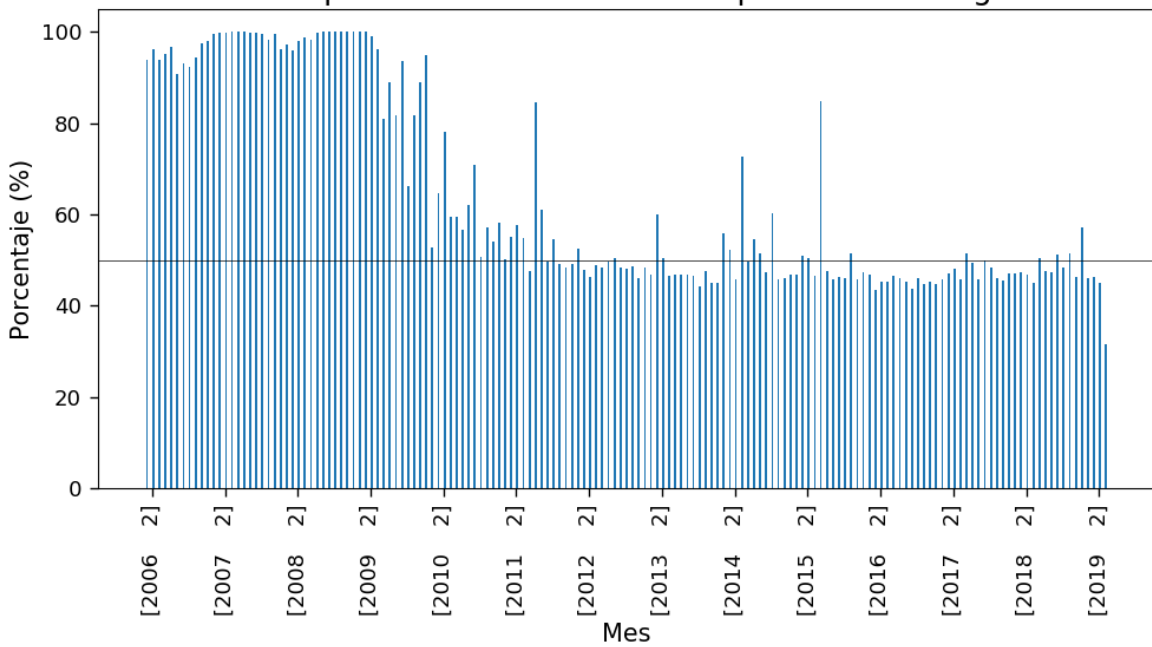


Figura B.42. Porcentajes de valores faltantes horarios representativos para temperatura y humedad relativa para cada mes en la estación NOAA Yariguíes. La línea horizontal indica el 50% de datos faltantes.

B.7. Humedad relativa N/I

La humedad relativa de las estaciones N/I es analizada para el periodo entre enero de 2012 y octubre de 2020. Las Figuras de la B.43 a la B.49 presentan los valores faltantes en esta variable. Los datos fueron suficientes para realizar los análisis.

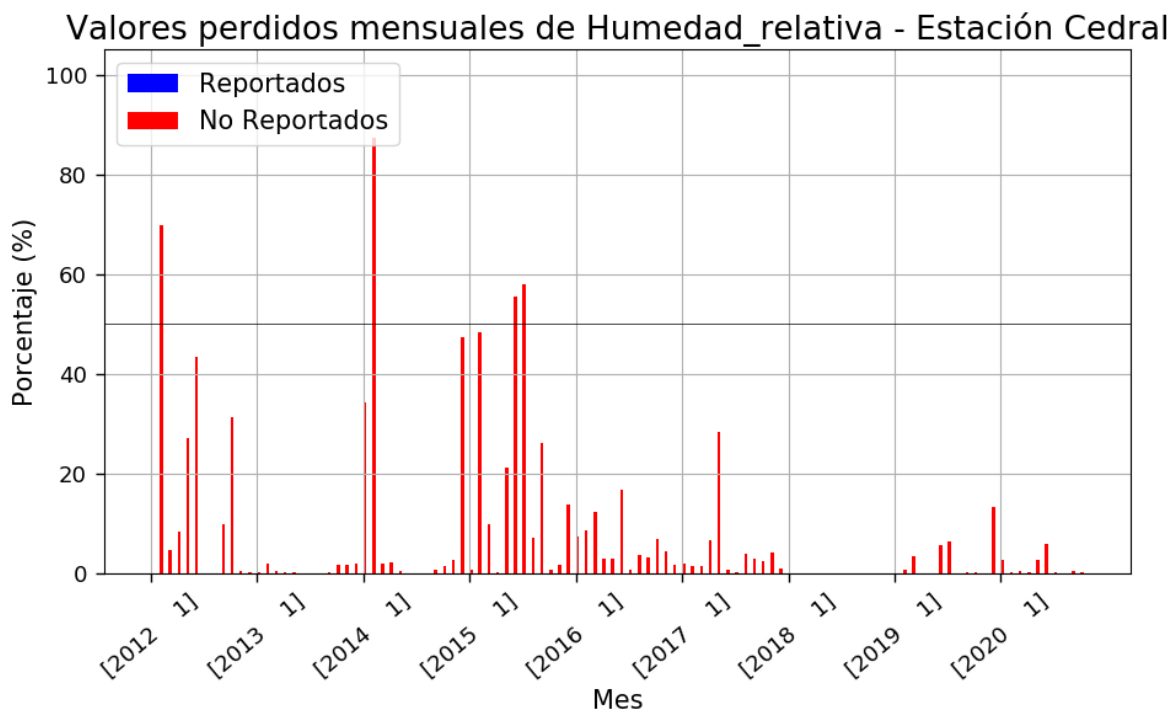


Figura B.43. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I Cedral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación La Estrella

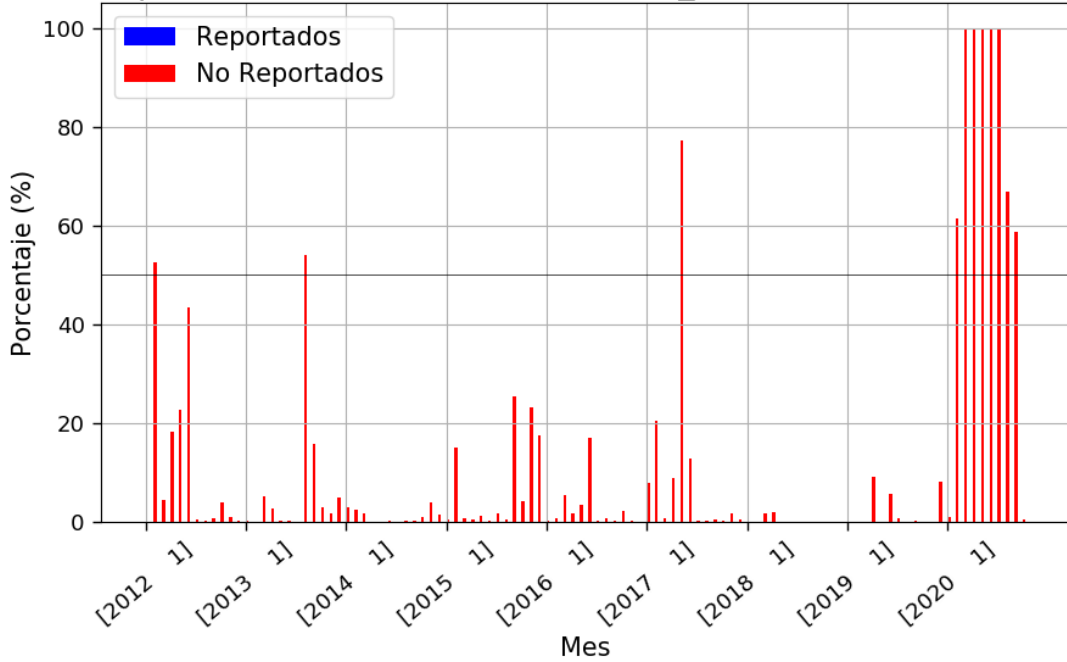


Figura B.44. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I La Estrella. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación Guaimaral

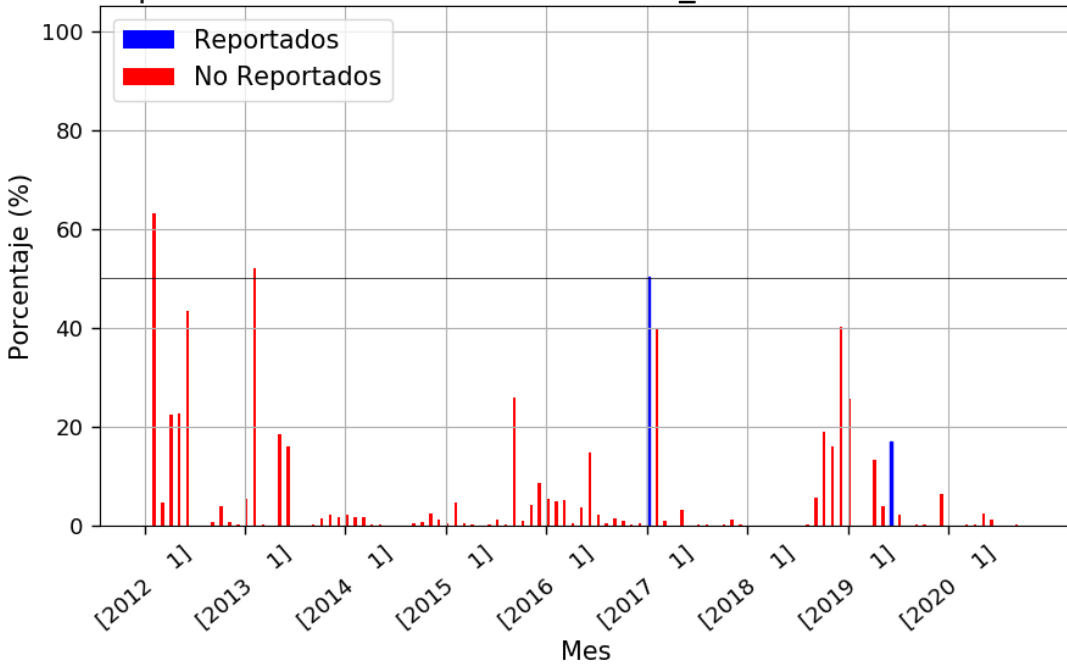


Figura B.45. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I Guaimaral. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación El Marqués

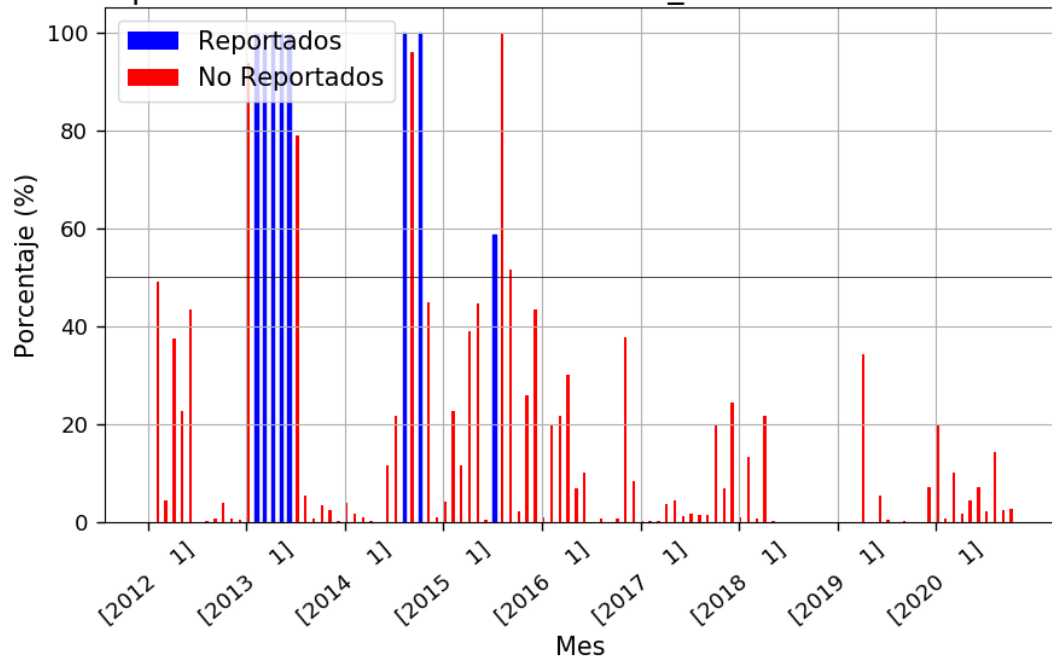


Figura B.46. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I El Marqués. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación Villa Mónica

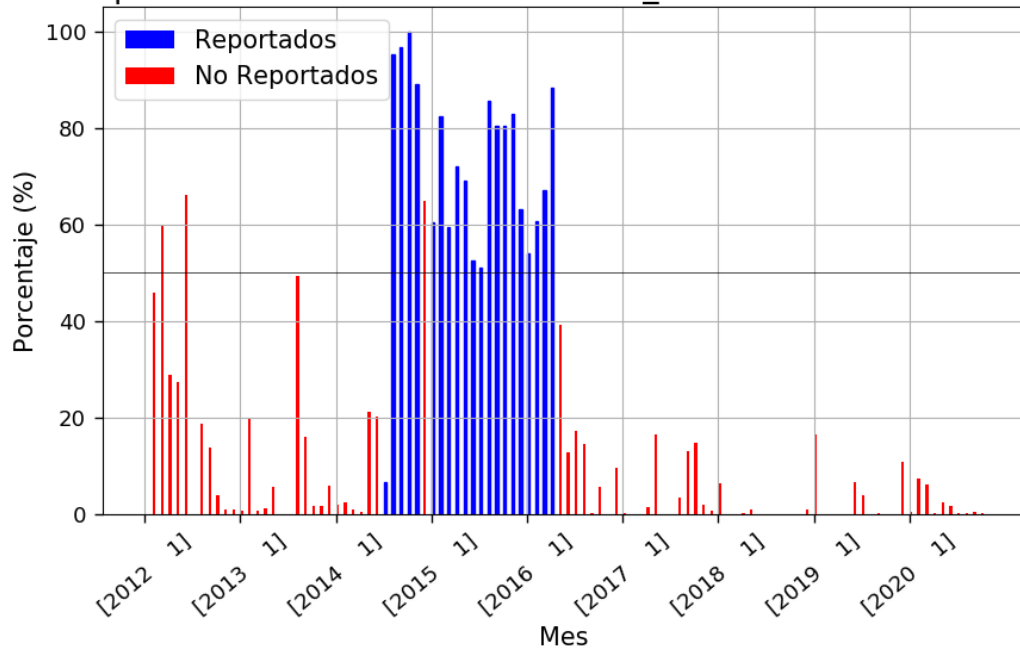


Figura B.47. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I Villa Mónica. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación Parroquia

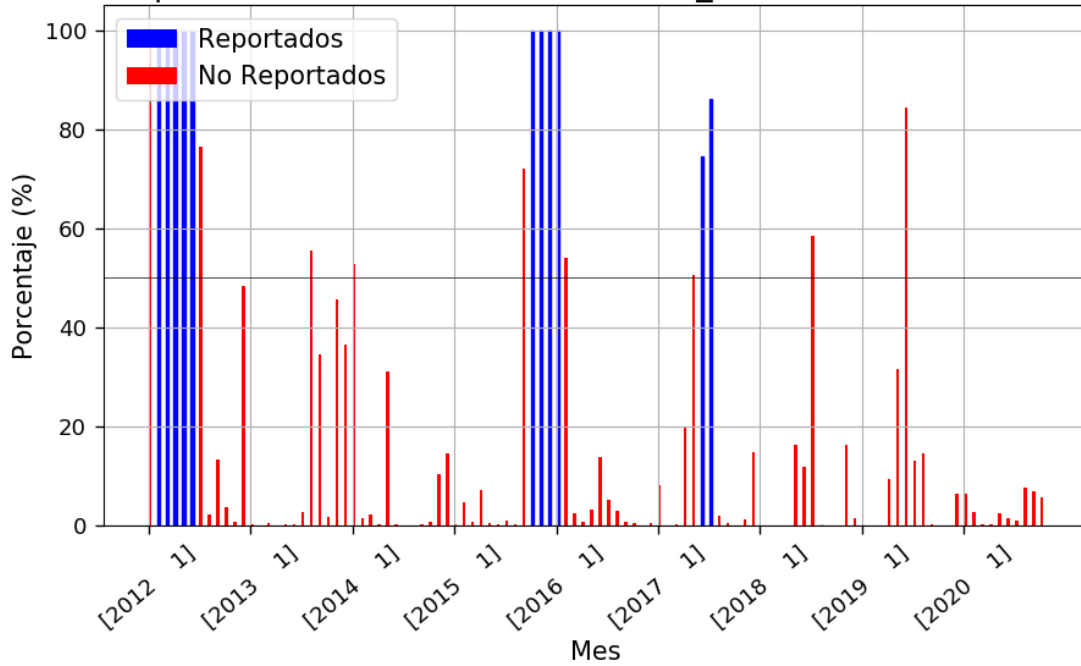


Figura B.48. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I Parroquia. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Valores perdidos mensuales de Humedad_relativa - Estación El Placer

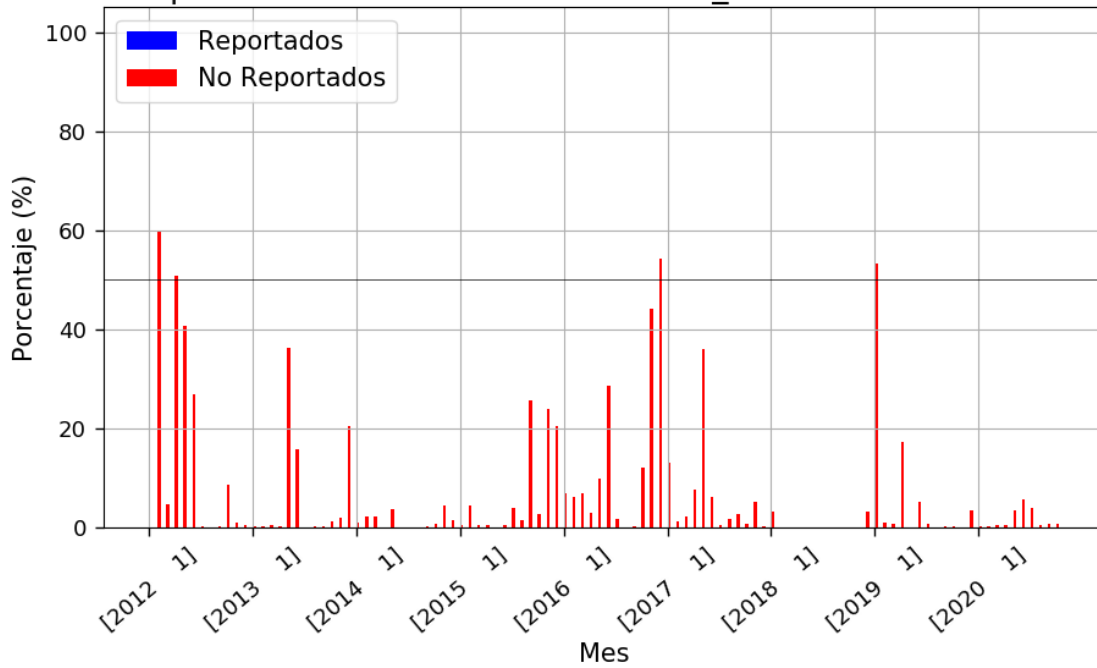


Figura B.49. Porcentaje de valores faltantes horarios de humedad relativa para cada mes en la estación N/I El Placer. La línea negra horizontal marca el 50%. las barras azules hacen referencia a valores faltantes reportados por el operador de las estaciones, mientras que las rojas representan valores faltantes no reportados

Anexo C: Figuras complementarias del Capítulo 3

En el presente anexo se consignan las figuras complementarias para los análisis del “Capítulo 3 – Análisis de información meteorológica”.

C.1. Figuras complementarias para sección “3.3.1 Radiación incidente en el área de influencia”

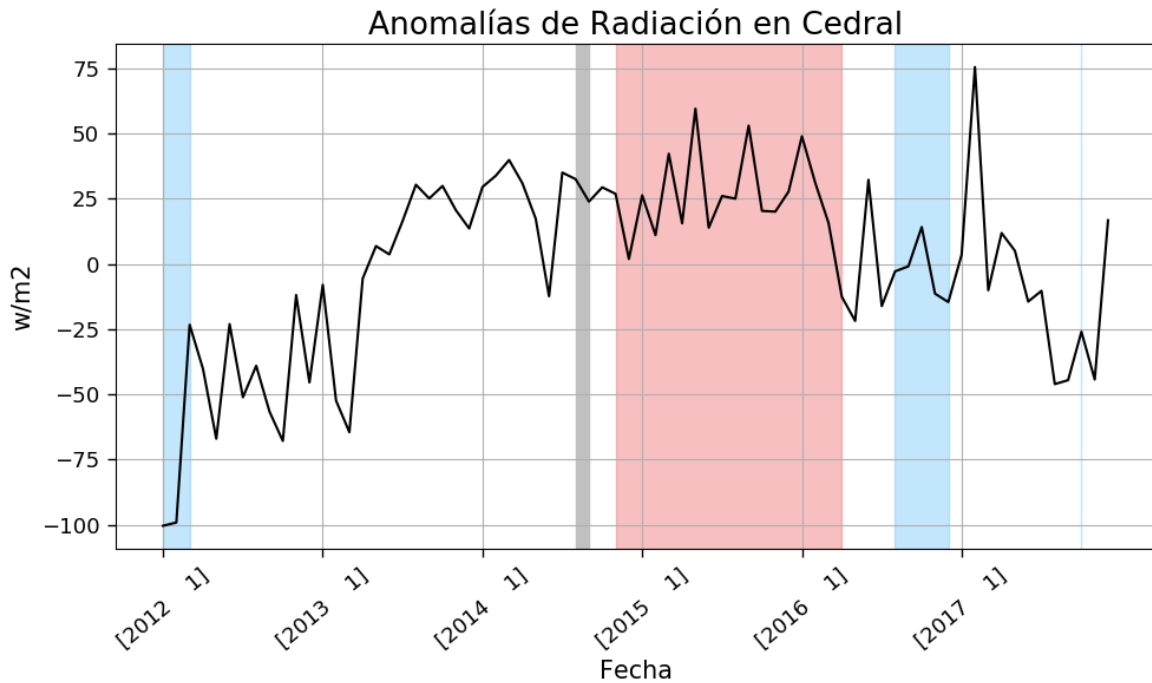


Figura C.1. Anomalías mensuales de radiación incidente para la estación N/I Cedral. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

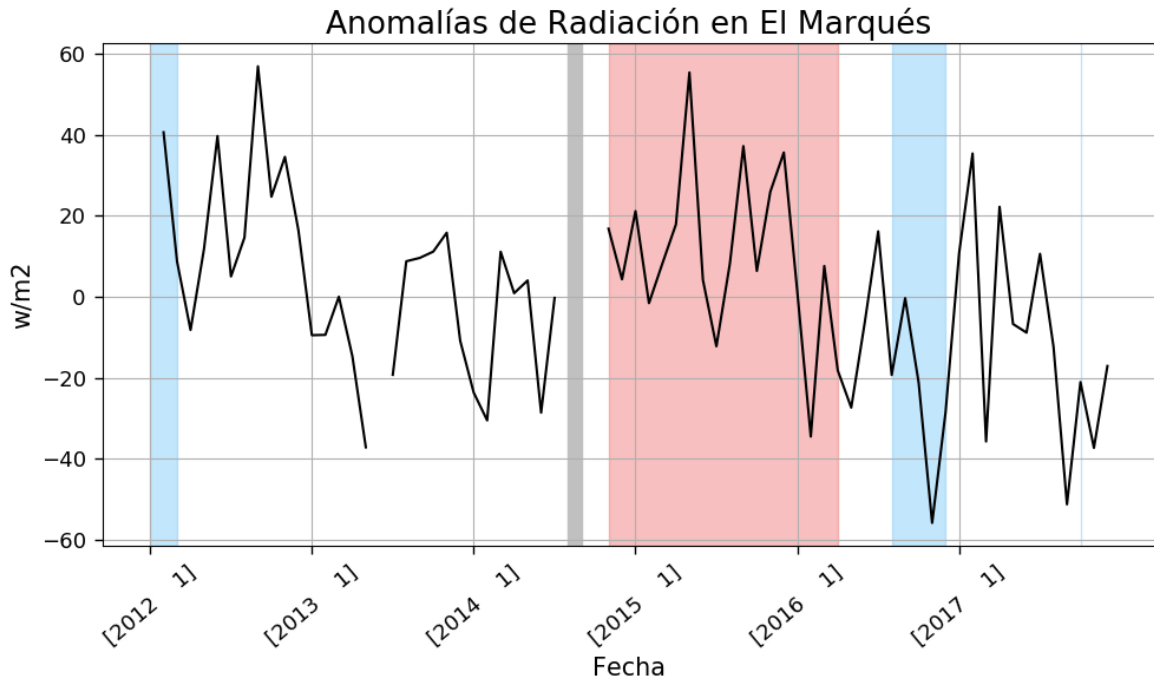


Figura C.2. Anomalías mensuales de radiación incidente para la estación N/I El Marqués. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

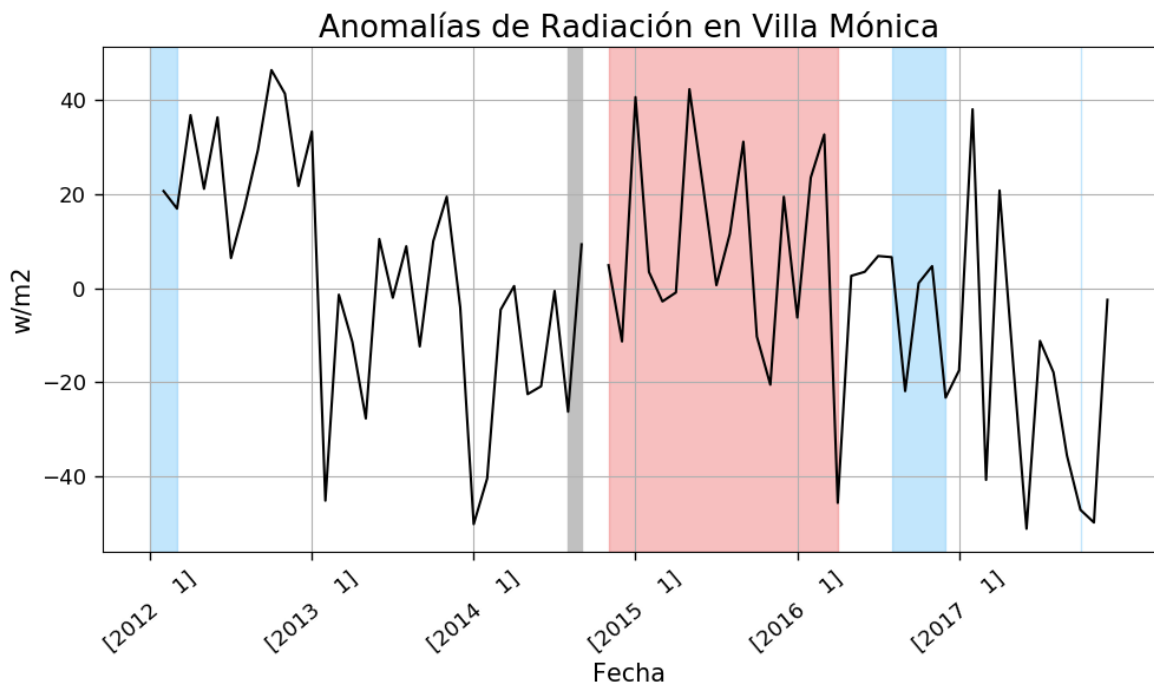


Figura C.3. Anomalías mensuales de radiación incidente para la estación N/I Villa Mónica. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

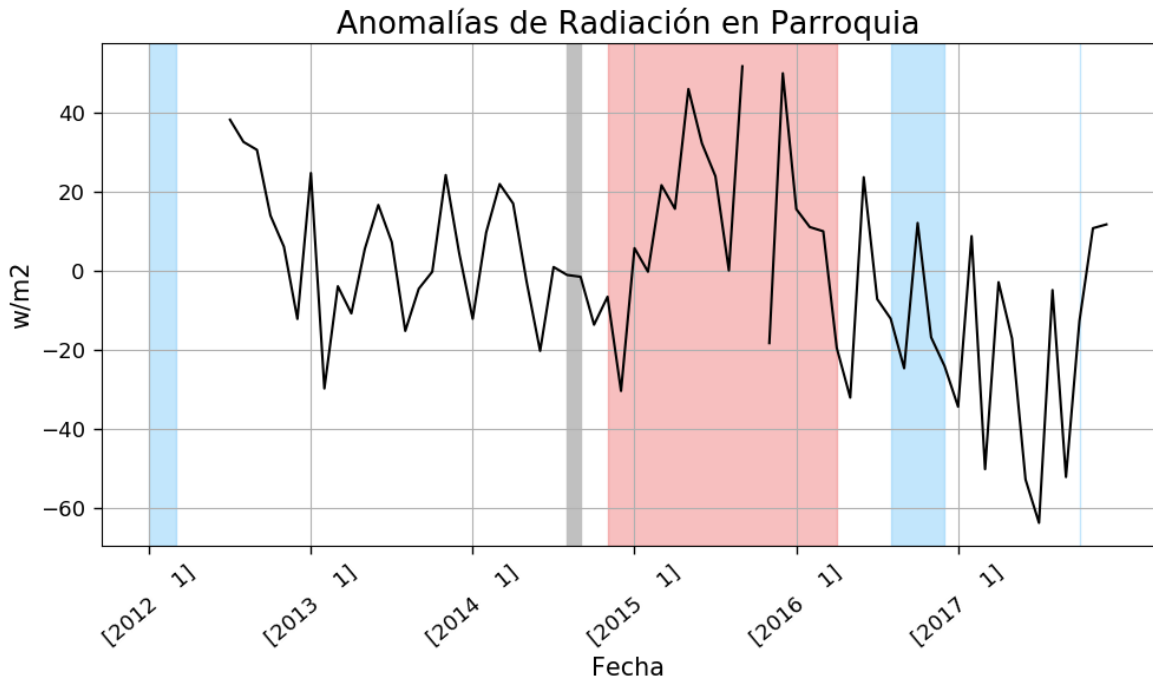


Figura C.4. Anomalías mensuales de radiación incidente para la estación N/I Parroquia. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

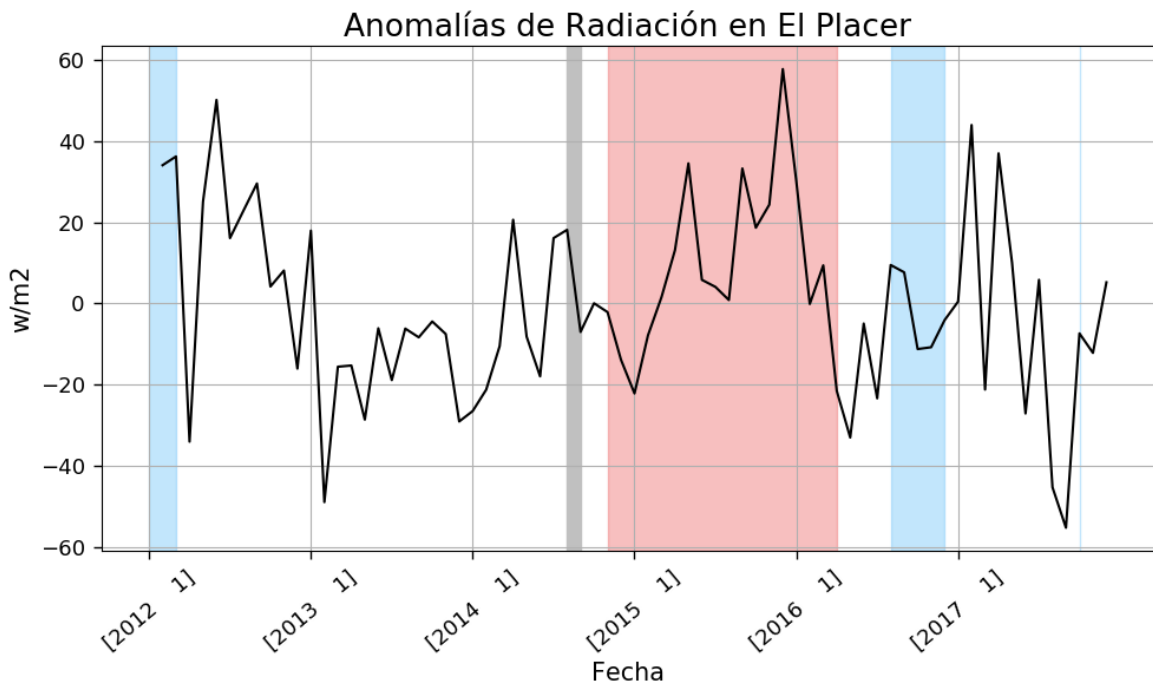


Figura C.5. Anomalías mensuales de radiación incidente para la estación N/I El Placer. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el periodo de llenado del embalse

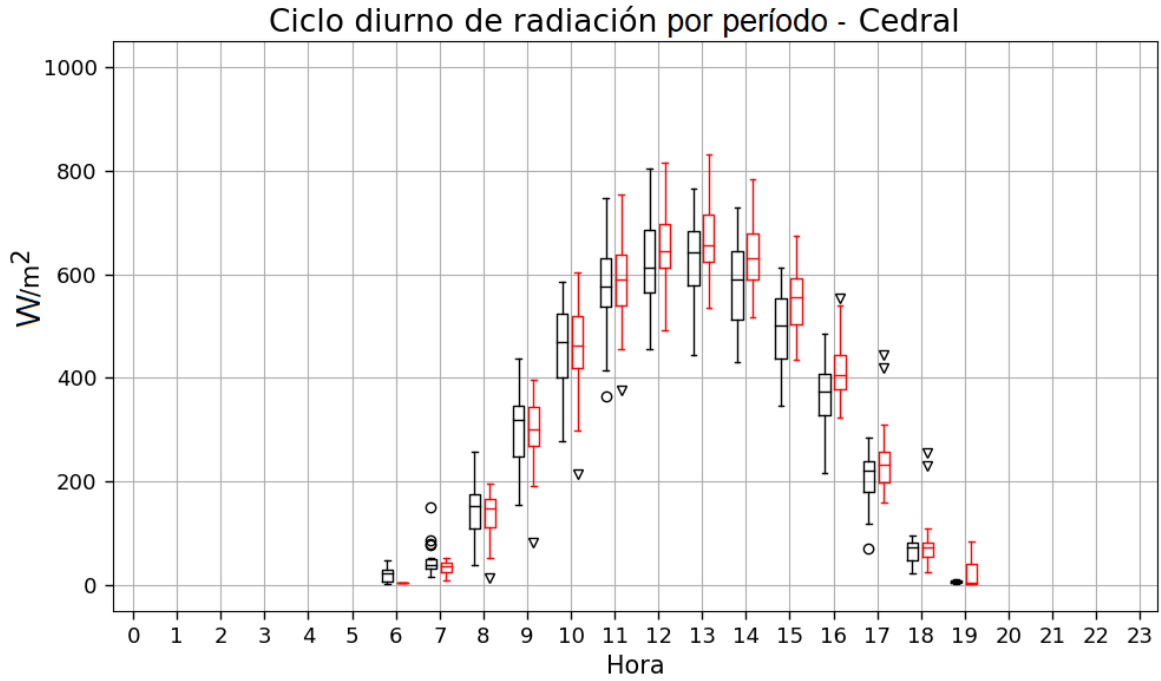


Figura C.6. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación Cedral para el periodo de Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

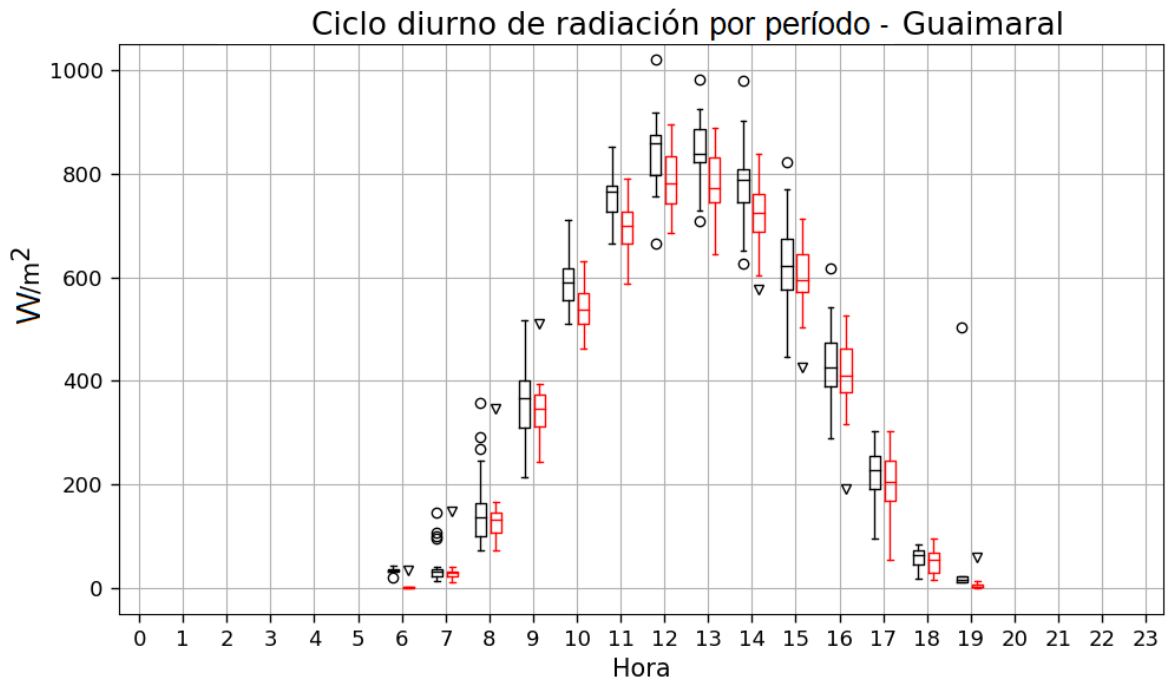


Figura C.7. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación Guaimaral para el periodo de Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

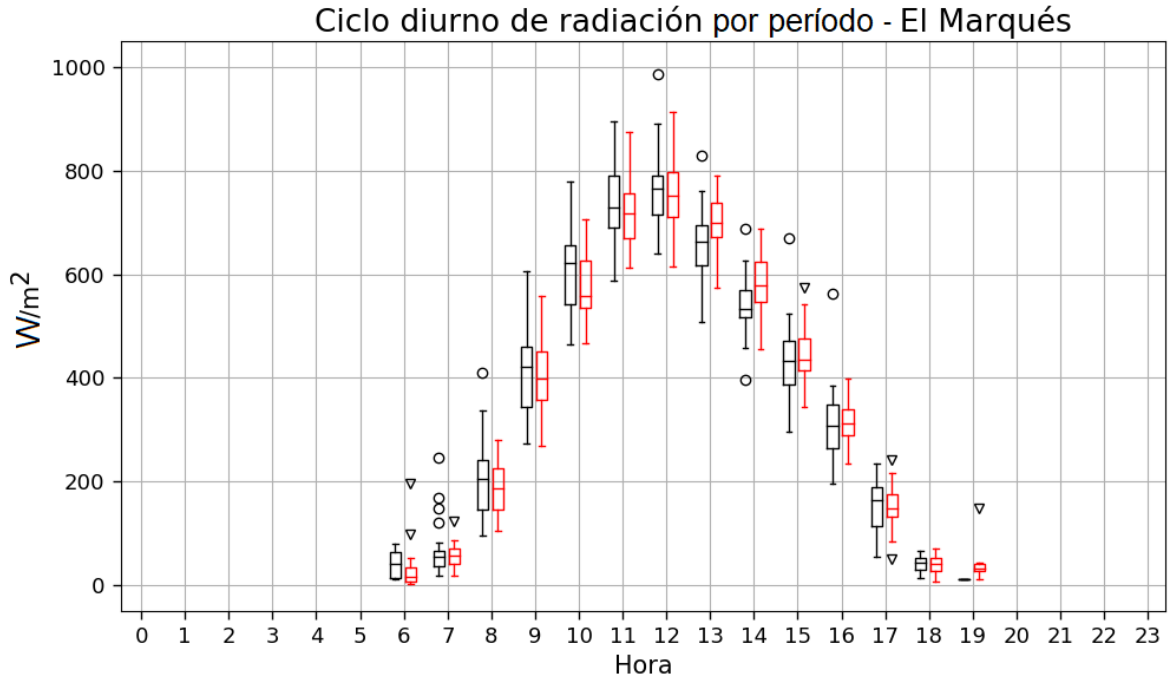


Figura C.8. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación El Marqués para el periodo de Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

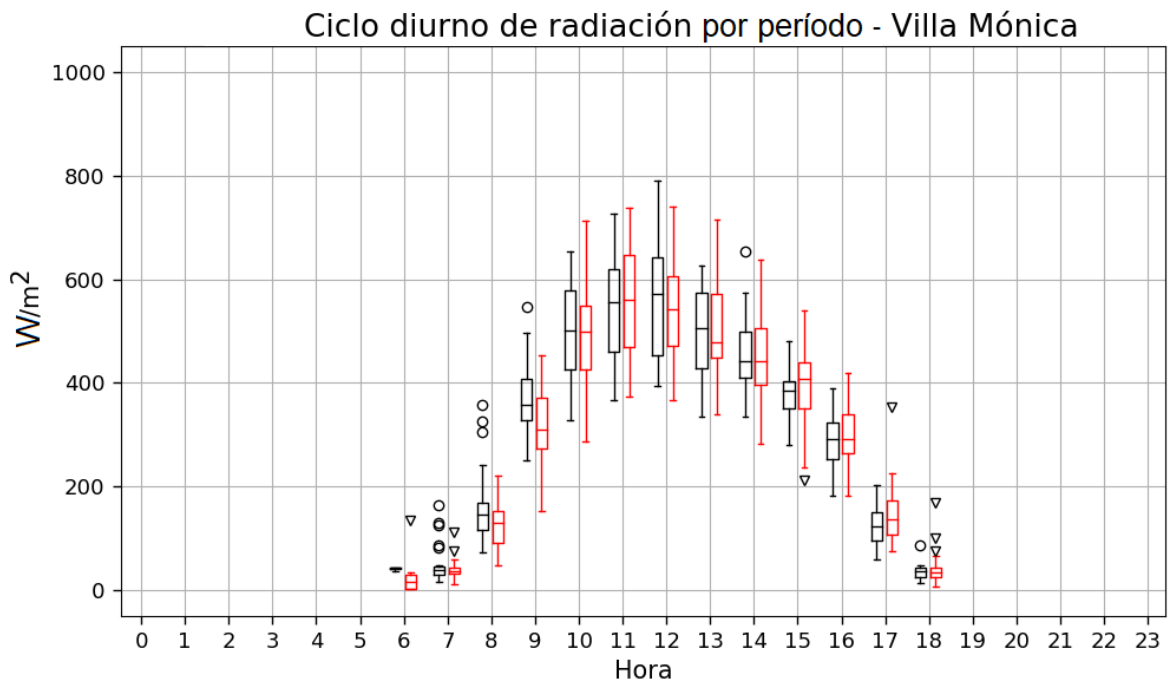


Figura C.9. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación Villa Mónica para el periodo de Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

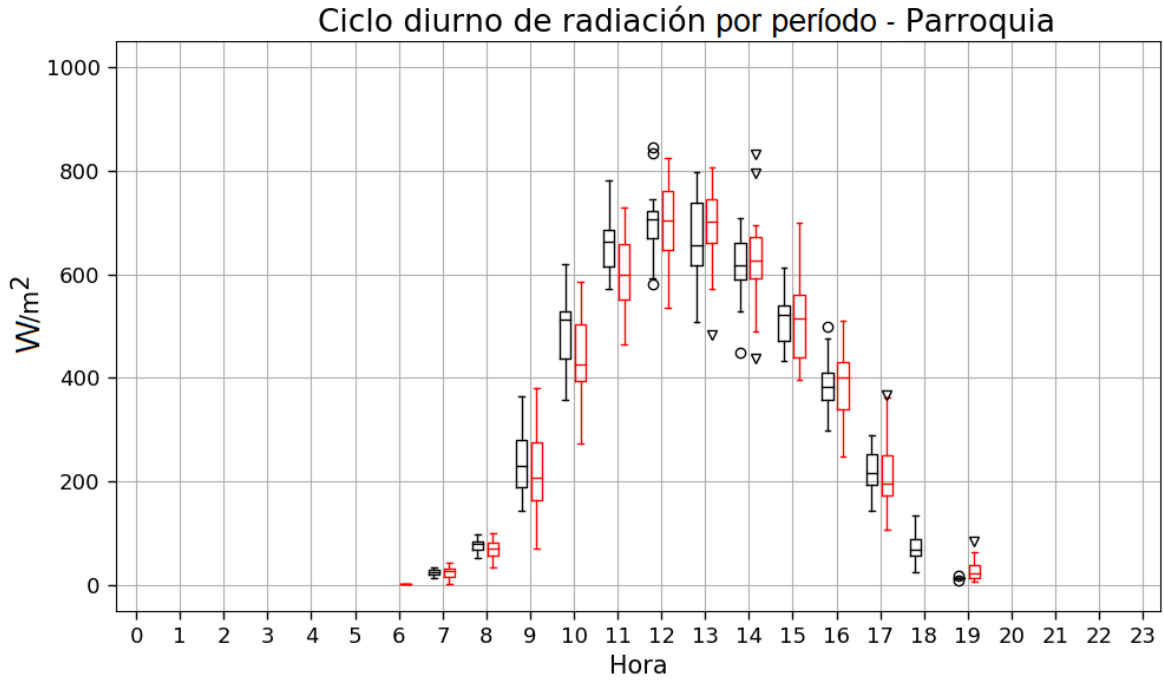


Figura C.10. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación Parroquia para el periodo Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

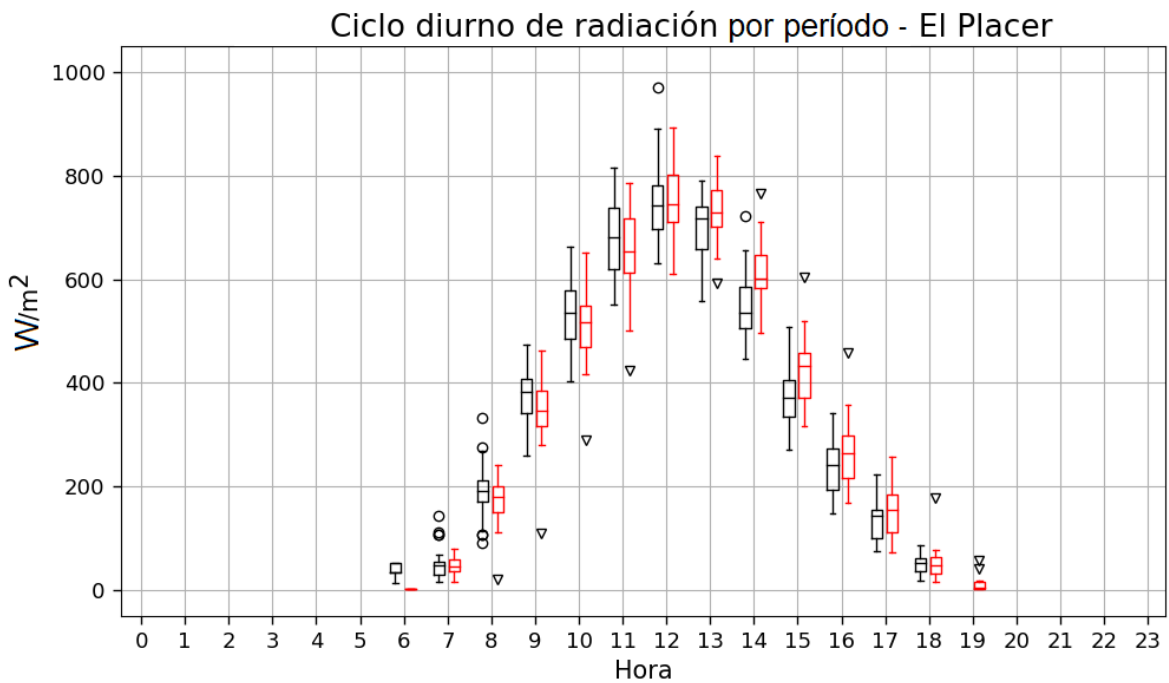


Figura C.11. Ciclos diarios de radiación incidente en la estación El Placer para el periodo de Antes (2012-2013) del llenado del embalse, representado por las cajas negras con "outliers" circulares, y Después (2015-2018) del llenado del embalse, representado por las cajas rojas con "outliers" triangulares

C.2. Figuras complementarias para sección “3.3.2 Precipitación”

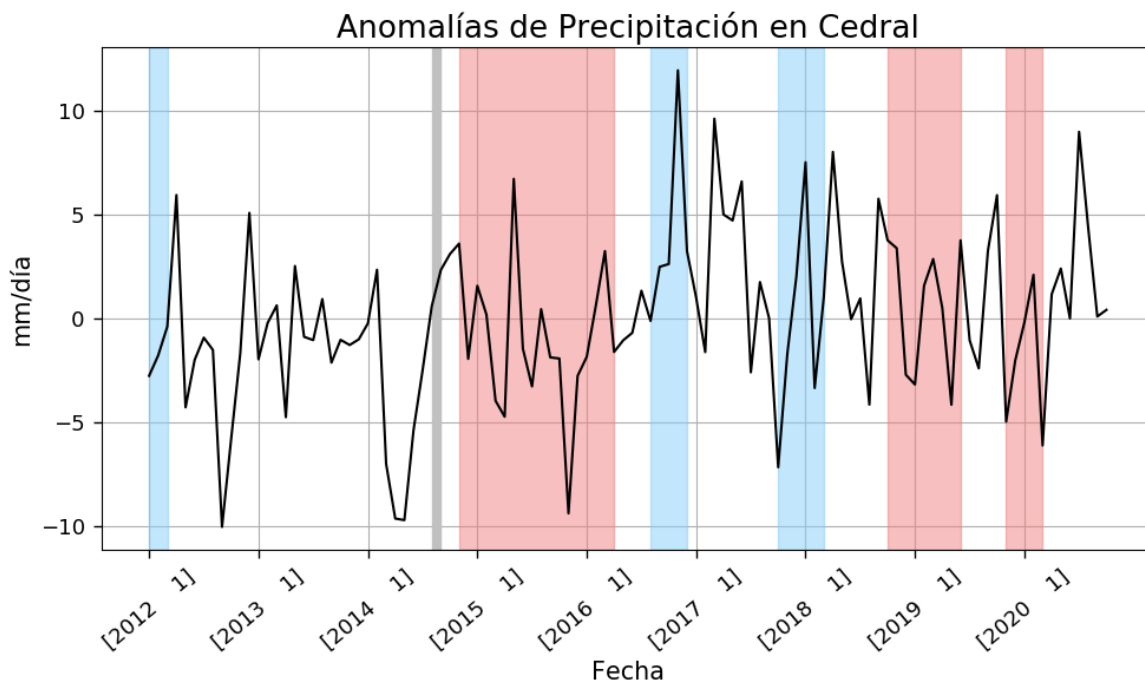


Figura C.12. Anomalías mensuales de precipitación para la estación N/I Cedral. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

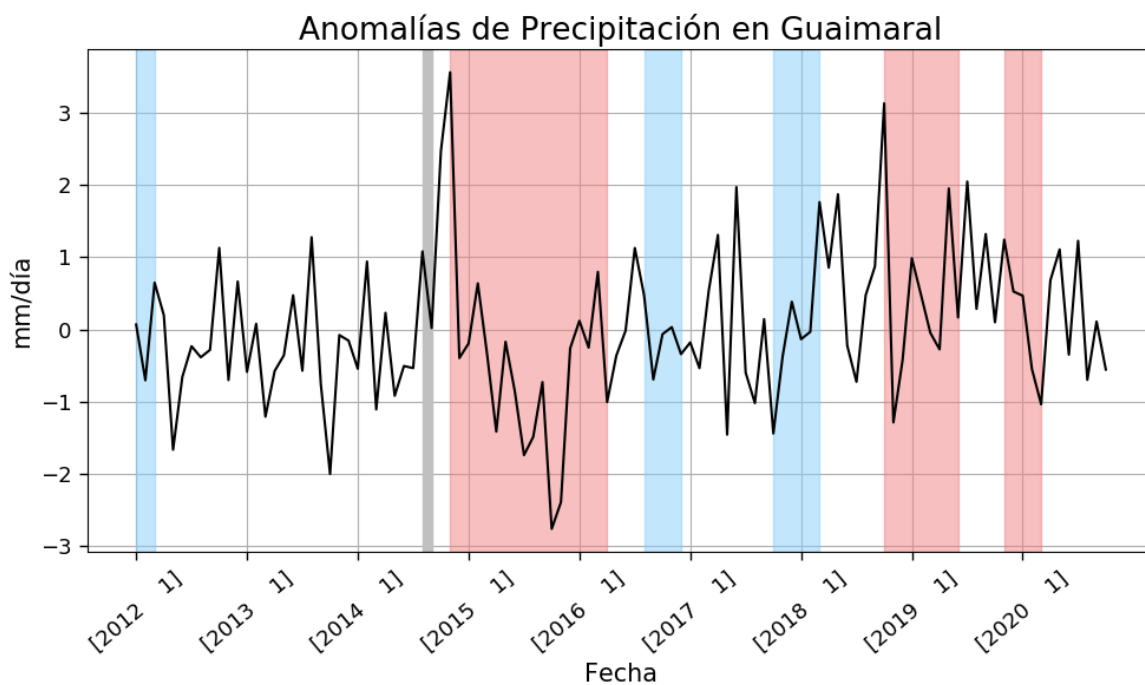


Figura C.13. Anomalías mensuales de precipitación para la estación N/I Guaimaral. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

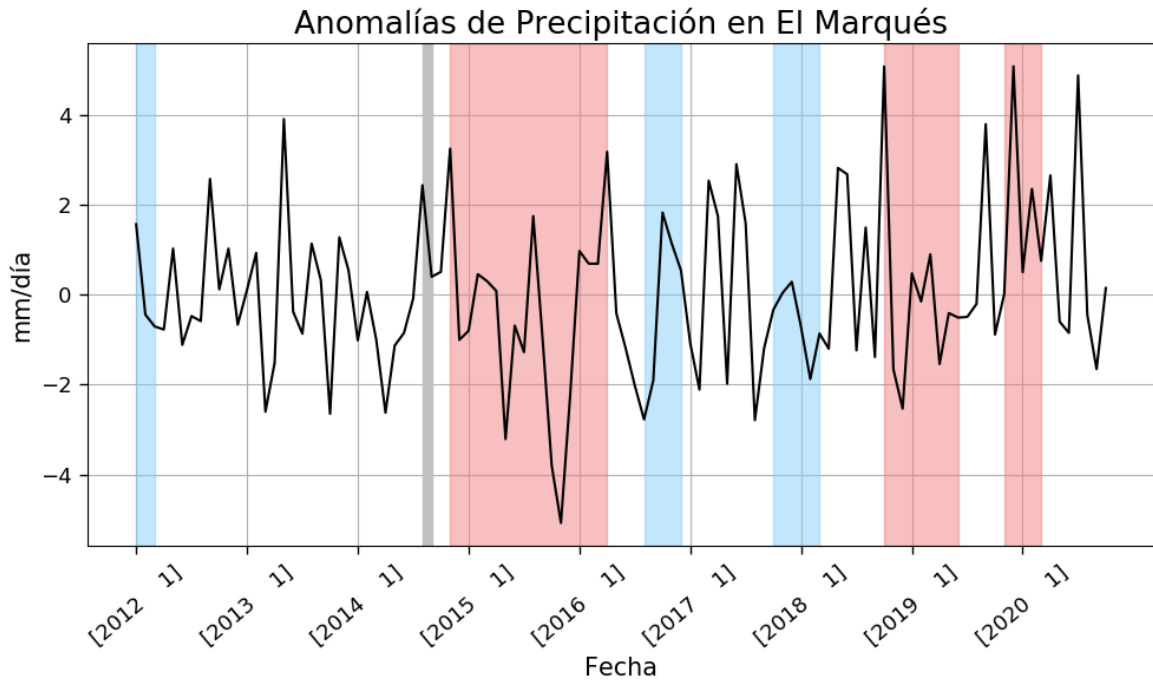


Figura C.14. Anomalías mensuales de precipitación para la estación N/I El Marqués. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

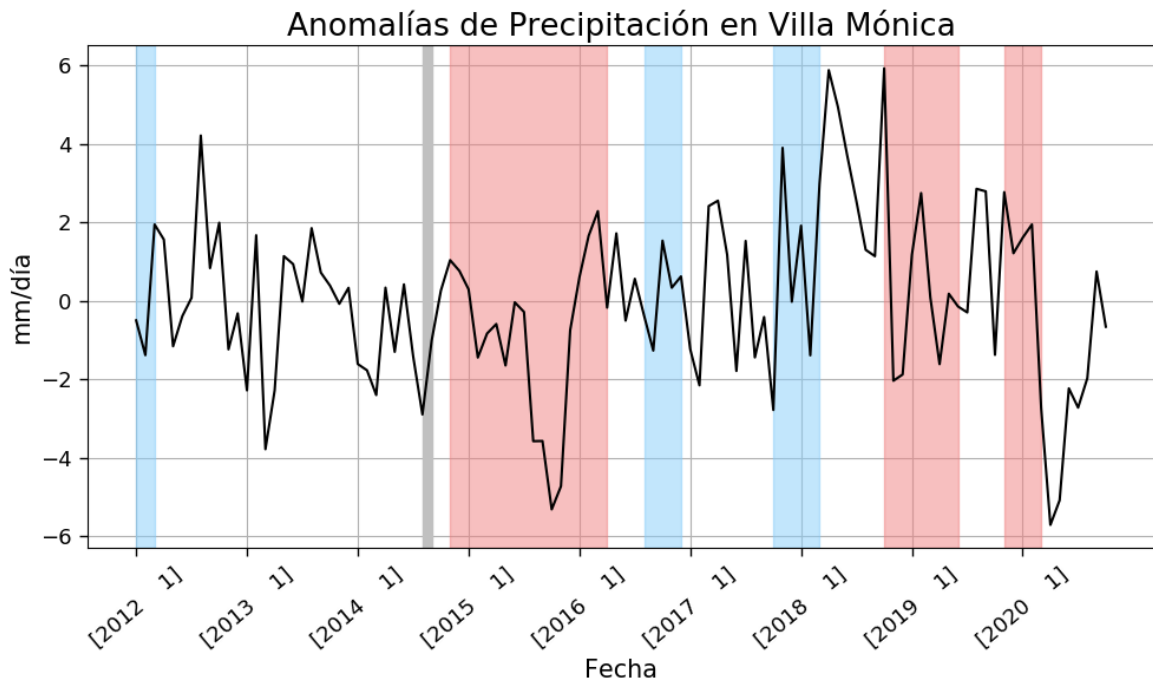


Figura C.15. Anomalías mensuales de precipitación para la estación N/I Villa Mónica. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

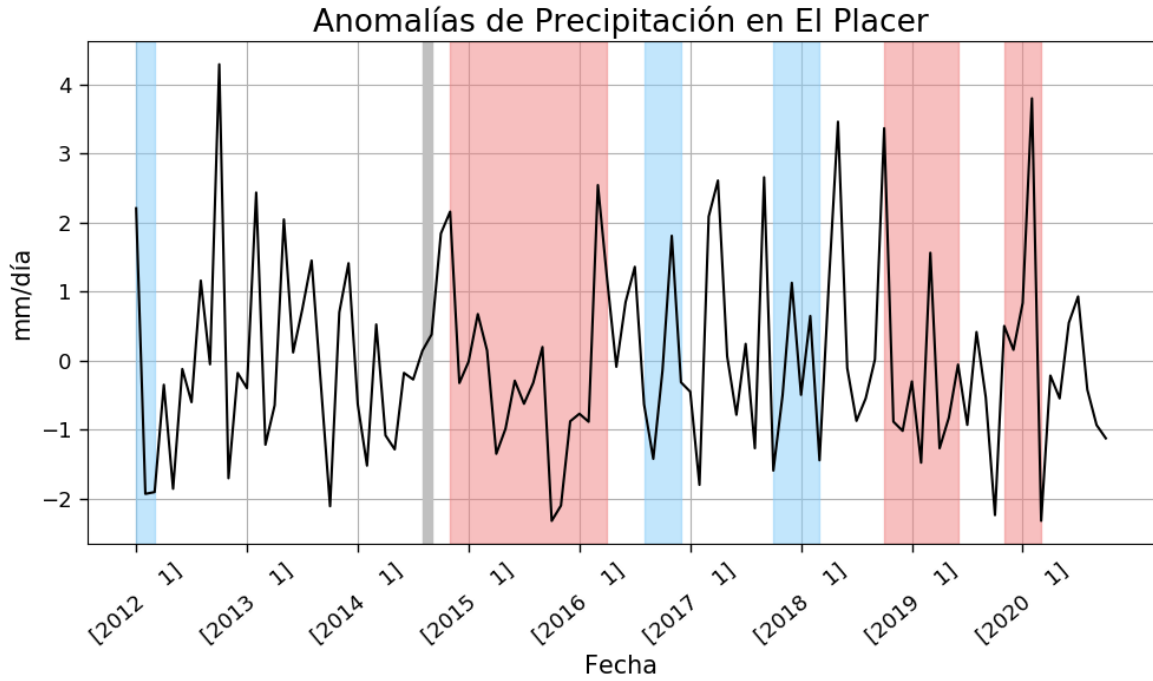


Figura C.16. Anomalías mensuales de precipitación para la estación N/I El Placer. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

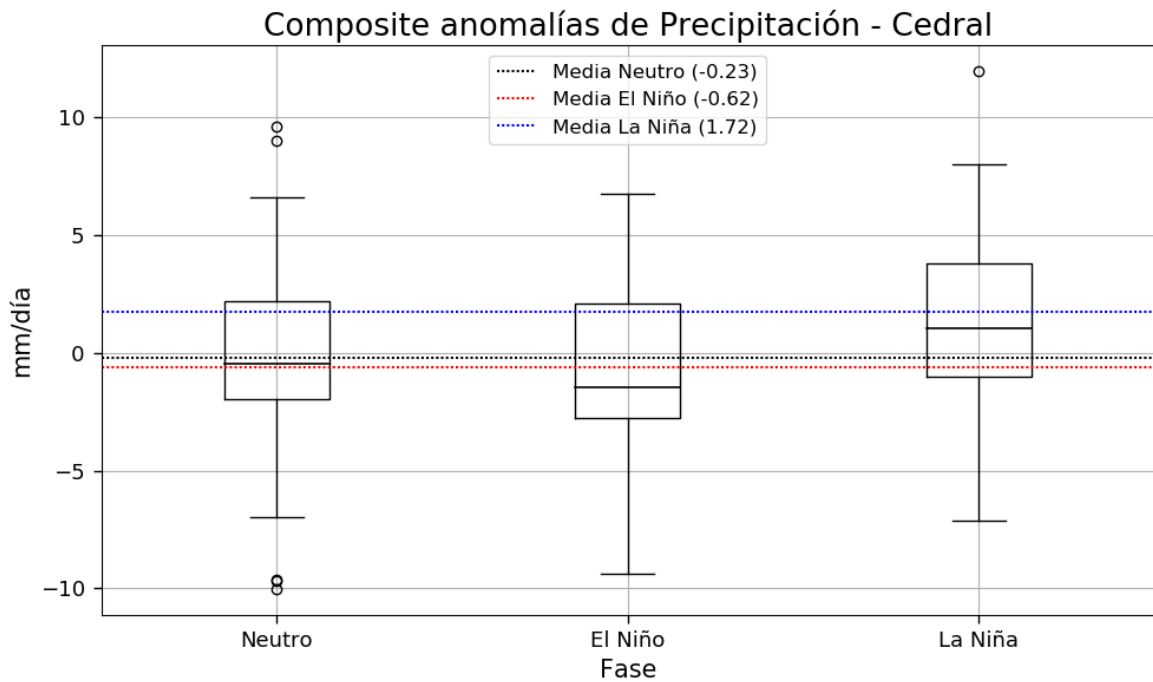


Figura C.17. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación N/I Cedral. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

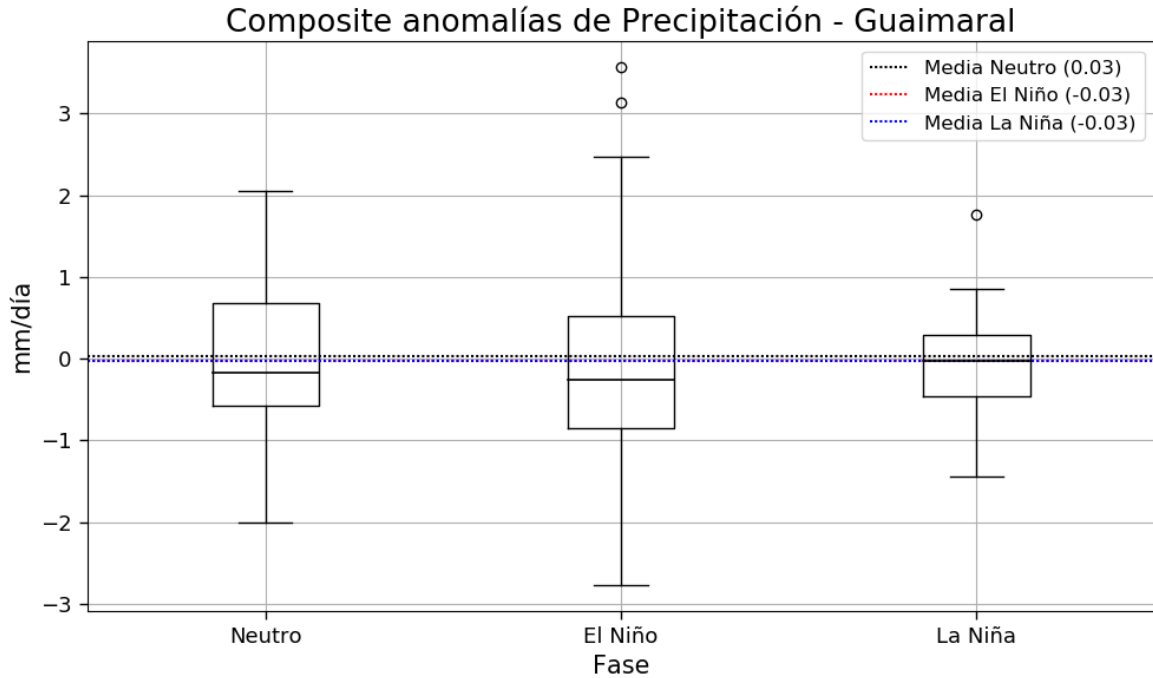


Figura C.18. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación N/I Guaimaral. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

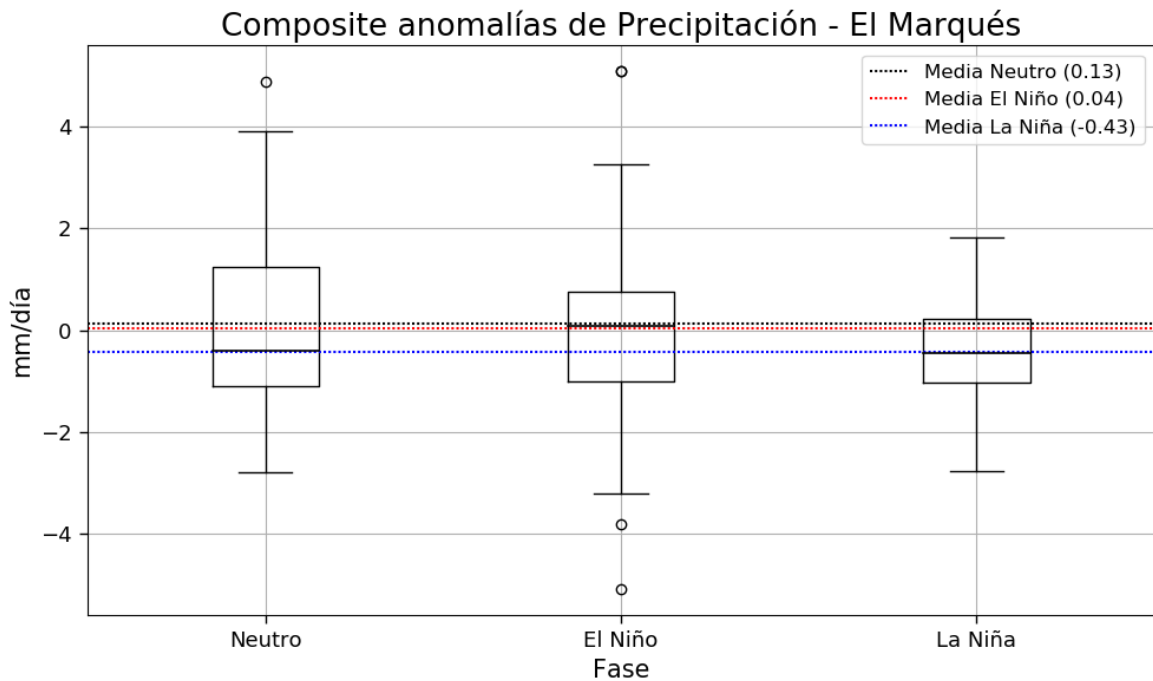


Figura C.19. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación N/I El Marqués. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

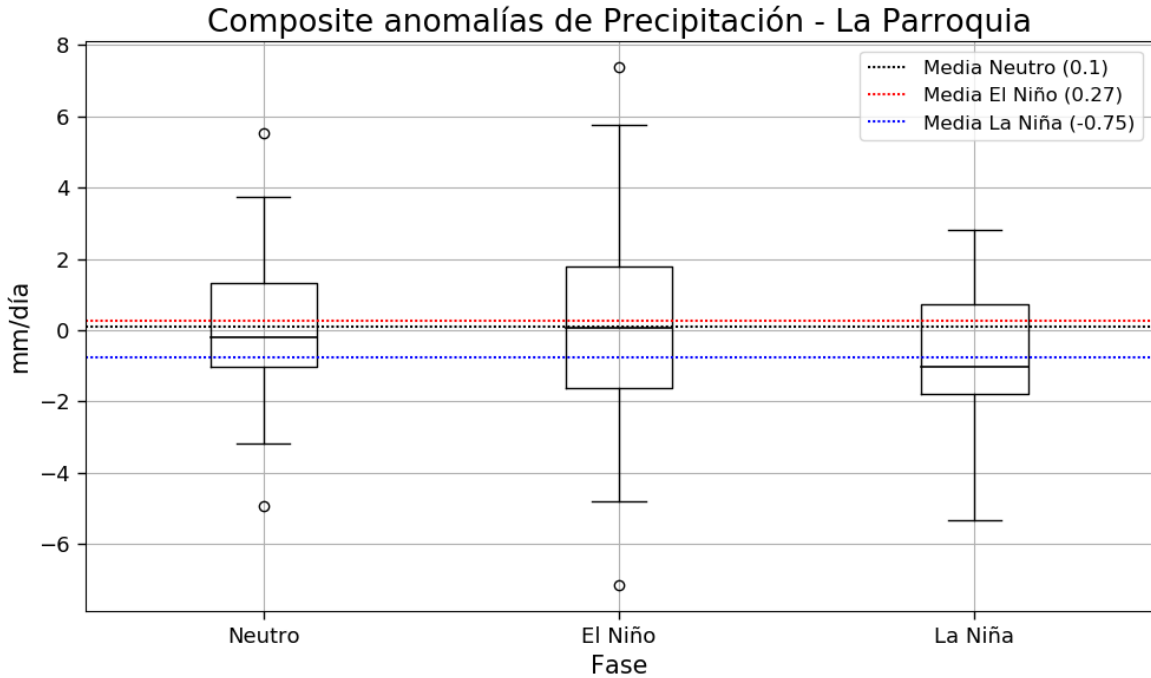


Figura C.20. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación N/I La Parroquia. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

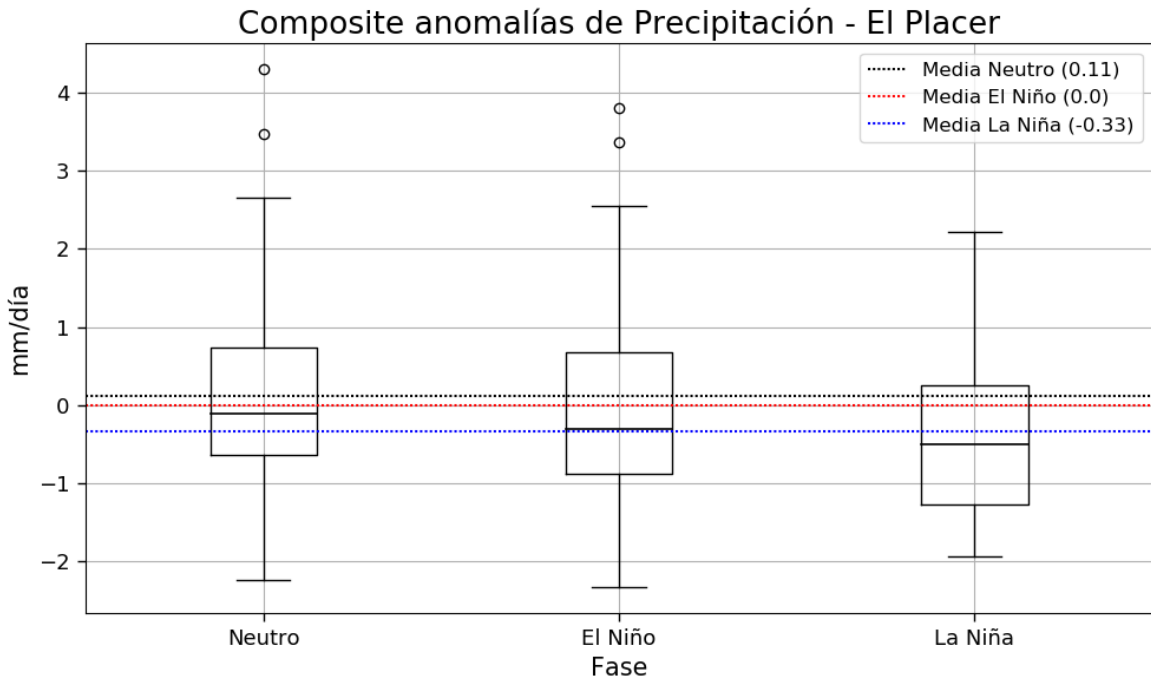


Figura C.21. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación N/I El Placer. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

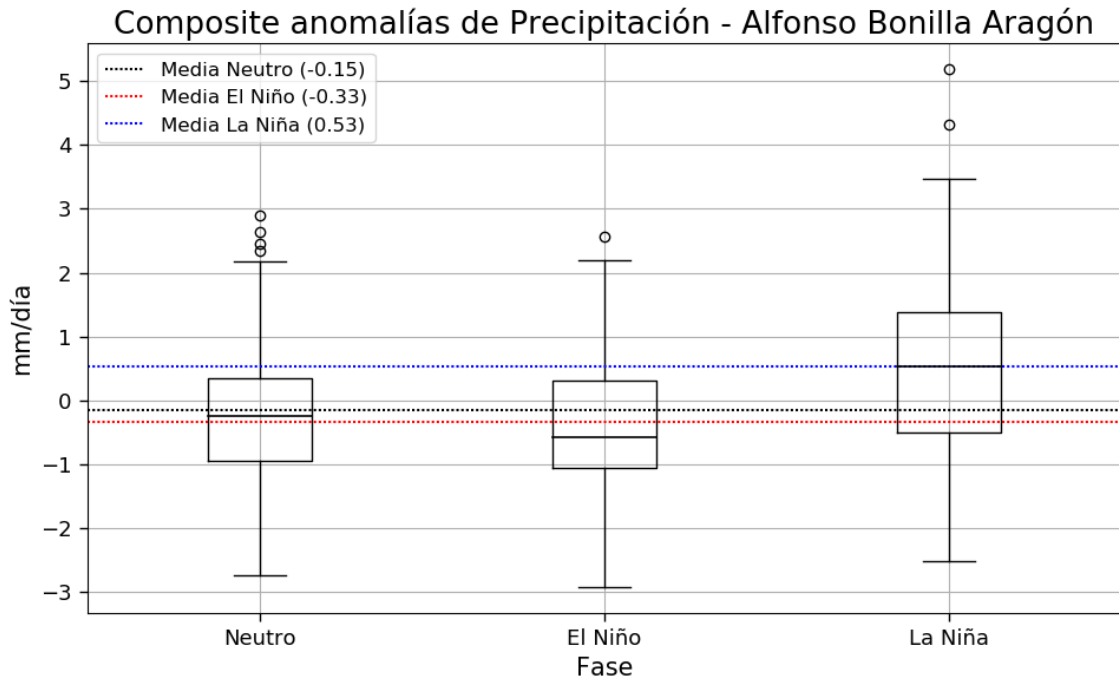


Figura C.22. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación NOAA Alfonso Bonilla Aragón. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

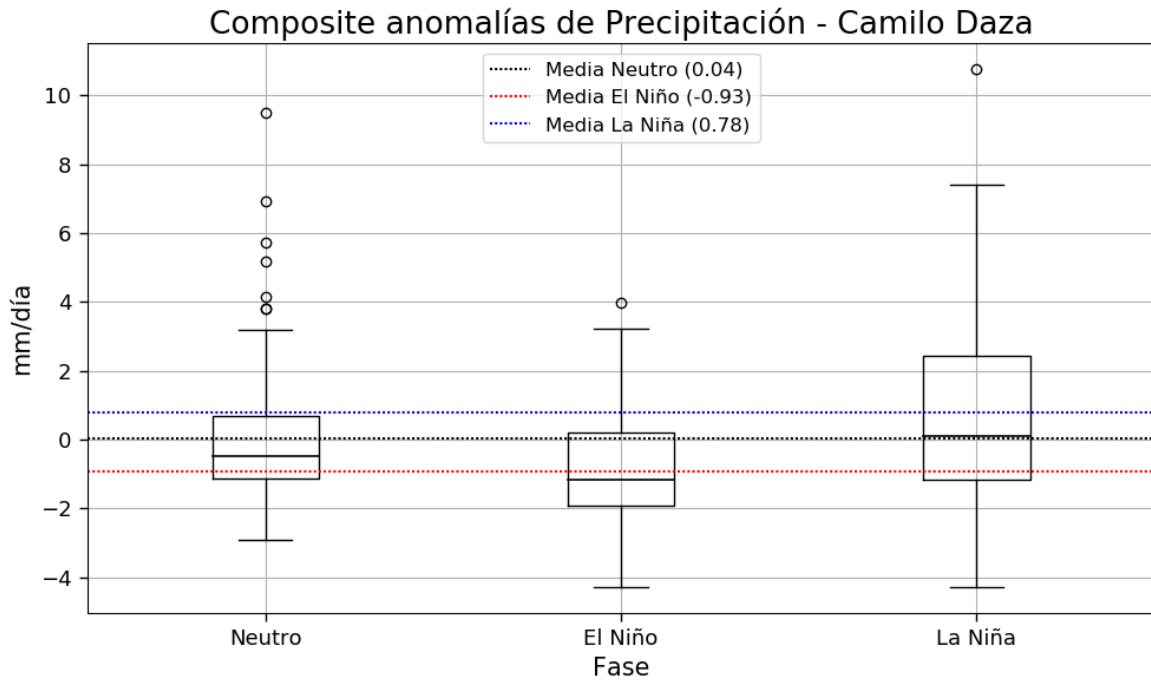


Figura C.23. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación NOAA Camilo Daza. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

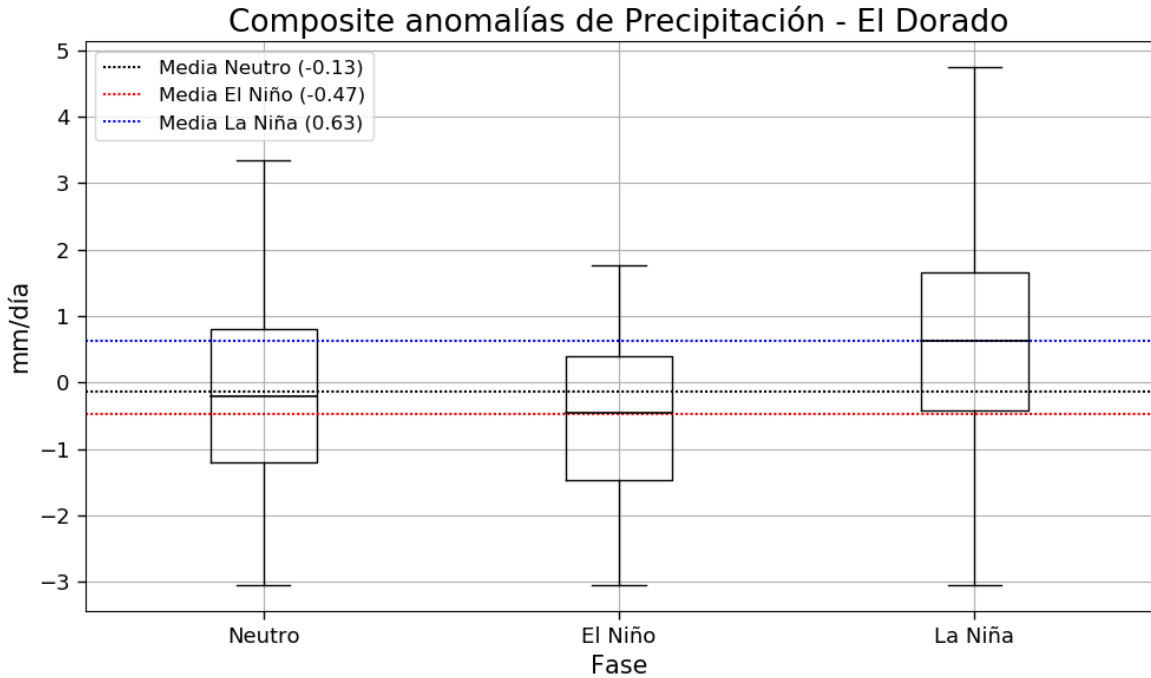


Figura C.24. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación NOAA El Dorado. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

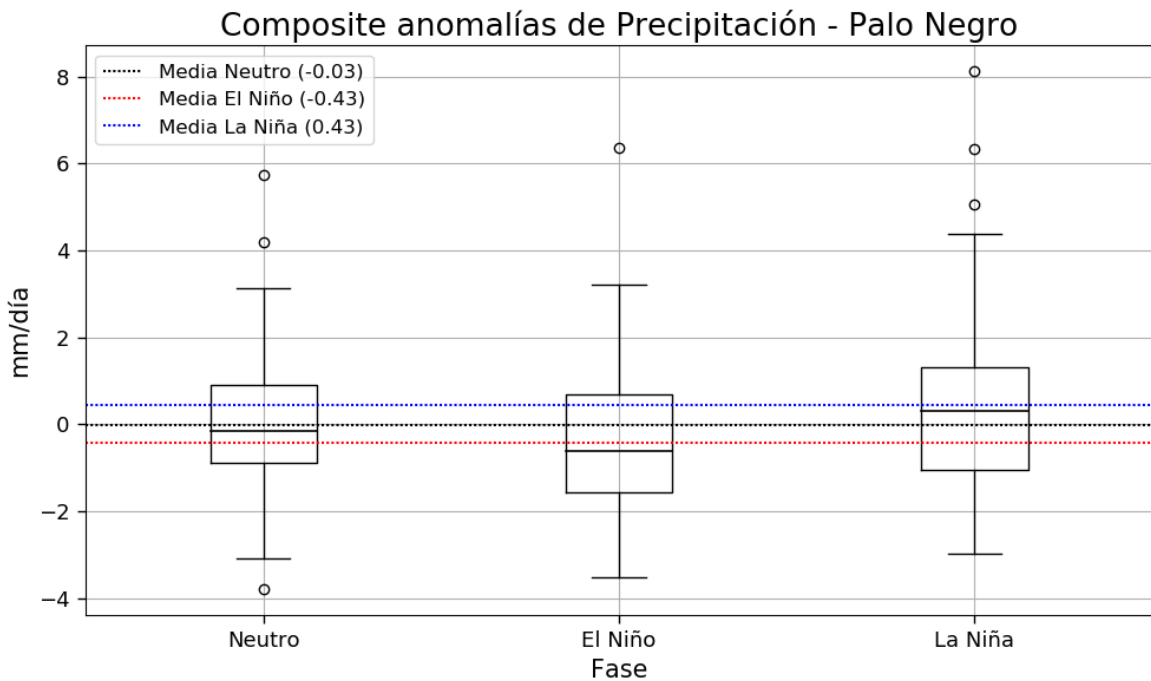


Figura C.25. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación NOAA Palo Negro. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

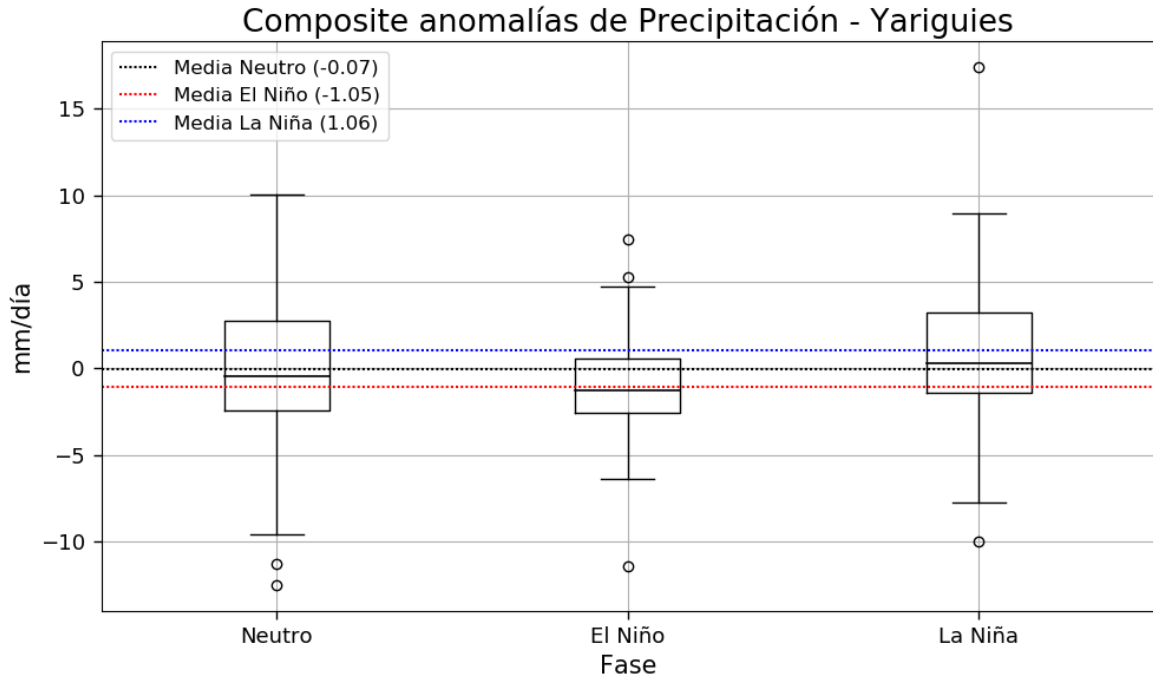


Figura C.26. Promedios de anomalías de precipitación para las fases Neutra, El Niño, y La Niña en la estación NOAA Yariguíes. La línea negra representa la media para las temporadas neutras. La línea roja representa la media para los eventos El Niño. La línea azul representa la media para los eventos La Niña

C.3. Figuras complementarias para sección “3.3.4 Temperatura”

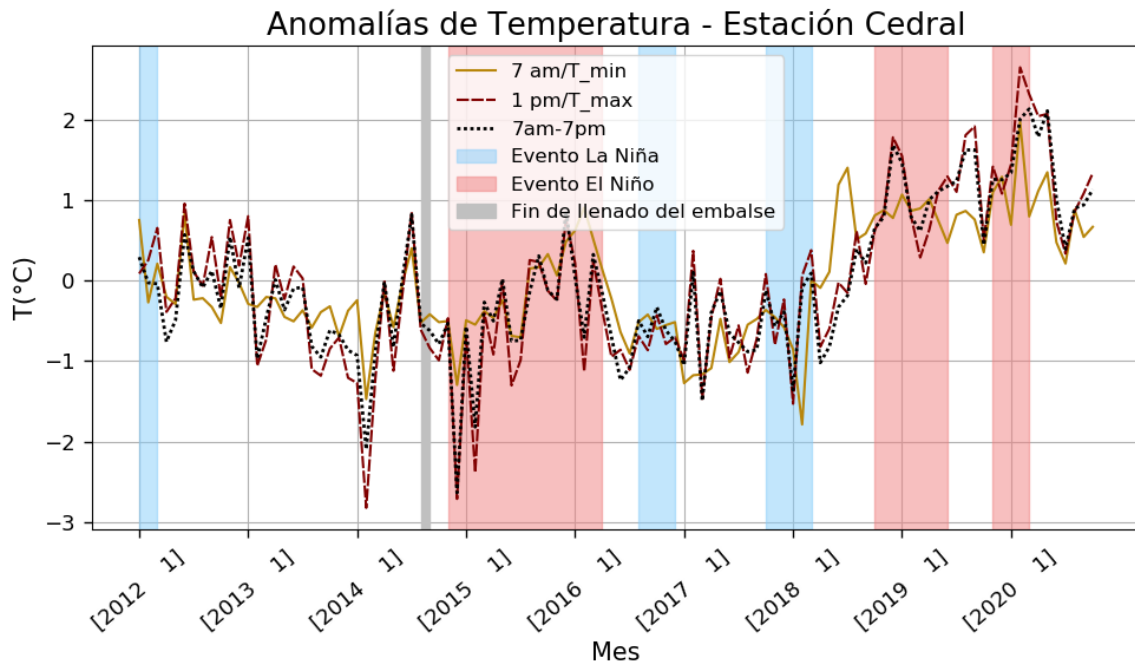


Figura C.27. Anomalías de temperatura para la estación N/I Cedral. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

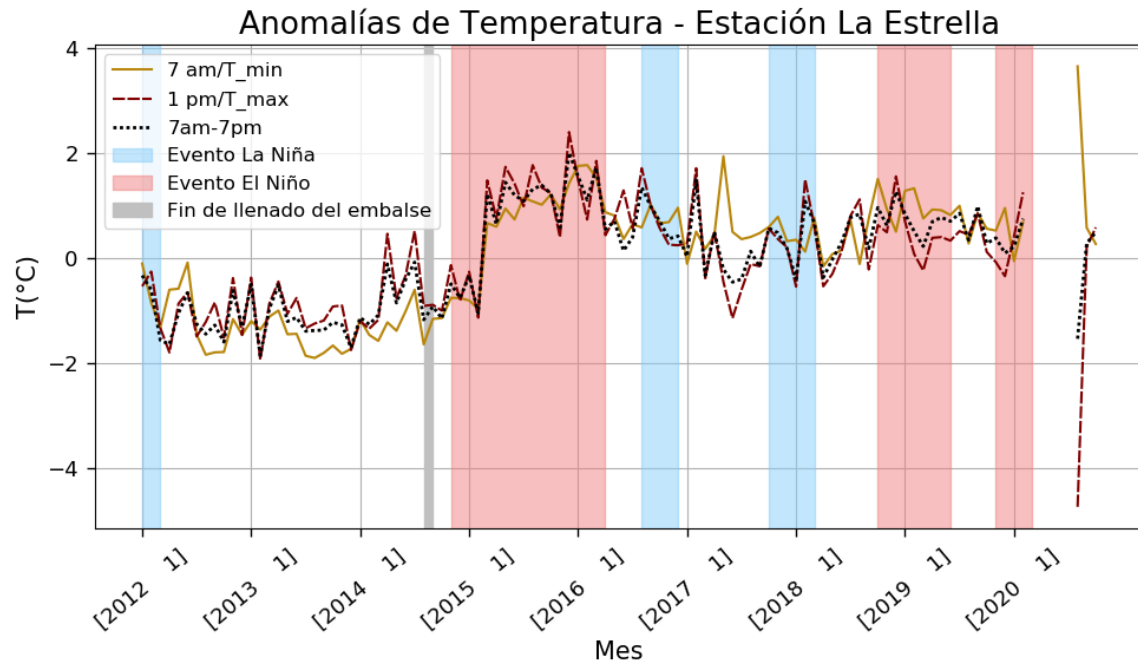


Figura C.28. Anomalías de temperatura para la estación N/I La Estrella. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

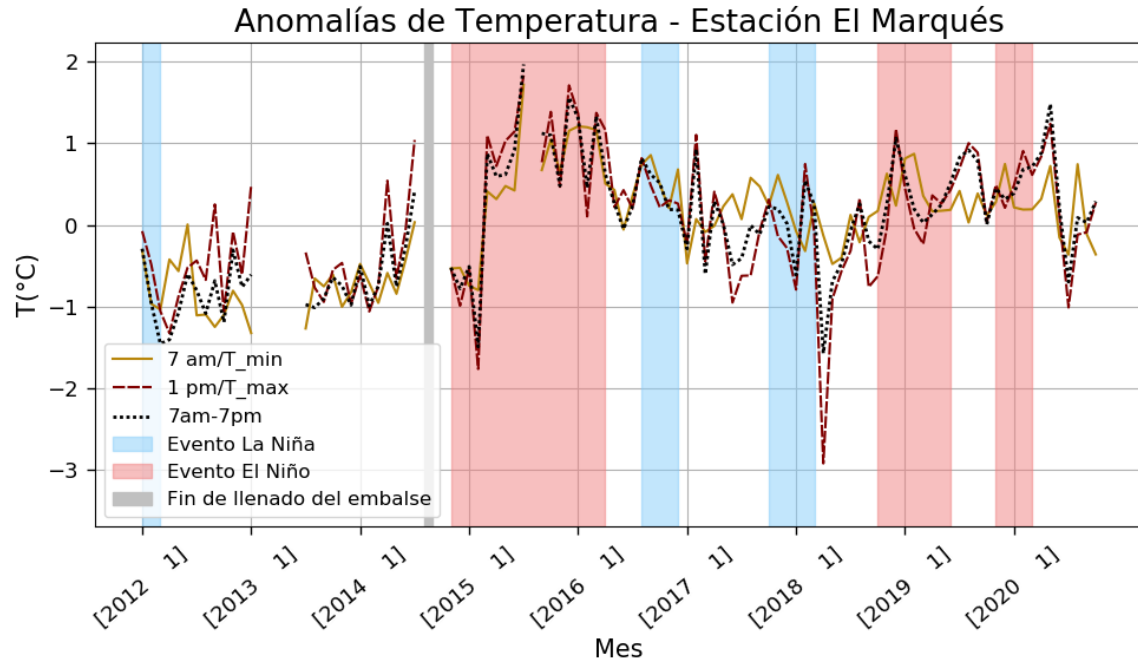


Figura C.29. Anomalías de temperatura para la estación N/I El Marqués. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

Anomalías de Temperatura - Estación Villa Mónica

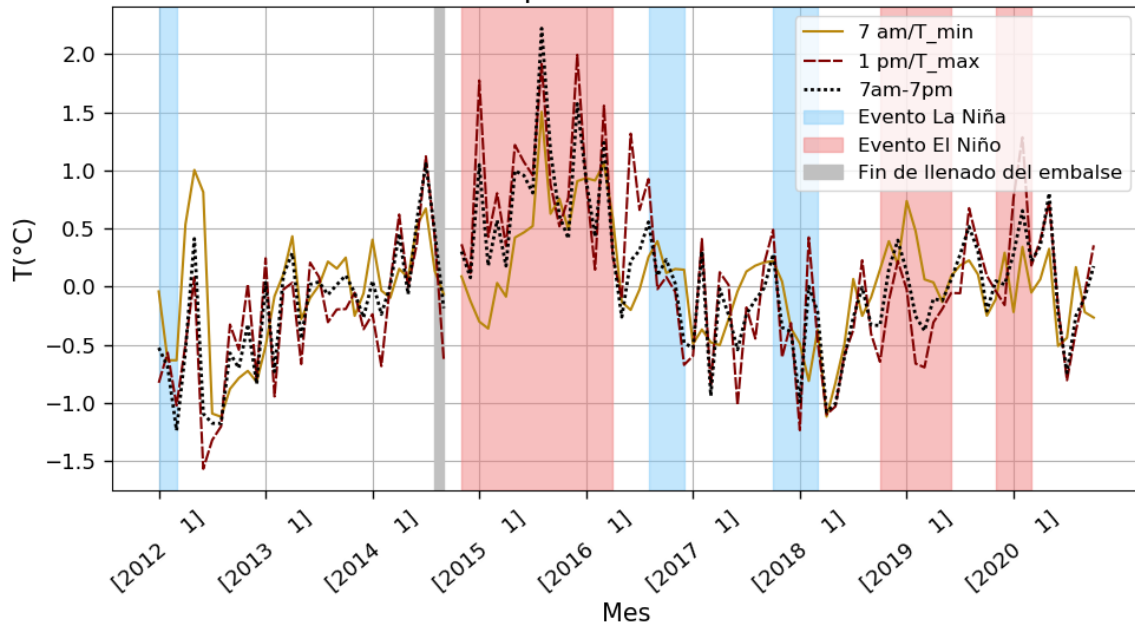


Figura C.30. Anomalías de temperatura para la estación N/I Villa Mónica. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

Anomalías de Temperatura - Estación Parroquia

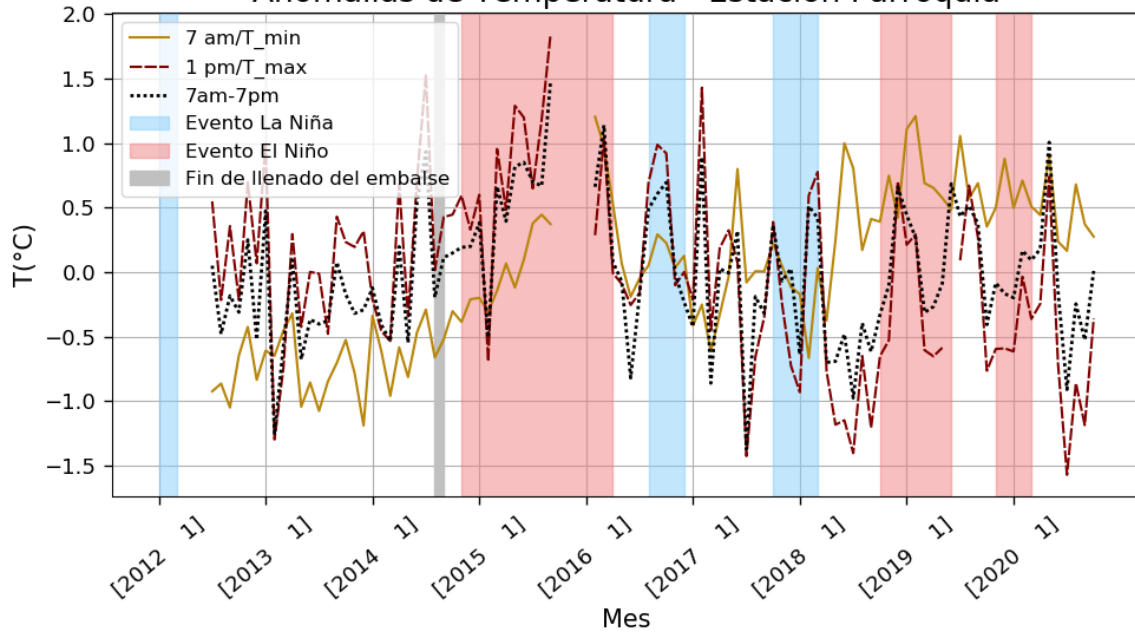


Figura C.31. Anomalías de temperatura para la estación N/I Parroquia. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

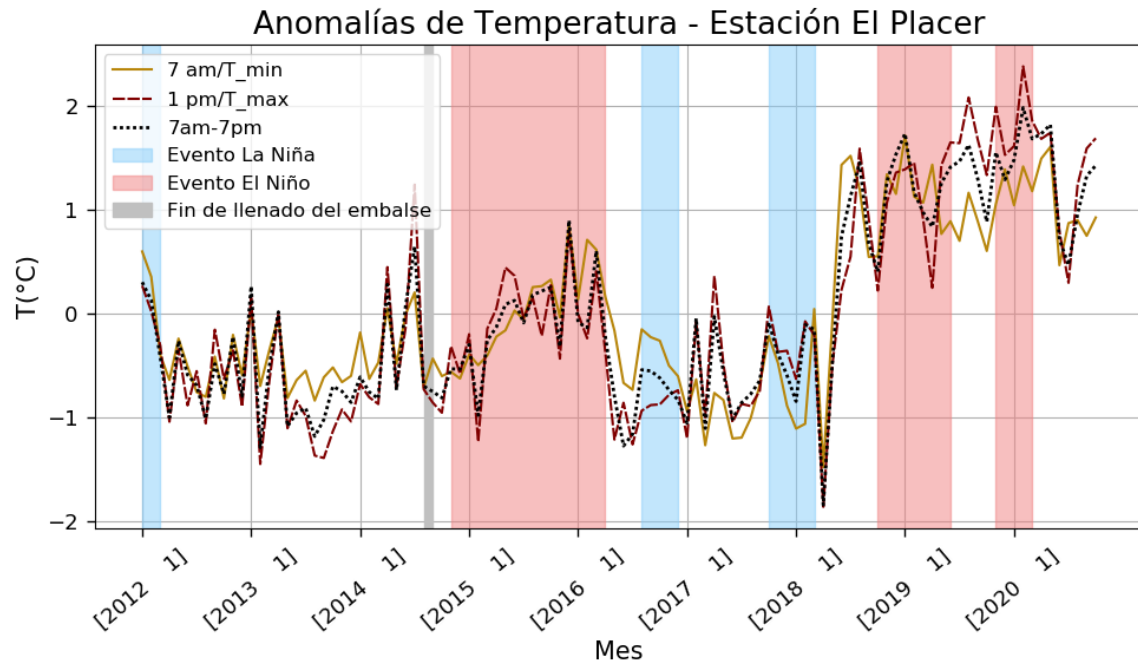


Figura C.32. Anomalías de temperatura para la estación N/I El Placer. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

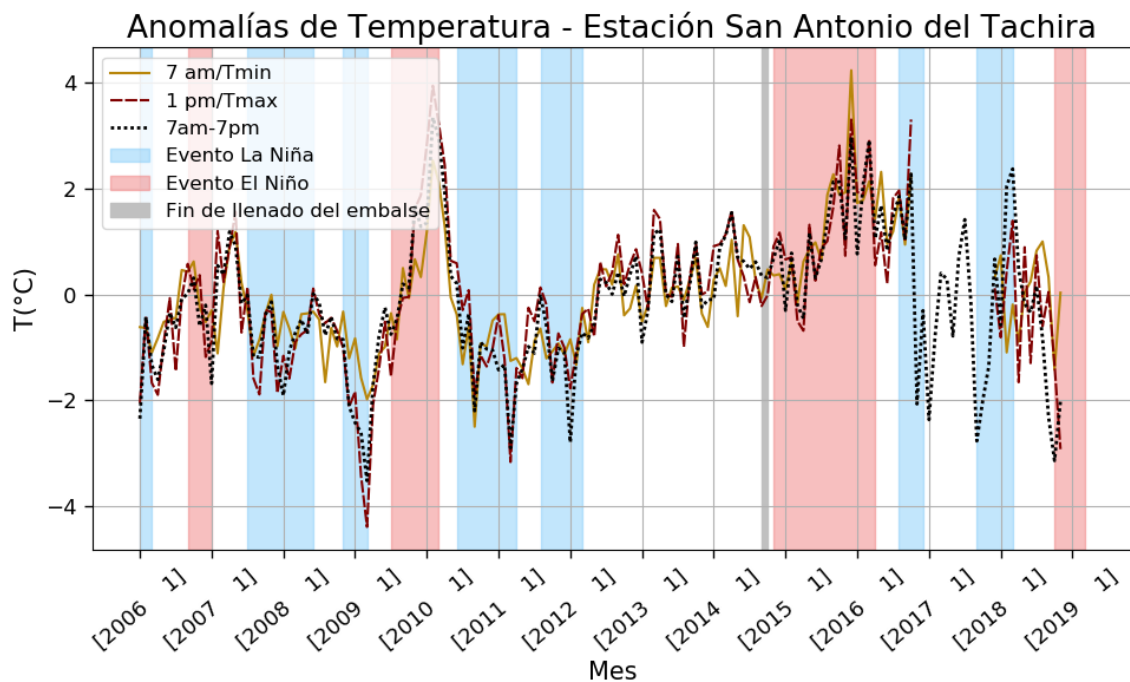


Figura C.33. Anomalías de temperatura para la estación NOAA San Antonio del Táchira. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

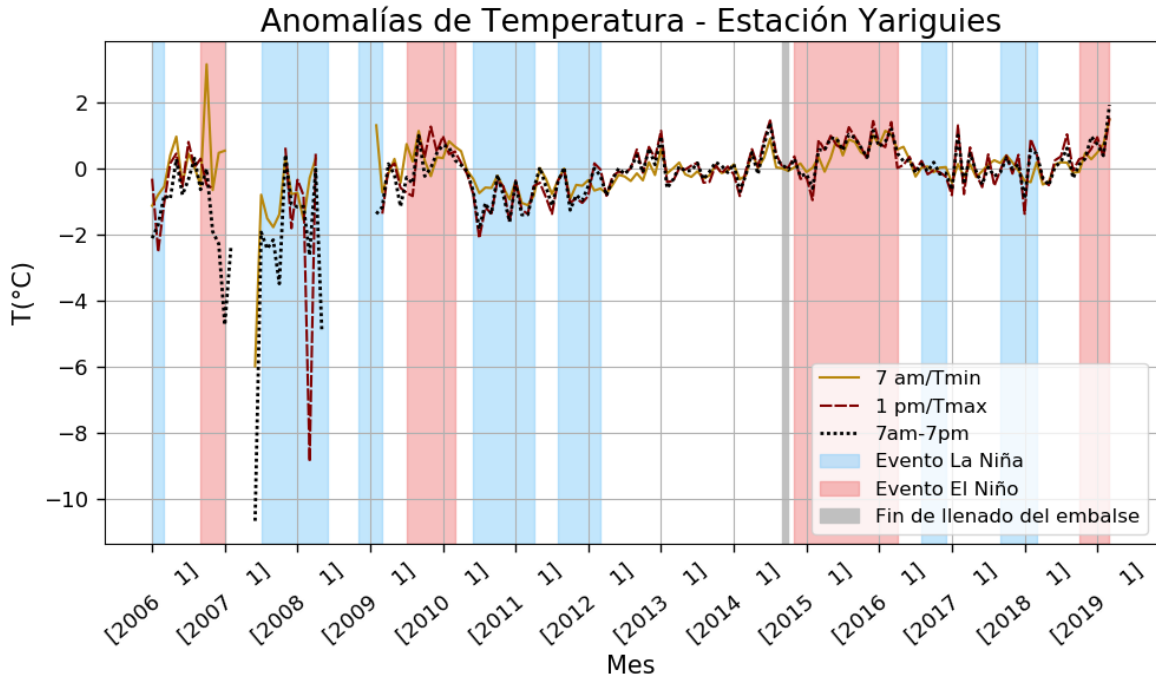


Figura C.34. Anomalías de temperatura para la estación NOAA Yariguies. Las líneas roja y amarilla representan temperatura máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la temperatura promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

- Señal del ENSO

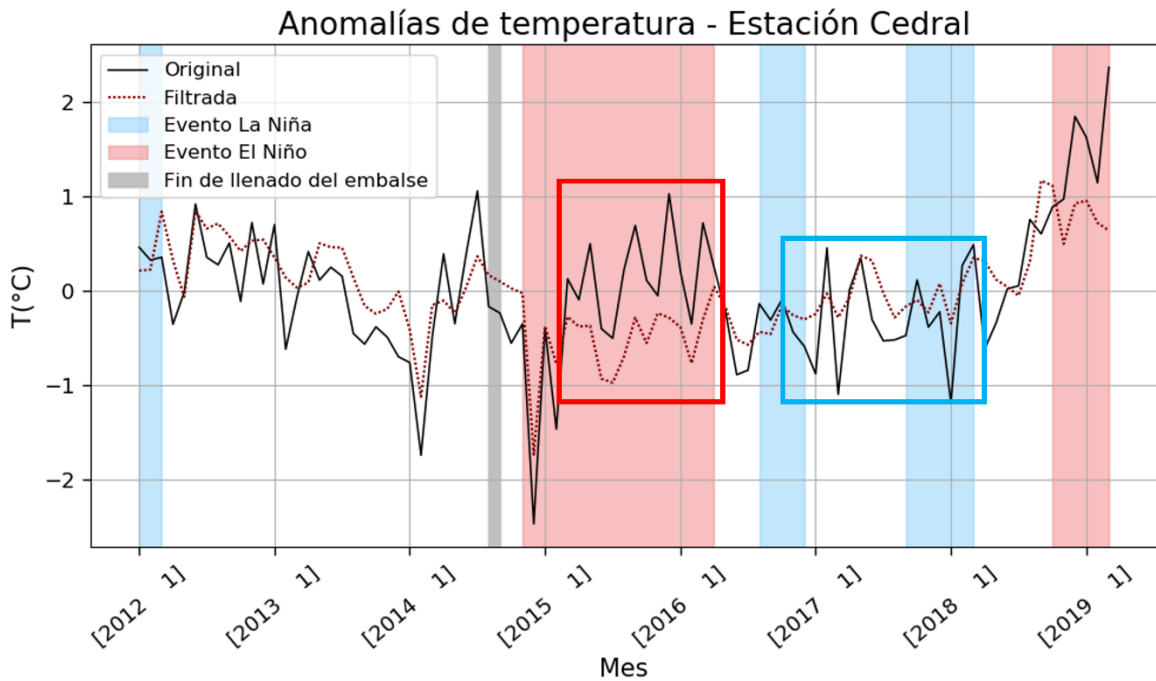


Figura C.35. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I Cedral. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

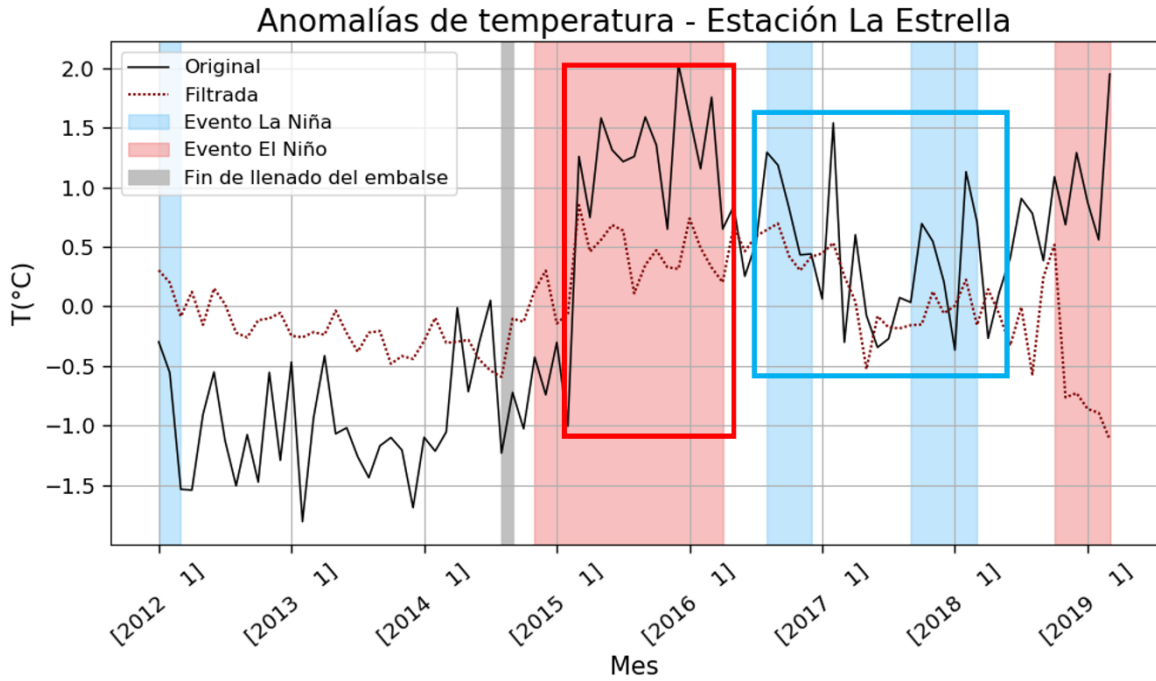


Figura C.36. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I La Estrella. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

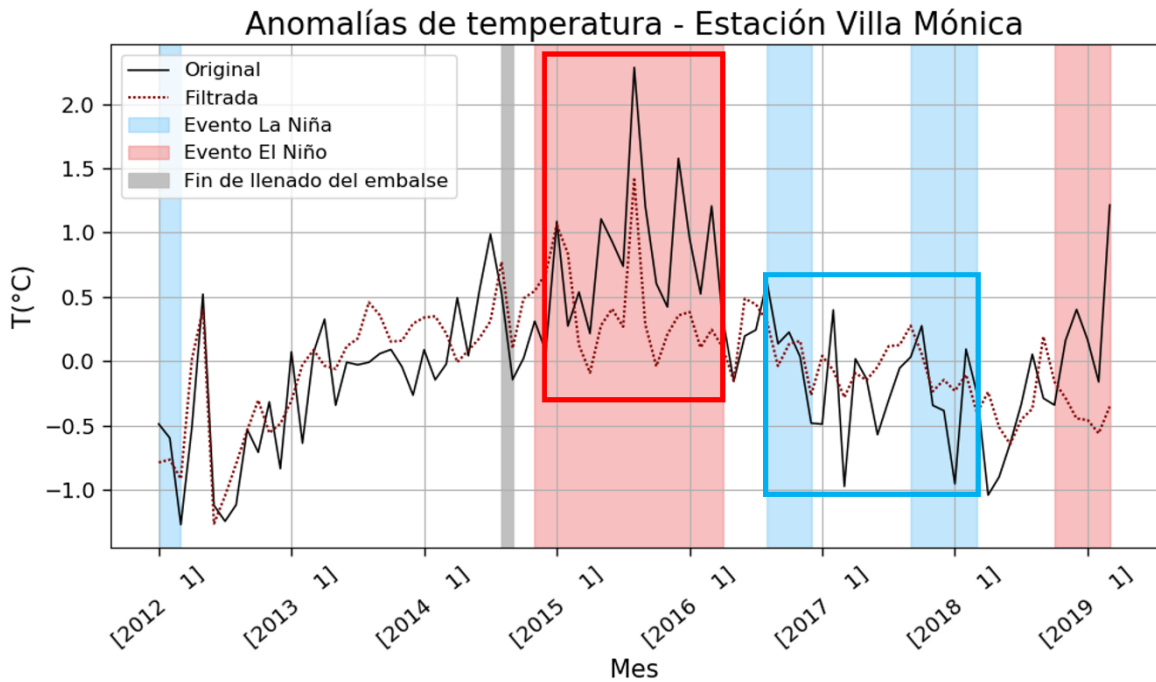


Figura C.37. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I Villa Mónica. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

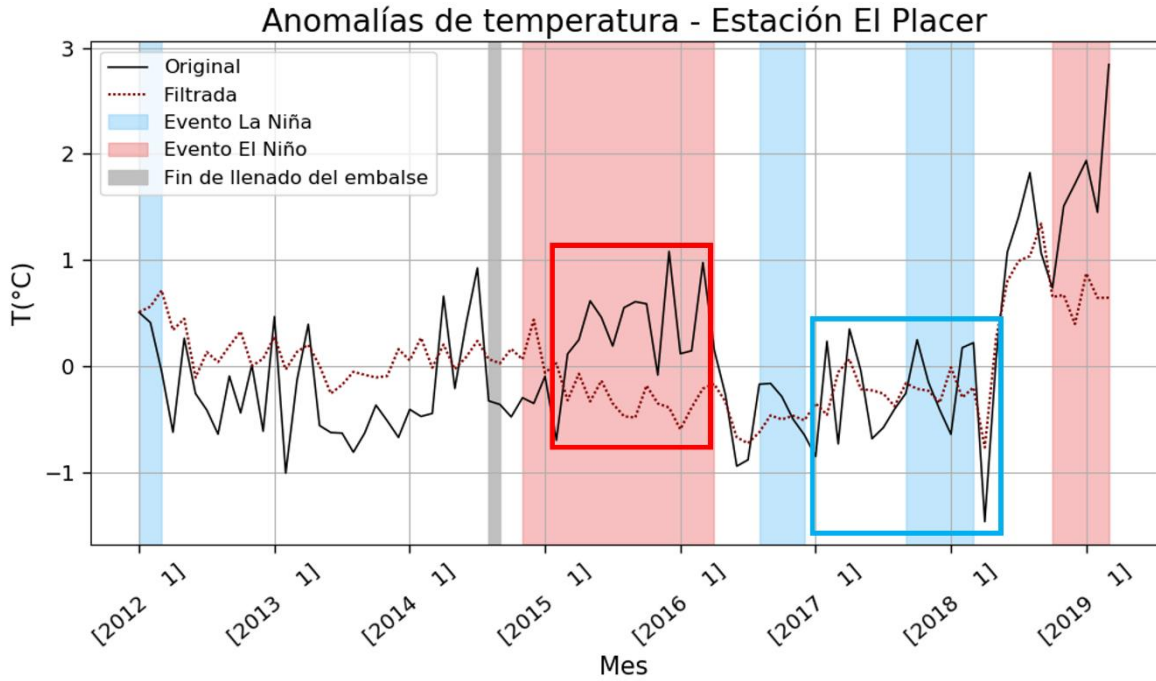


Figura C.38. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I El Placer. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

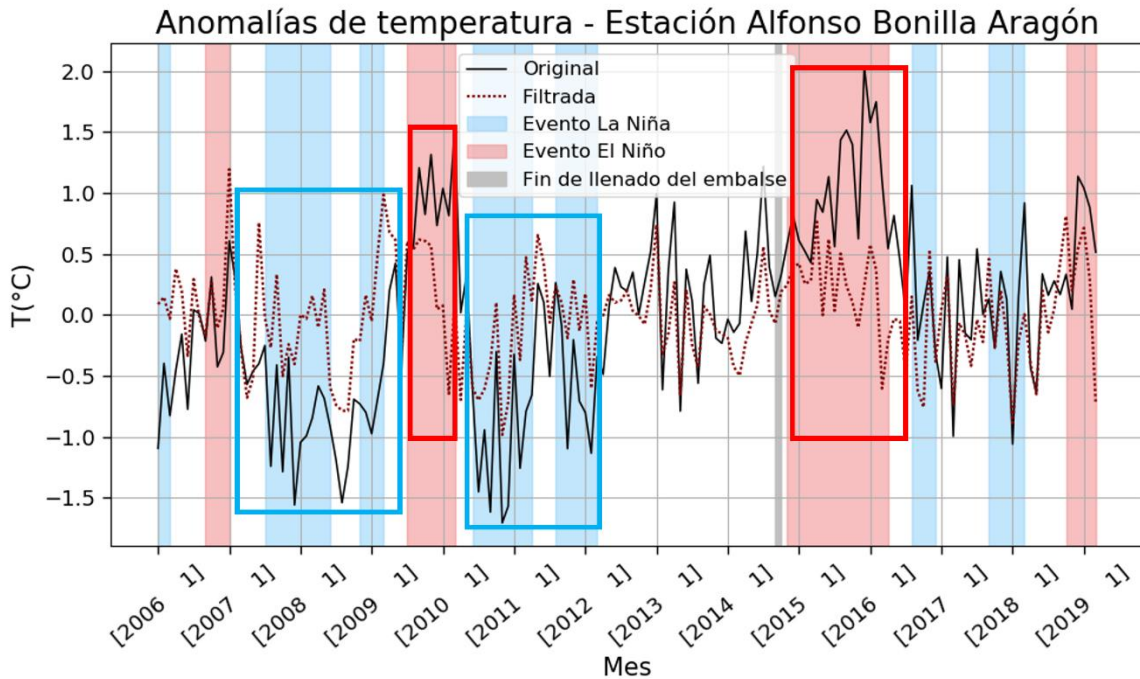


Figura C.39. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Alfonso Bonilla Aragón. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

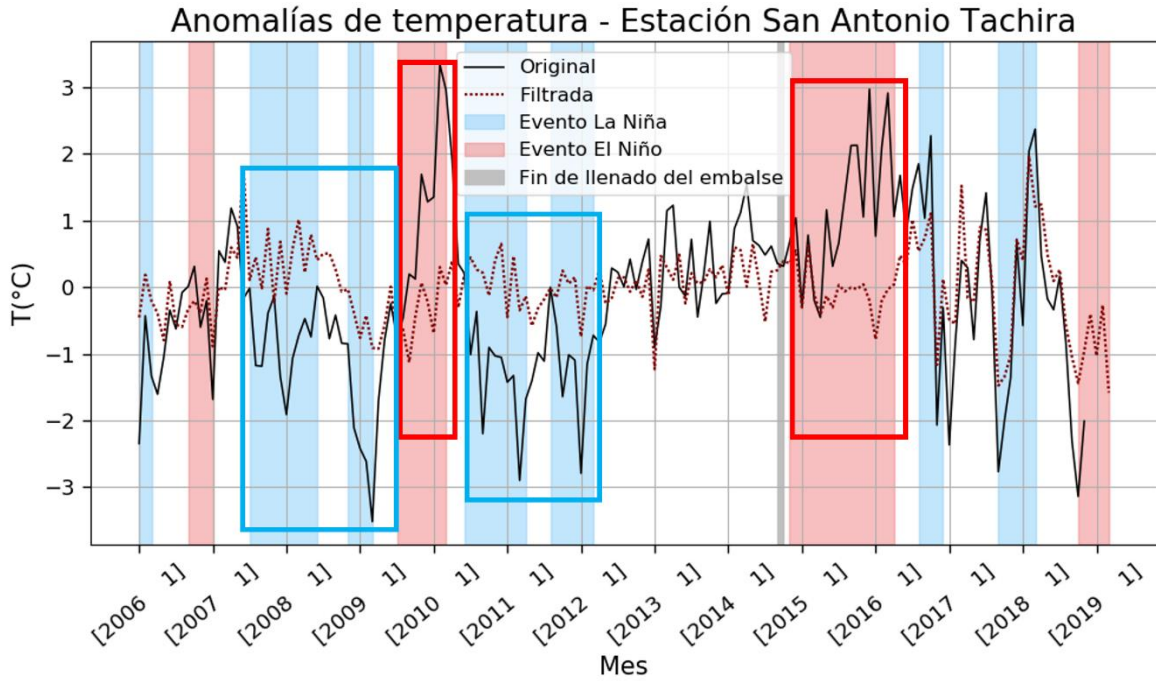


Figura C.40. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA San Antonio Táchira. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

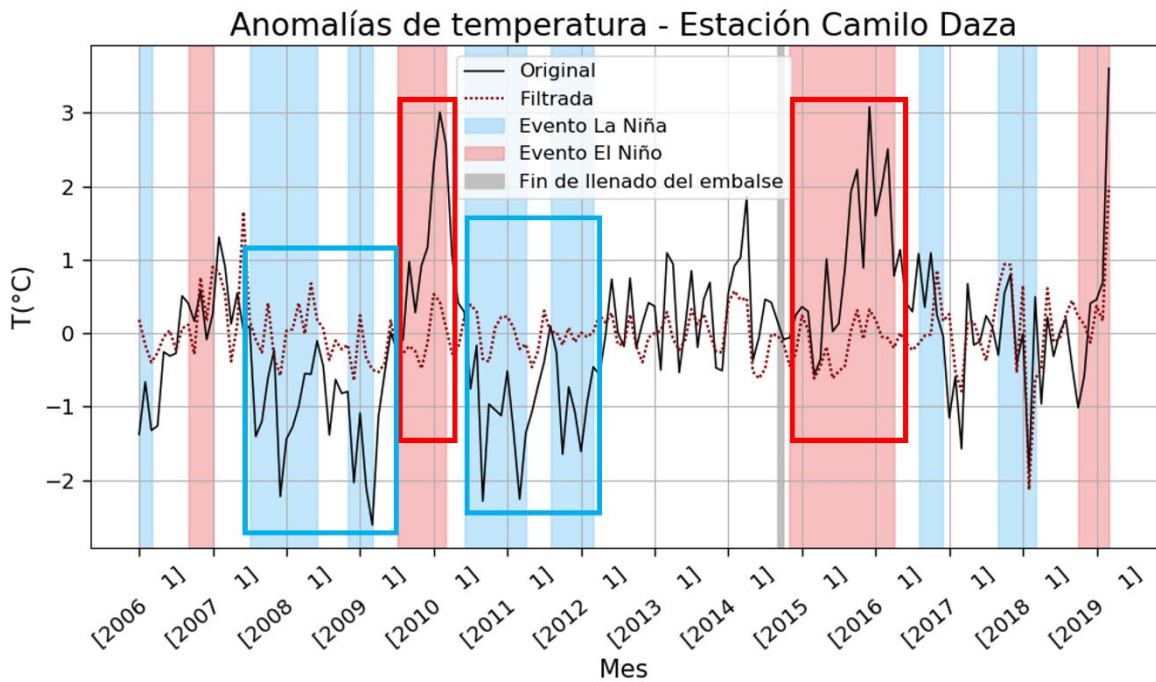


Figura C.41. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Camilo Daza. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

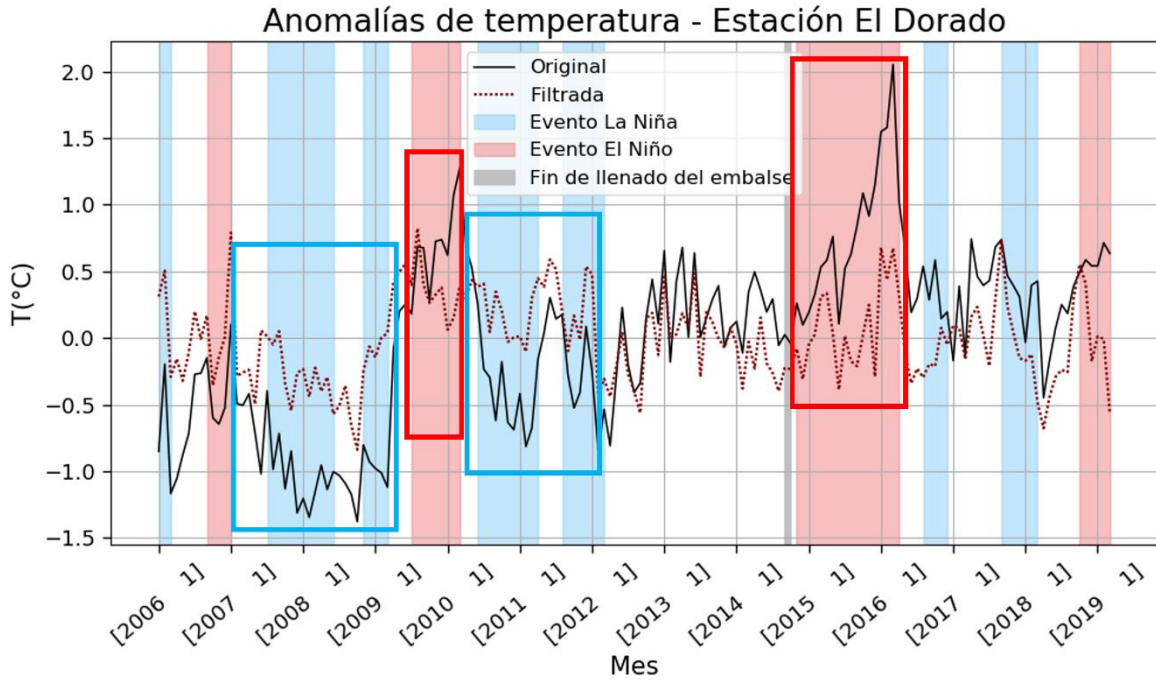


Figura C.42. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA El Dorado. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

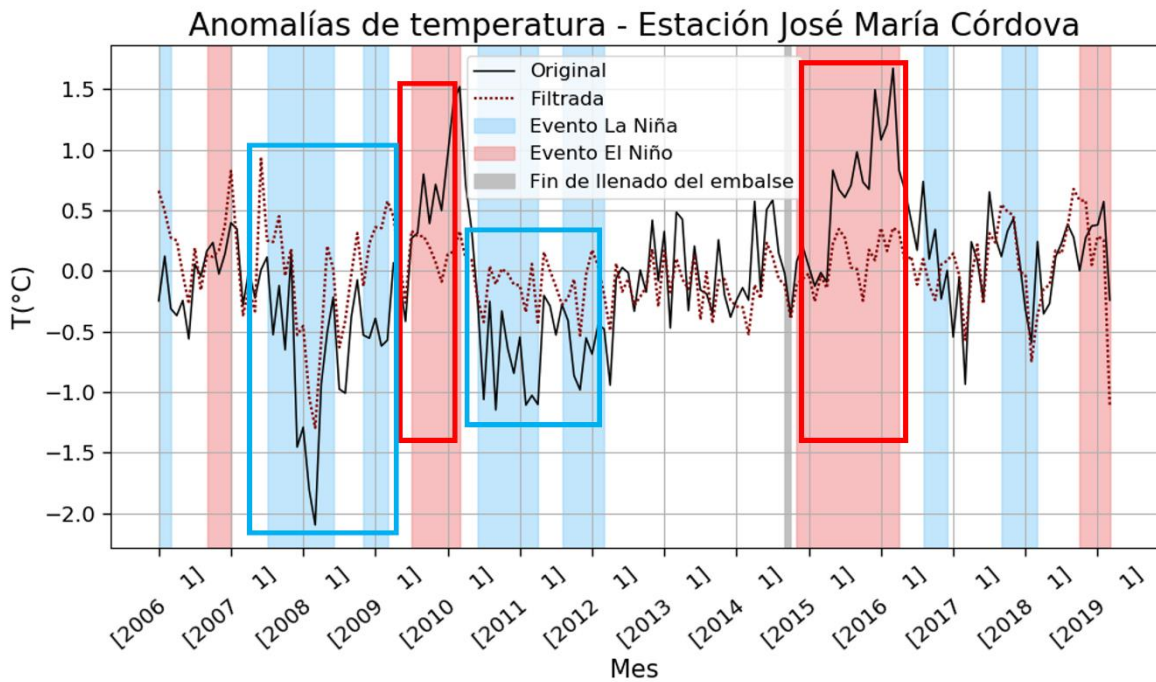


Figura C.43. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA José María Córdova. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

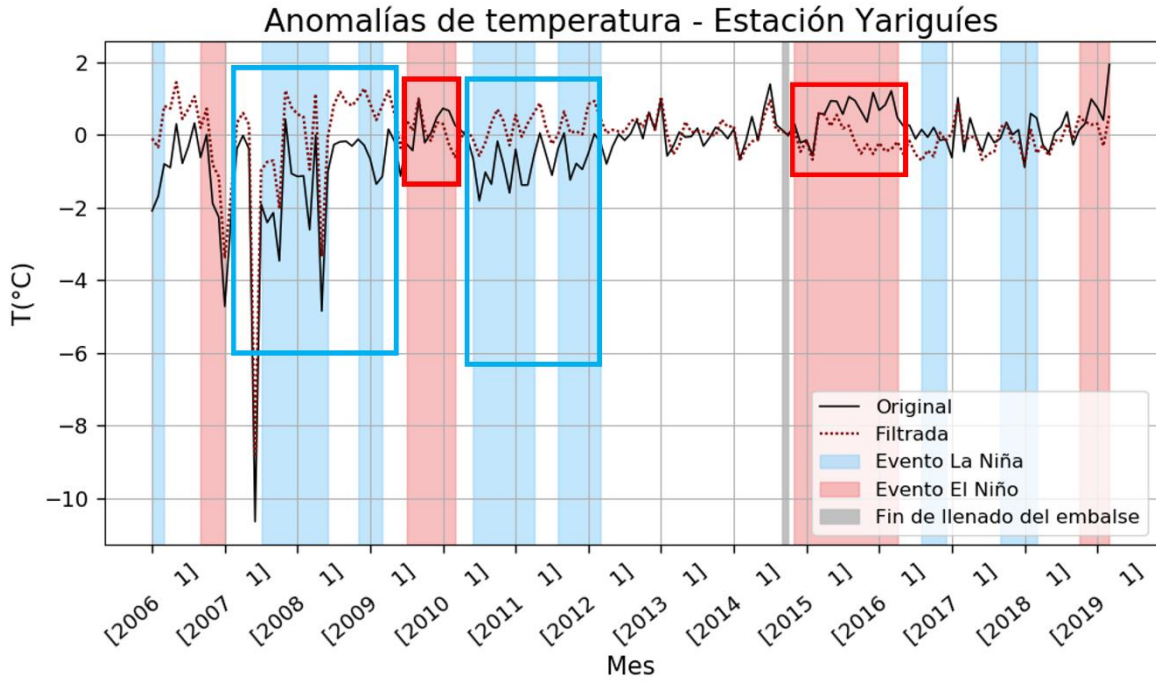


Figura C.44. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Yariguíes. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

C.4. Figuras complementarias para sección “3.3.5 Humedad relativa”

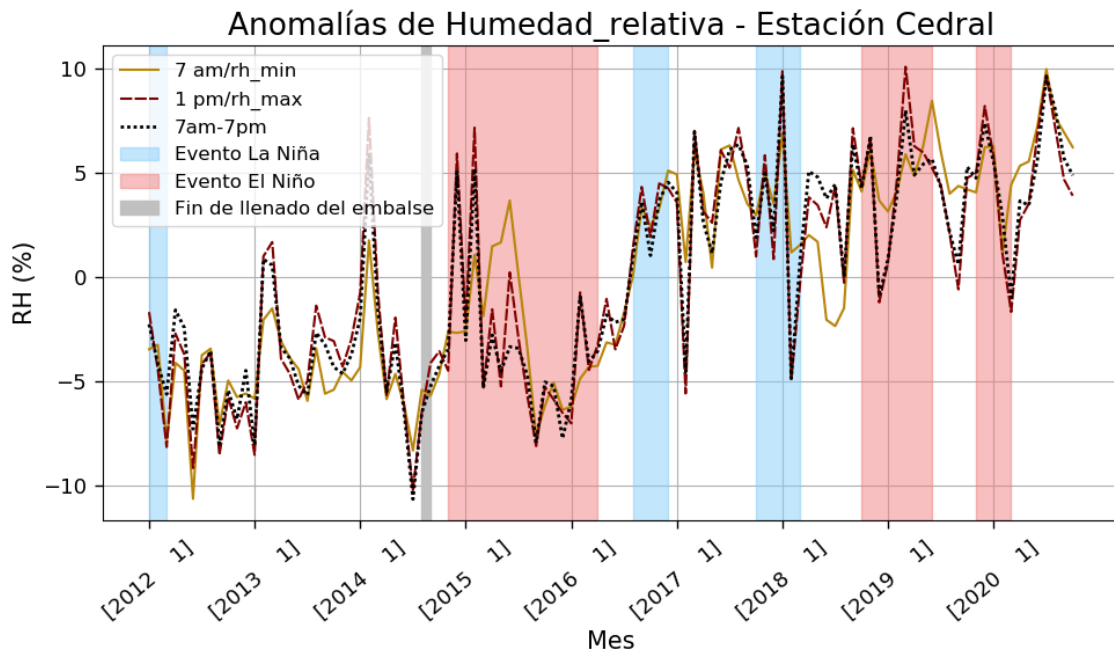


Figura C.45. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I Cedral. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

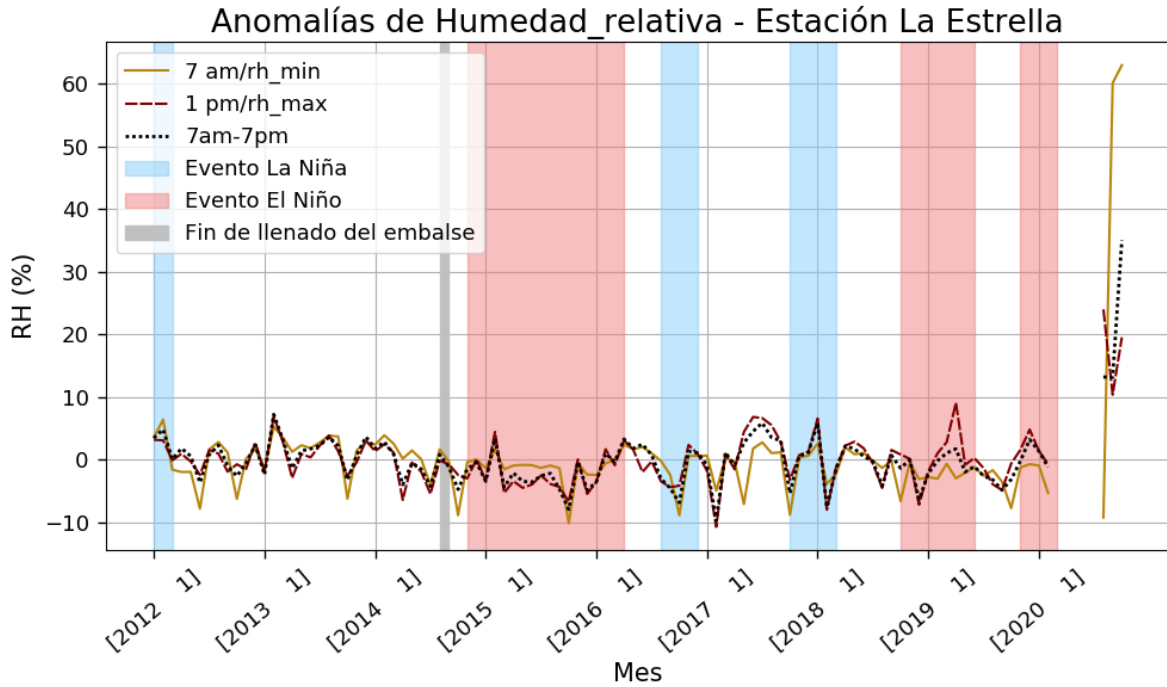


Figura C.46. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I La Estrella. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

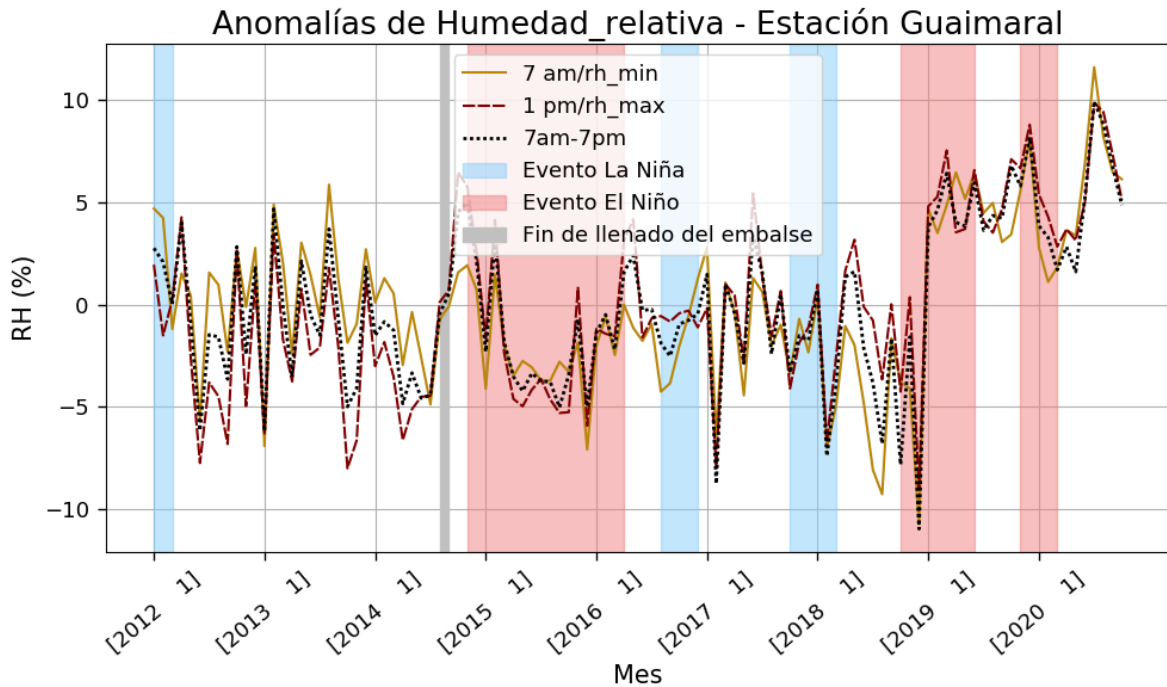


Figura C.47. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I Guaimaral. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

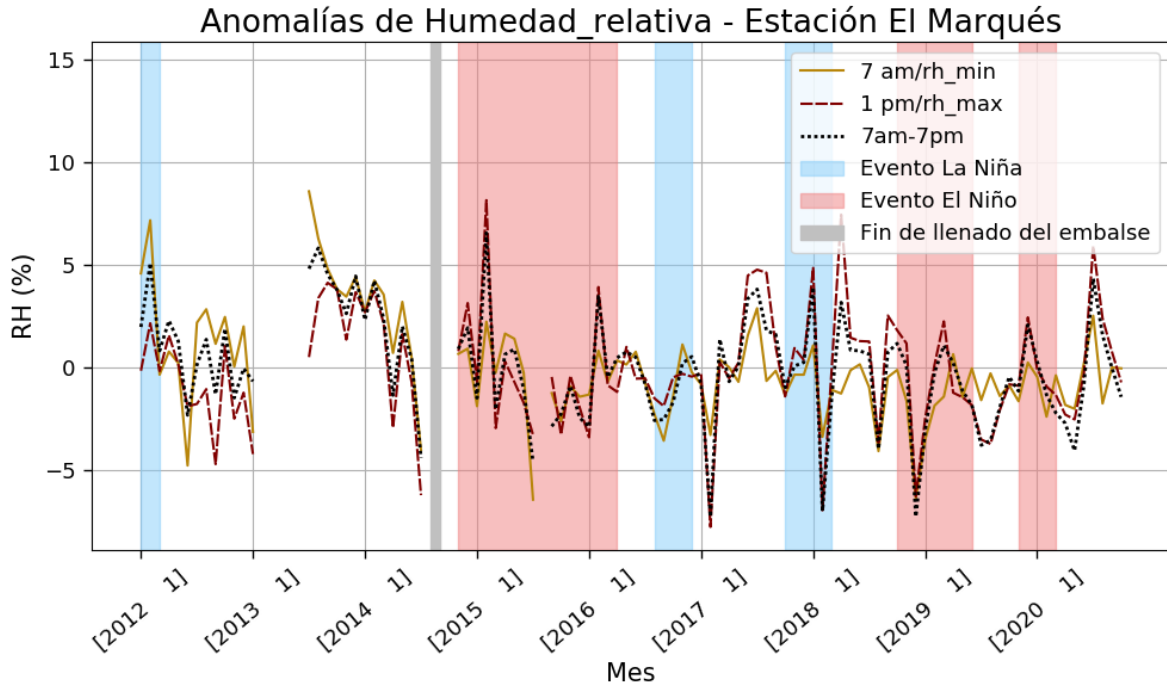


Figura C.48. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I El Marqués. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

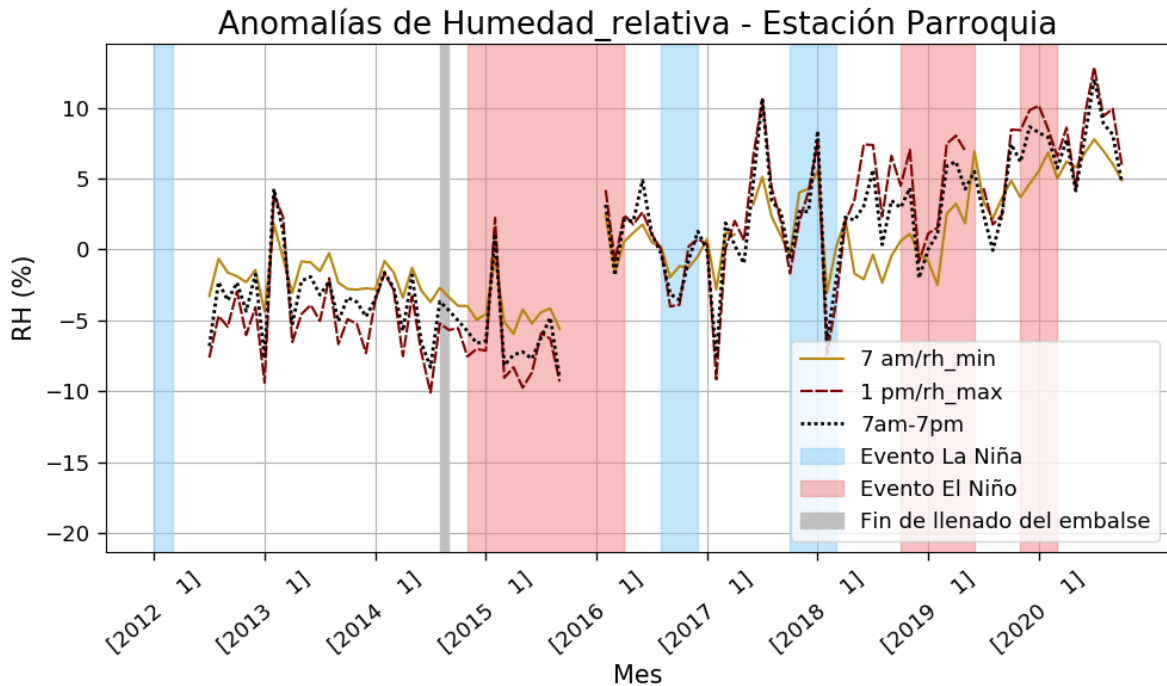


Figura C.49. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I Parroquia. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

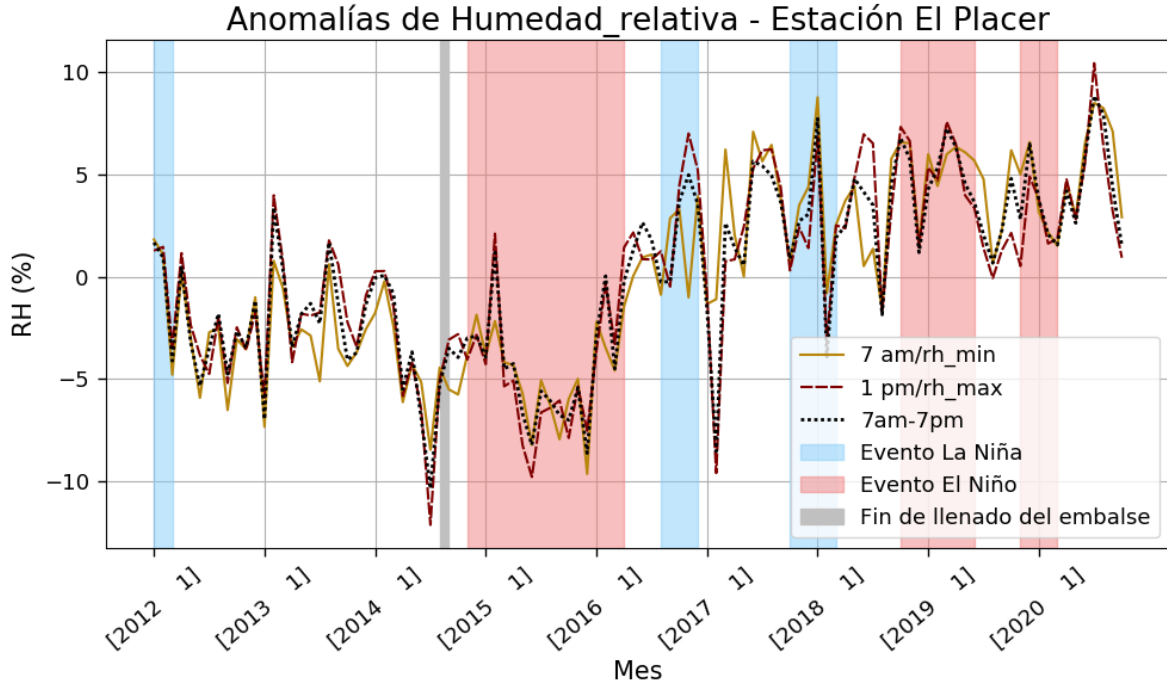


Figura C.50. Anomalías de humedad relativa para la estación N/I El Placer. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

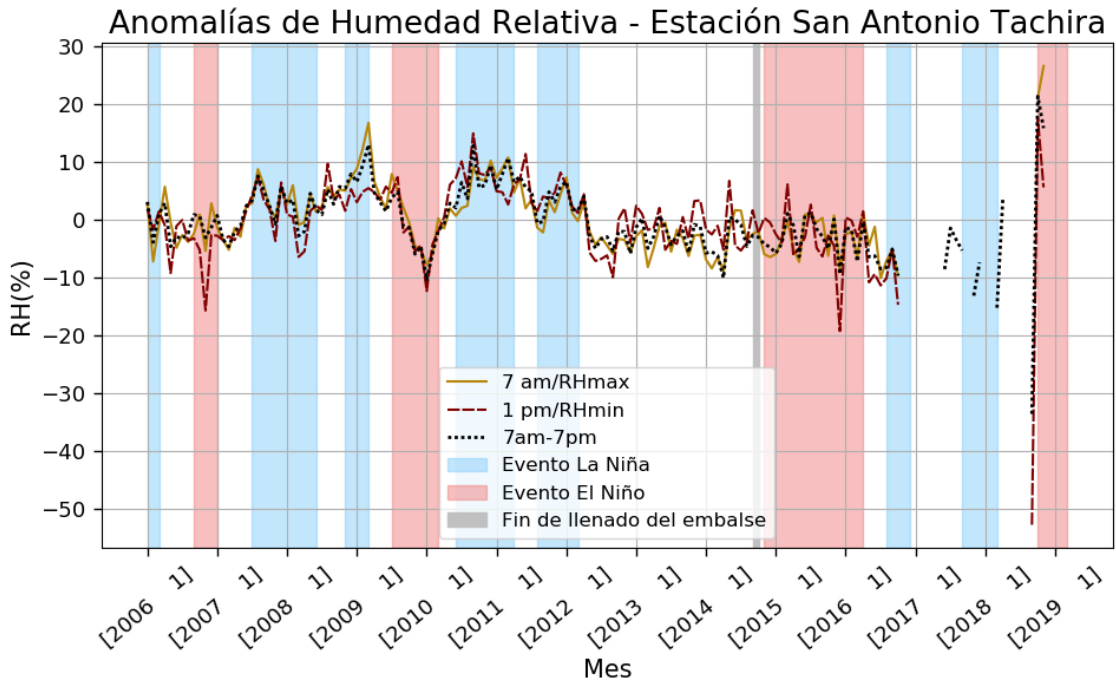


Figura C.51. Anomalías de humedad relativa para la estación NOAA San Antonio Táchira. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

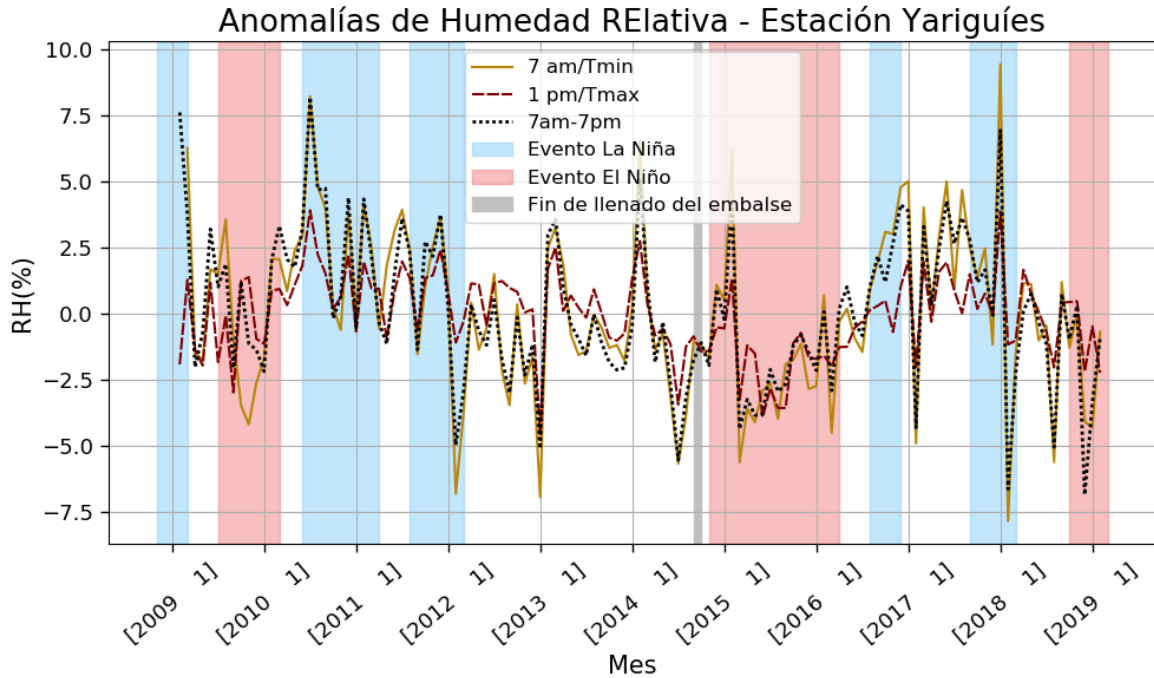


Figura C.52. Anomalías de humedad relativa para la estación NOAA Yariguíes. Las líneas amarilla y roja representan humedad relativa máxima y mínima, respectivamente. La línea negra representa la humedad relativa promedio del día. Las franjas rojas representan eventos El Niño. Las franjas azules representan eventos La Niña. La franja gris representa el momento de llenado del embalse

- Señal del ENSO

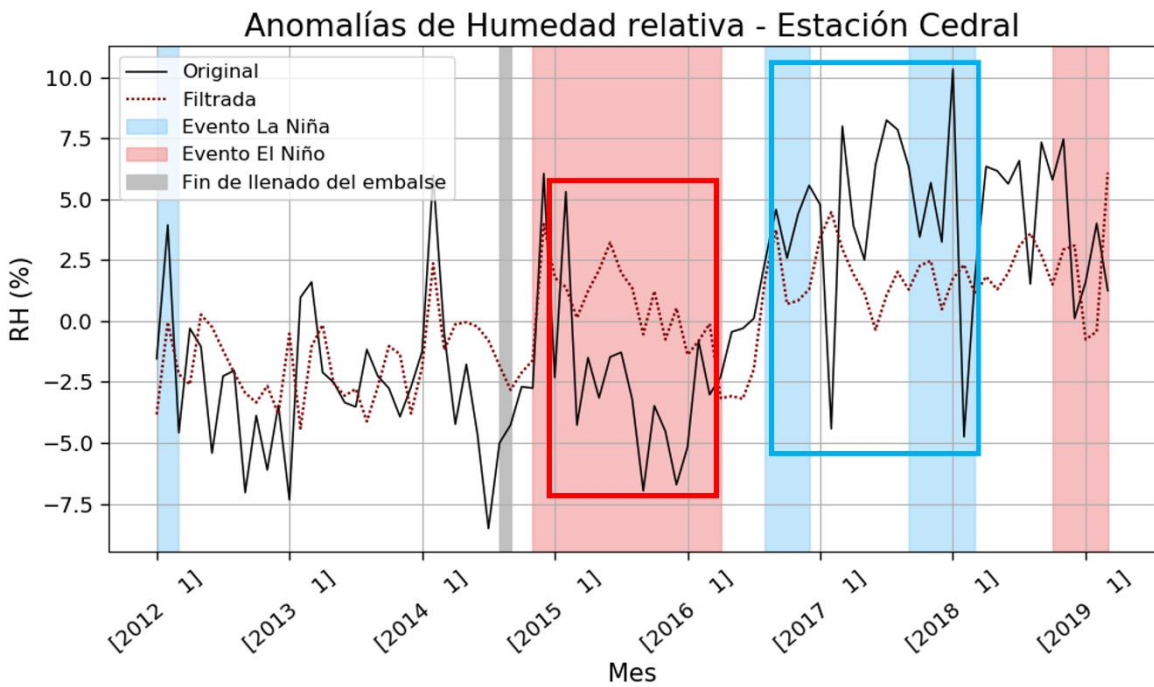


Figura C.53. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NI Cedral. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

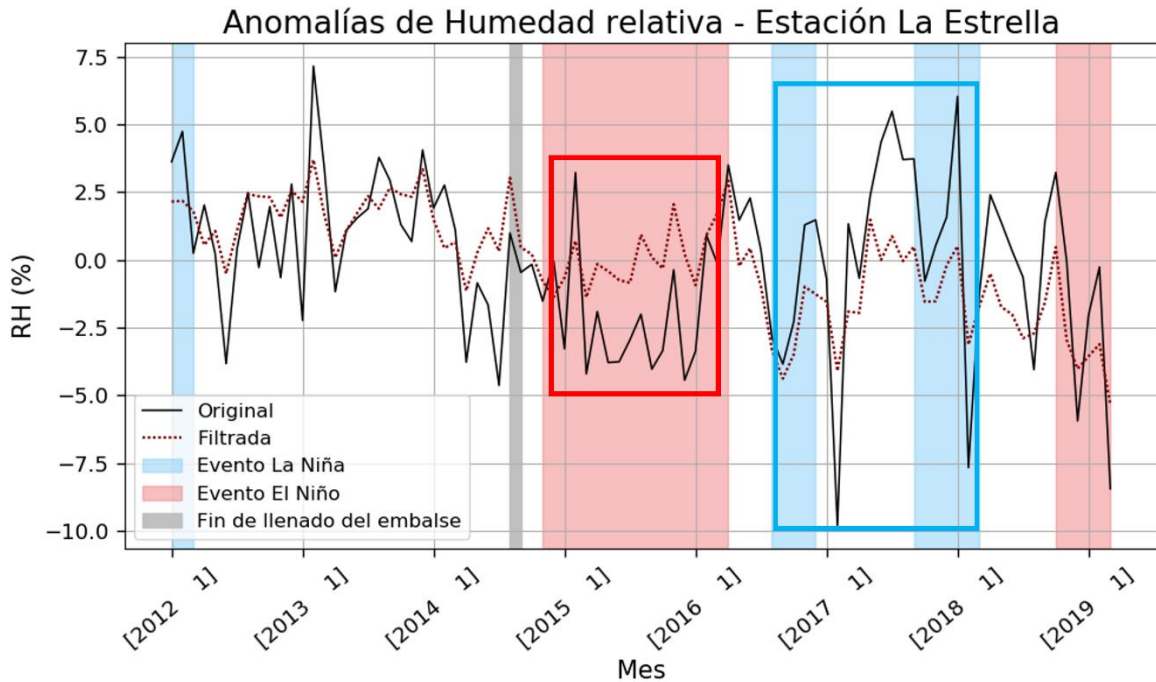


Figura C.54. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I La Estrella. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

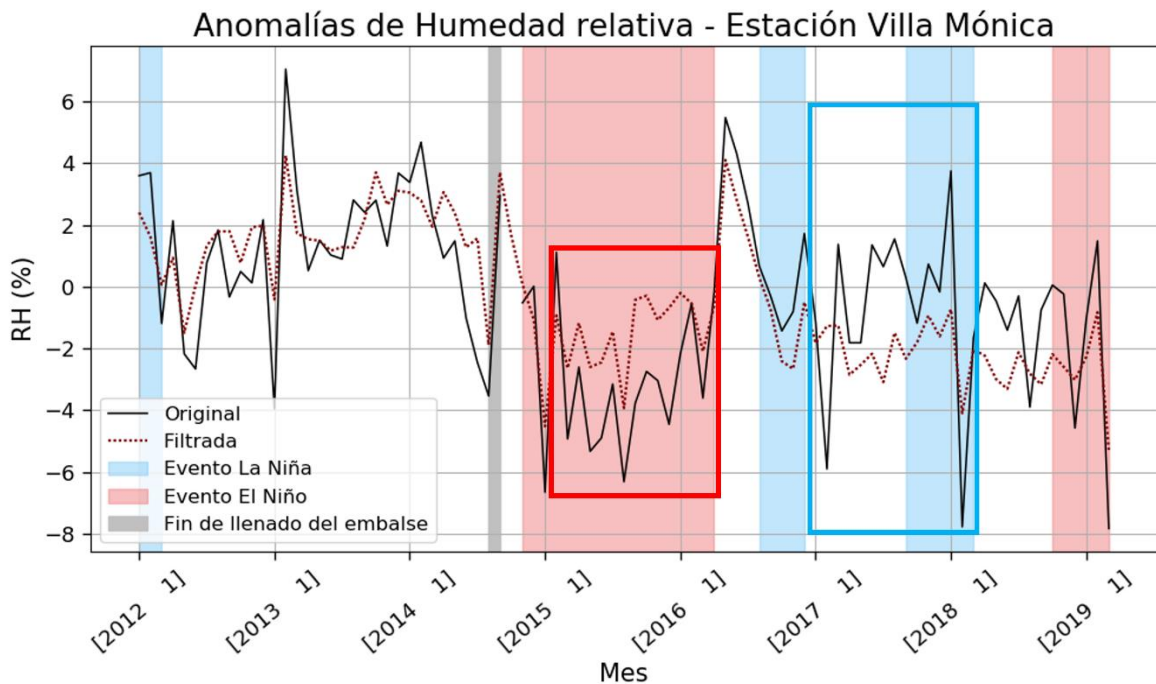


Figura C.55. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I Villa Mónica. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

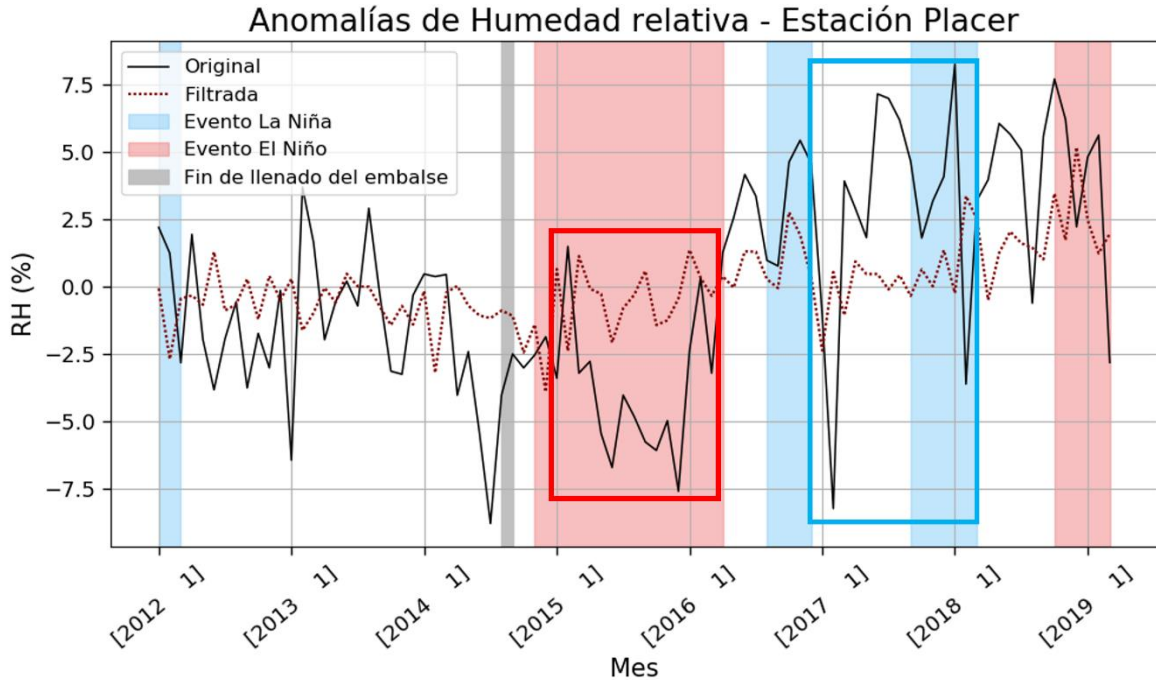


Figura C.56. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación N/I el Placer. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

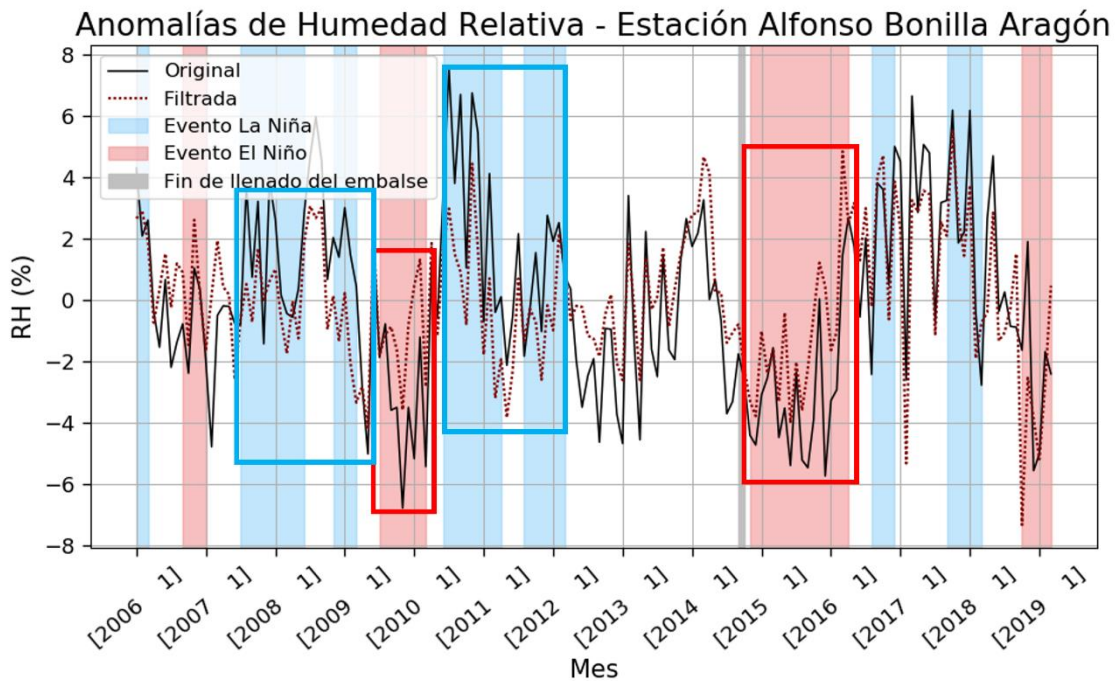


Figura C.57. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Alfonso Bonilla Aragón. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

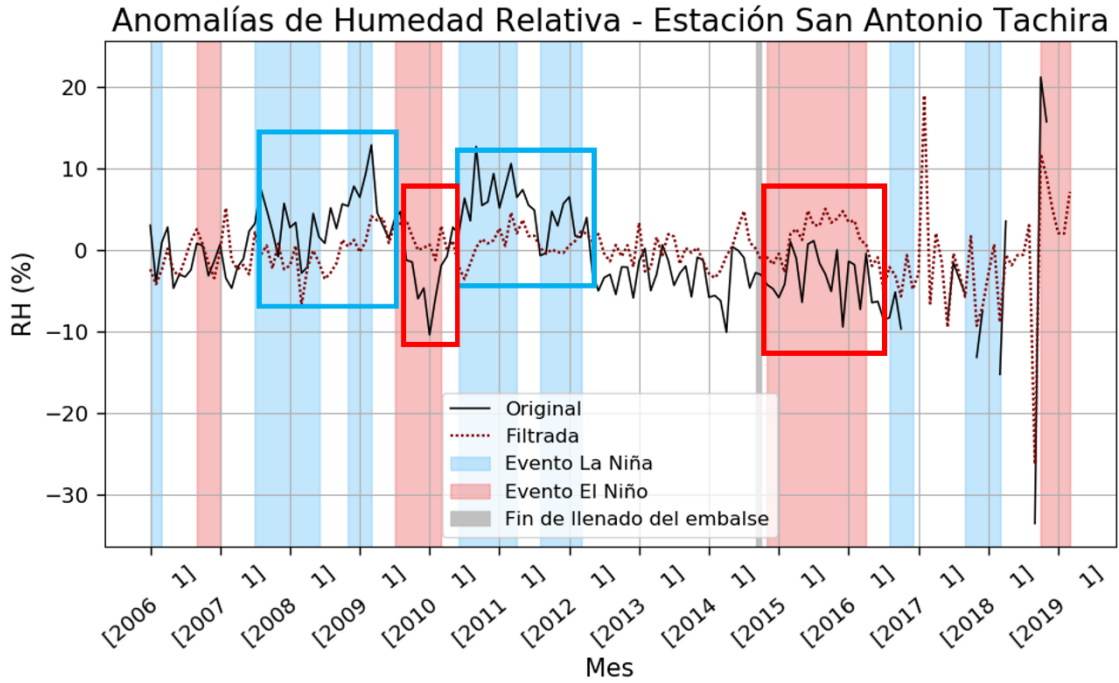


Figura C.58. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA San Antonio Táchira. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

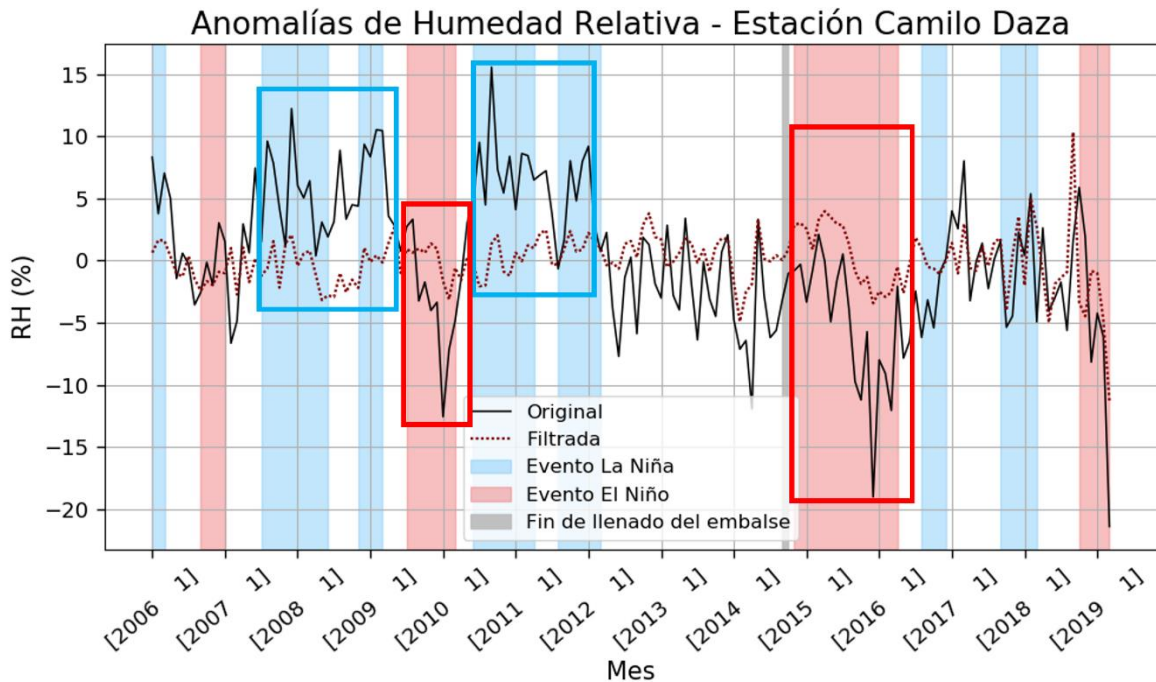


Figura C.59. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Camilo Daza. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

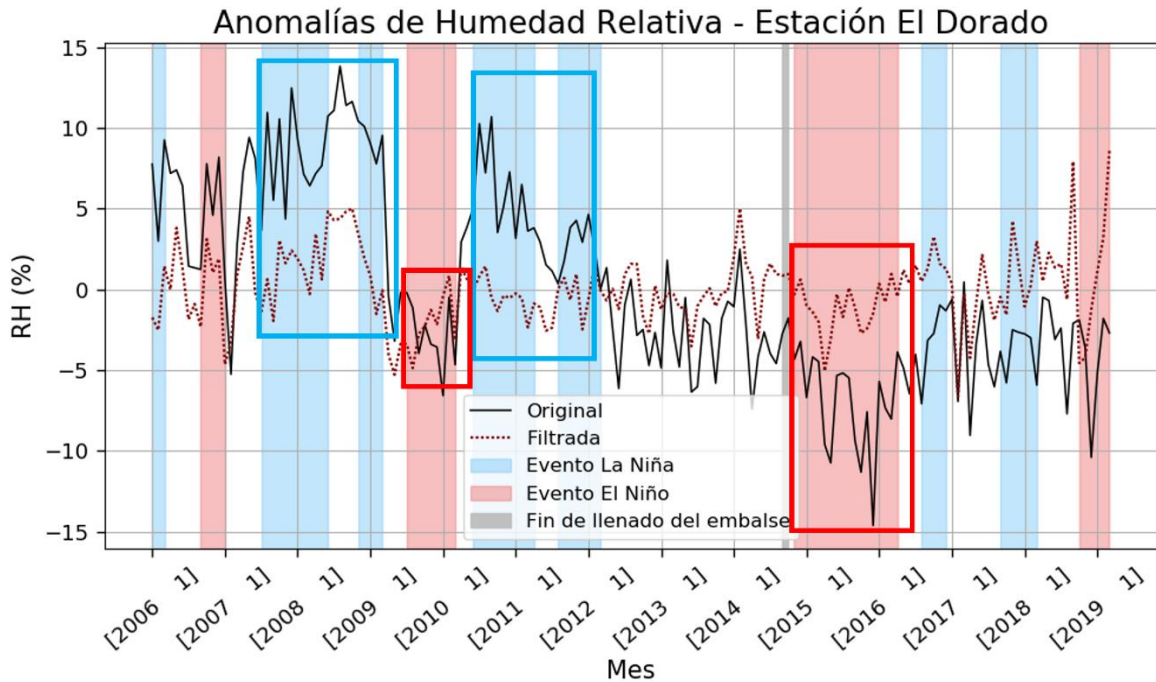


Figura C.60. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA El Dorado. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

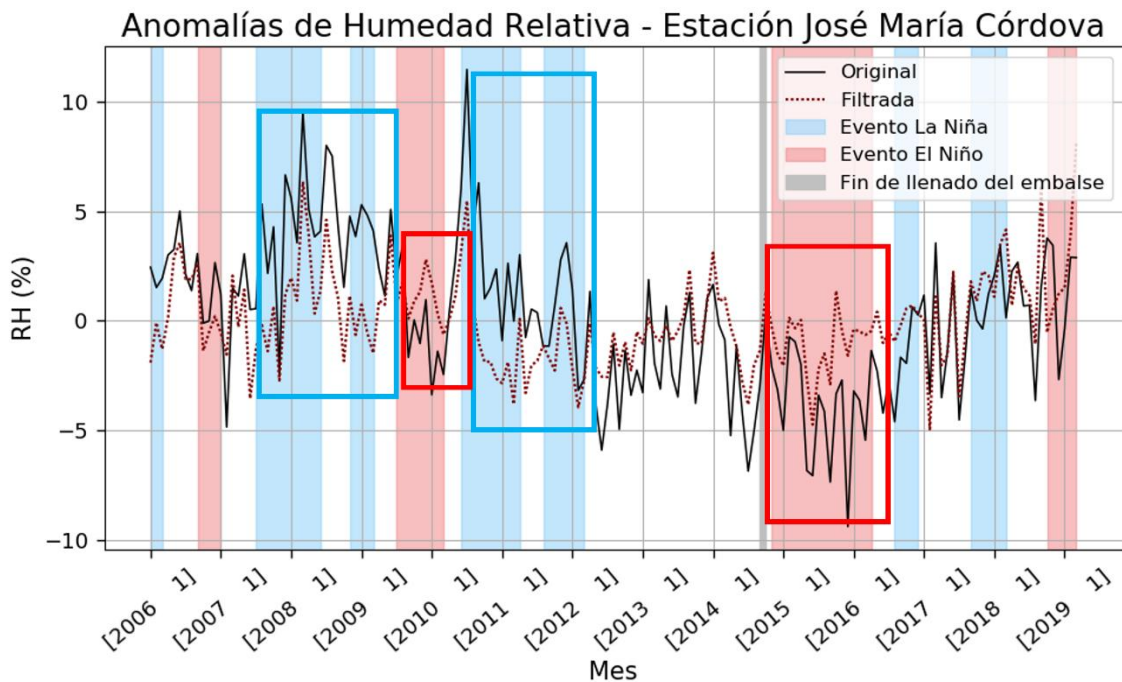


Figura C.61. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA José María Córdova. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

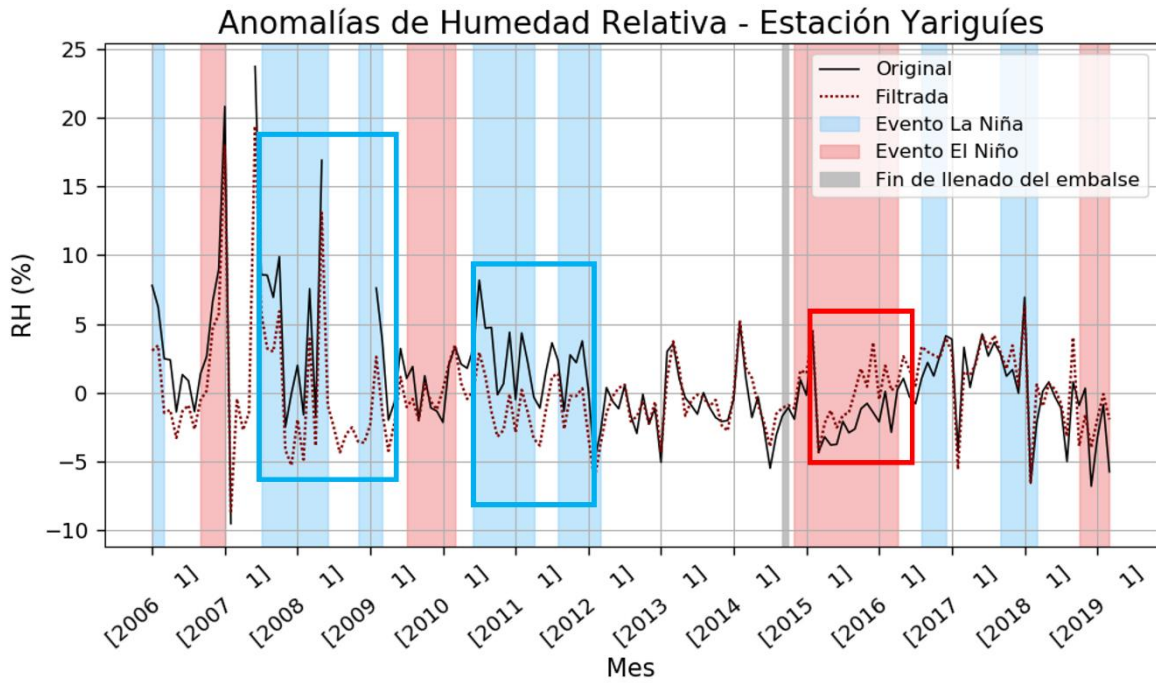


Figura C.62. Comparación entre la serie original y la serie sin la señal ENSO para la estación NOAA Yariguíes. Los recuadros rojos resaltan el cambio para momentos de ocurrencia de eventos El Niño mientras que los recuadros azules resaltan el cambio en momentos de ocurrencia de eventos La Niña. La franja gris representa el momento del llenado del embalse

Anexo D: Figuras complementarias del Capítulo 6

En este anexo se presentan las figuras complementarias para la comparación entre CTRL y LULCC para las zonas de las estaciones Cedral, Guaimaral, El Marqués y El Placer.

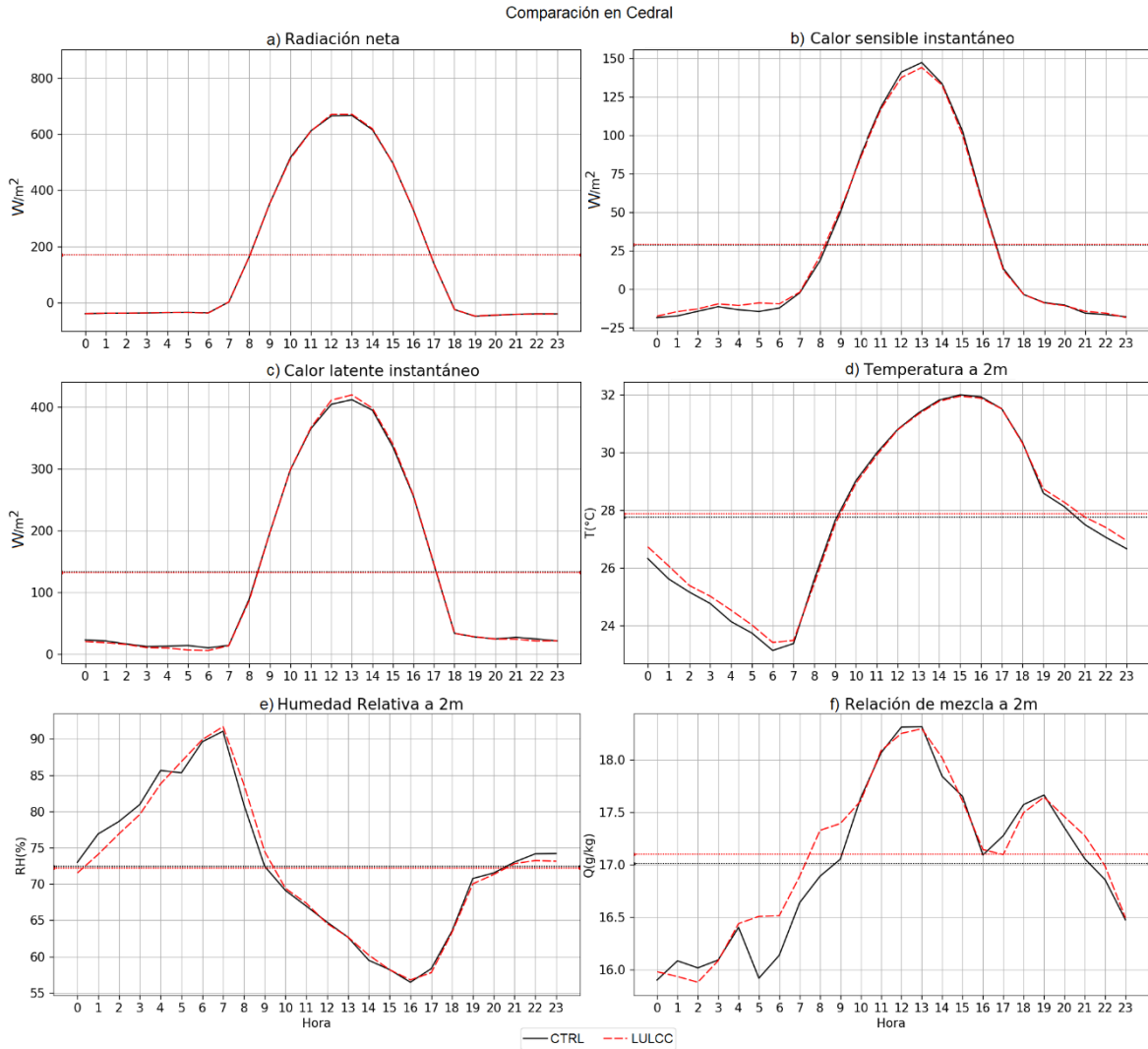


Figura D.1. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación Cedral a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja punteada el experimento LULLC

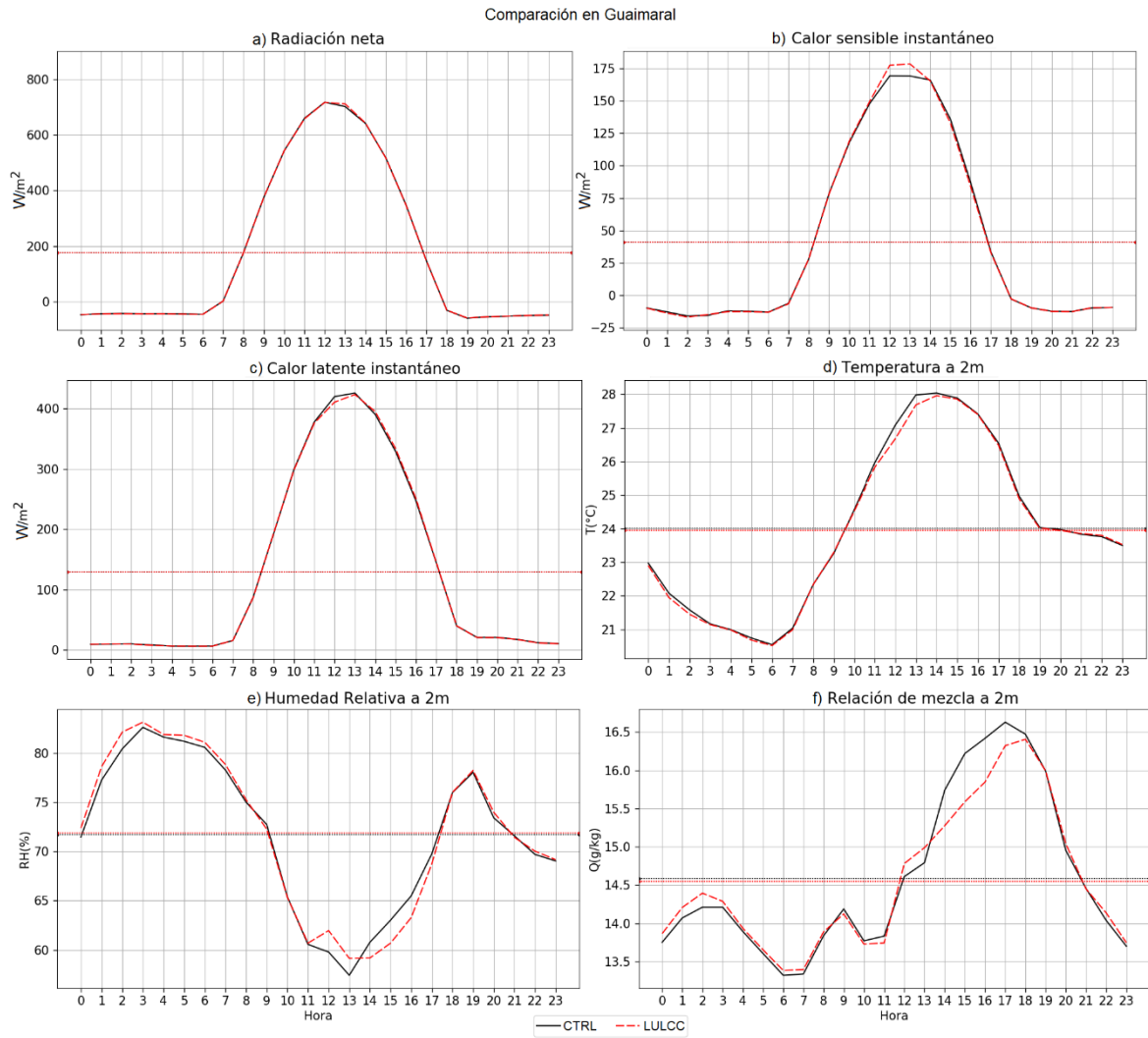


Figura D.2. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación Guaimaral a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja punteada el experimento LULLC

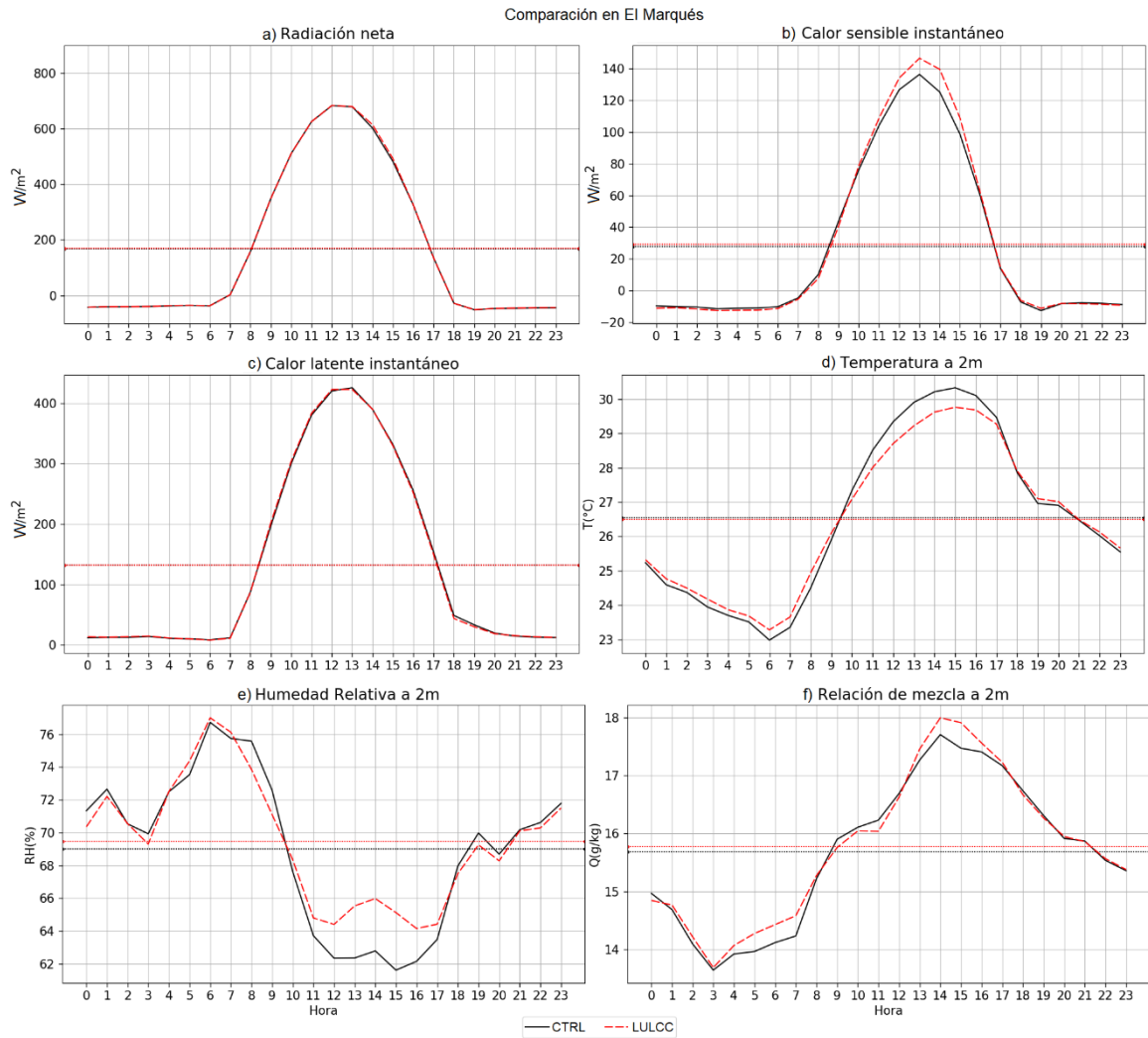


Figura D.3. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación El Marqués a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja punteada el experimento LULLC

Comparación en El Placer

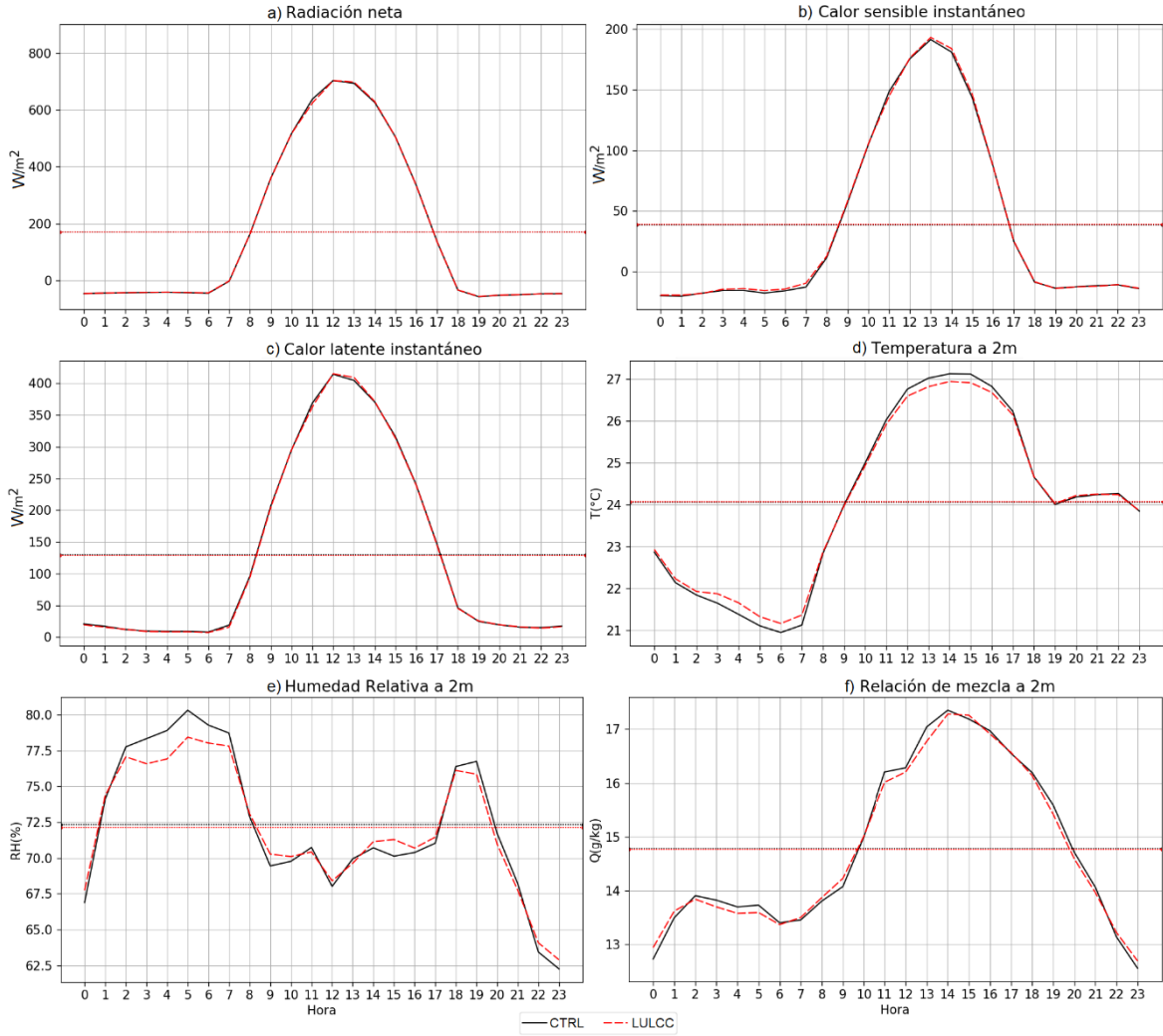


Figura D.4. Ciclos diarios de las variables relacionadas con el balance de energía en la estación El Placer a) Radiación neta. b) Calor sensible. c) calor latente. d) Temperatura a 2m. e) Humedad relativa a 2m. f) Relación de mezcla a 2m. La línea negra representa el experimento CTRL y la roja punteada el experimento LULLC

Referencias

- Alarcón, A. D. (2018). El Sector hidroeléctrico en Latinoamérica: Desarrollo, potencial y perspectivas. 62.
- Andreoli, R. V., & Kayano, M. T. (2005). ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. *International Journal of Climatology*, 25(15), 2017–2030. <https://doi.org/10.1002/joc.1222>
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A., Delgado, J., & Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839–2865. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>
- Arias, P. A., Martínez, J. A., & Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America. *Climate Dynamics*, 45(9–10), 2861–2884. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>
- Bautista, L. E. (2015). *Evaluación ambiental estratégica del componente abiótico en el proyecto hidroeléctrico sobre el Rio Sogamoso "Hidrosogamoso"*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/6252>.
- Bryan, G. H., Wyngaard, J. C., & Fritsch, J. M. (2003). Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. *Monthly Weather Review*, 131(10), 2394–2416. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2394:RRFTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2394:RRFTSO>2.0.CO;2)
- Busetto, L., & Ranghetti, L. (2016). MODISTsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers and Geosciences*, 97, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.020>
- 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., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Calvo Fernández, N., García, R. R., García Herrera, R., Gallego Puyol, D., Gimeno Presa, L., Hernández Martín, E., & Ribera Rodríguez, P. (2004). Analysis of the ENSO signal in tropospheric and stratospheric temperatures observed by MSU, 1979–2000. *Journal of Climate*, 17(20), 3934–3946. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3934:AOTESI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3934:AOTESI>2.0.CO;2)
- Caviedes, C. (2007). Impacts of El Niño–Southern Oscillation on Natural and Human Systems. En Veblen, T. T., Young, K. R., Orme, A. R. *The Physical Geography of South America* (pp. 305–321). *Oxford University Press*
- Cerón, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., de Souza, R. A. F., Jones, C., & Carvalho, L. M. V. (2020). The influence of the atlantic multidecadal oscillation on the choco low-level jet and precipitation in colombia. *Atmosphere*, 11(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/atmos11020174>
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling and advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Chiessi, C. M., Mulitza, S., Pätzold, J., Wefer, G., & Marengo, J. A. (2009). Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(21), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2009GL039914>
- Choulga, M., Kourzeneva, E., Balsamo, G., Boussetta, S., & Wedi, N. (2019). Upgraded global mapping information for earth system modelling: An application to surface water depth at the ECMWF. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4051–4076. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4051-2019>

- Chow, Fotini Katopodes, Stephan F.J. De Wekker, & Snyder, B. J. (2013). Mountain Weather Research and Forecasting (Fotini K. Chow, S. F. J. De Wekker, & B. J. Snyder (eds.)). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4098-3>
- Corzo-Arévalo, Daniel. (2020). A guideline proposal to formulate an environmental policy for tourism in the Topocoro reservoir in Colombia. *Revista interamericana de ambiente y turismo*, 16(1), 2-14. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-235x2020000100002>
- Cotton, W., & Pielke, R. A. (2007). Human impacts on weather and climate (second edi). Cambridge university press.
- Dai, A., & Wigley, T. M. L. (2000). Precipitation Precip . Anomaly (mm) for Typical El Ninos. October, 27(9), 1283–1286.
- De Meij, A., & Vinuesa, J. F. (2014). Impact of SRTM and Corine Land Cover data on meteorological parameters using WRF. *Atmospheric Research*, 143, 351–370. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.004>
- Degu, A. M., Hossain, F., Niyogi, D., Pielke, R., Shepherd, J. M., Voisin, N., & Chronis, T. (2011). The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. *Geophysical Research Letters*, 38(4), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2010GL046482>
- Djafer, D., Irbah, A., & Zaiani, M. (2017). Identification of clear days from solar irradiance observations using a new method based on the wavelet transform. *Renewable Energy*, 101, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.038>
- ECMWF, (2018). Part IV: The Physical Processes. In IFS Documentation - Cy45r1. England.
- Finer, M., & Jenkins, C. N. (2012). Proliferation of hydroelectric dams in the andean amazon and implications for andes-amazon connectivity. *PLoS ONE*, 7(4), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035126>
- García Lozano, C. (2020). Modelo de ocupación territorial sostenible para el área de influencia de la represa Topocoro sobre el rio Sogamoso en Betulia Santander. Retrieved 19 October 2020, from <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/485>
- Graf, W. L. (1999). Dam nation: A geographic census of american dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources Research*, 35(4), 1305–1311. <https://doi.org/10.1029/1999WR900016>
- Hao, B., Ma, M., Li, S., Li, Q., Hao, D., Huang, J., Ge, Z., Yang, H., & Han, X. (2019). Land use change and climate variation in the three gorges reservoir catchment from 2000 to 2015 based on the google earth engine. *Sensors (Switzerland)*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/s19092118>
- Henao, J. J., Mejía, J. F., Rendón, A. M., & Salazar, J. F. (2020). Sub-kilometer dispersion simulation of a CO tracer for an inter-Andean urban valley. *Atmospheric Pollution Research*, 11(5), 928–945. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.005>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < DD-MMM-YYYY >), 10.24381/cds.adbb2d47
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hossain, F., Degu, A. M., Yigzaw, W., Burian, S., Niyogi, D., Shepherd, J. M., & Pielke, R. (2012). Climate feedback-based provisions for dam design, operations, and water management in the 21st century. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(8), 837–850. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000541](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000541)

- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(13), 2–9. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Jiménez, P. A., & Dudhia, J. (2012). Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the wrf model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 300–316. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-084.1>
- Jiménez-Esteve, B., Udina, M., Soler, M. R., Pepin, N., & Miró, J. R. (2018). Land use and topography influence in a complex terrain area: A high resolution mesoscale modelling study over the Eastern Pyrenees using the WRF model. *Atmospheric Research*, 202, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.012>
- Kayano, Mary T., Andreoli, R. V., & de Souza, R. A. F. (2020). Pacific and Atlantic multidecadal variability relations to the El Niño events and their effects on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 40(4), 2183–2200. <https://doi.org/10.1002/joc.6326>
- Kayano, Mary T., Capistrano, V. B., Andreoli, R. V., & de Souza, R. A. F. (2016). A further analysis of the tropical Atlantic SST modes and their relations to north-eastern Brazil rainfall during different phases of Atlantic Multidecadal Oscillation. *International Journal of Climatology*, 36(12), 4006–4018. <https://doi.org/10.1002/joc.4610>
- Kayano, Mary Toshie, Andreoli, R. V., & Souza, R. A. F. de. (2019). El Niño–Southern Oscillation related teleconnections over South America under distinct Atlantic Multidecadal Oscillation and Pacific Interdecadal Oscillation backgrounds: La Niña. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1359–1372. <https://doi.org/10.1002/joc.5886>
- Kelly, P. M., & Jones, P. D. (1996). Removal of the El Niño–Southern Oscillation signal from the gridded surface air temperature data set. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 101(14), 19013–19022. <https://doi.org/10.1029/96jd01173>
- Knight, J. R., Folland, C. K., & Scaife, A. A. (2006). Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(17), 2–5. <https://doi.org/10.1029/2006GL026242>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kuye, A., & Jagtap, S. S. (1992). Analysis of solar radiation data for Port Harcourt, Nigeria. *Solar Energy*, 49(2), 139–145. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(92\)90148-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(92)90148-4)
- Leal-Noriega, M. H., & Vargas-Jiménez, C. A. (2020). Sismicidad antropogénica en los alrededores de algunas represas en Colombia. *Boletín De Geología*, 42(3), 123–139. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020005>
- Lewis, S. C., & Karoly, D. J. (2013). Evaluation of historical diurnal temperature range trends in CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26(22), 9077–9089. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00032.1>
- Li, D. H. W., & Lam, J. C. (2001). Analysis of solar heat gain factors using sky clearness index and energy implications. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 555–571. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00082-0)
- Li, Y., Wu, L., Chen, X., & Zhou, W. (2019). Impacts of Three Gorges Dam on Regional Circulation: A Numerical Simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 7813–7824. <https://doi.org/10.1029/2018JD029970>
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C. J., Walthall, C., Daughtry, C., Morisette, J., Schaaf, C., & Strahler, A. (2002). Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 149–162. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00092-5)

- Loarie, S. R., Lobell, D. B., Asner, G. P., & Field, C. B. (2011). Land-Cover and surface water change drive large albedo increases in south america. *Earth Interactions*, 15(7), 1–16. <https://doi.org/10.1175/2010EI342.1>
- Lopera, L., oviedo, L., Rodriguez-Loaiza, D., & Peñuela, G. (2016). Aplicación de ensayos en discontinuo para la determinación de flujos de metano y dióxido de carbono en la degradación del material vegetal en el embalse Topocoro. *Ingenierías USBMed*, 7(2), 67
- Lott, J. N. (2004). The quality control of the integrated surface hourly database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5039–5045
- Lu, R., Dong, B., & Ding, H. (2006). Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 33(24), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2006GL027655>
- Mahmood, R., Pielke, R. A., 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., & Fall, S. (2014). Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 34(4), 929–953. <https://doi.org/10.1002/joc.3736>
- Mallard, M. S., Nolte, C. G., Spero, T. L., Bullock, O. R., Alapaty, K., Herwehe, J. A., Gula, J., & Bowden, J. H. (2015). Technical challenges and solutions in representing lakes when using WRF in downscaling applications. *Geoscientific Model Development*, 8(4), 1085–1096. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1085-2015>
- Mamani, R., & Hendrick, P. (2021). WRF model parameterization around the highland Titicaca Lake. *Earth and Space Science*. <https://doi.org/10.1029/2021ea001649>
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific Decadal Oscillation. <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>
- Massad, R. S., Lathière, J., Strada, S., Perrin, M., Personne, E., Stéfanon, M., Stella, P., Szopa, S., & De Noblet-Ducoudré, N. (2019). Reviews and syntheses: Influences of landscape structure and land uses on local to regional climate and air quality. *Biogeosciences*, 16(11), 2369–2408. <https://doi.org/10.5194/bg-16-2369-2019>
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(14), 16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97jd00237>
- Morales, J. S., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Durán-Quesada, A. M. (2021). The role of low-level circulation on water vapour transport to central and northern South America: Insights from a 2D Lagrangian approach. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2662–E2682. <https://doi.org/10.1002/joc.6873>
- Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V. (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Monthly Weather Review*, 137(3), 991–1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
- Nakanishi, M., & Niino, H. (2006). An improved Mellor-Yamada Level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119(2), 397–407. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- 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., & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(12), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Njuki, S. M., Mannaerts, C. M., & Su, Z. (2022). Influence of Planetary Boundary Layer (PBL) Parameterizations in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model on the Retrieval of Surface Meteorological Variables over the Kenyan Highlands. *Atmosphere*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/atmos13020169>

- NOAA National Centers for Environmental Information (2001): Global Surface Hourly. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Okogbue, E. C., Adedokun, J. A., & Holmgren, B. (2009). Hourly and daily clearness index and diffuse fraction at a tropical station, Ile-Ife, Nigeria. *International Journal of Climatology*, 29(8), 1035–1047. <https://doi.org/10.1002/joc.1849>
- Oleson, K. W., et al., 2010: Technical description of version 4 of the Community Land Model (CLM). NCAR Tech. Note NCAR/TN-478+STR. 266 pp.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., & Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2), 111–114. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90036-C](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90036-C)
- Pielke, R. A., & Avissar, R. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology*, 4(2–3), 133–155. <https://doi.org/10.1007/BF00132857>
- Pielke, Roger A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., Niyogi, D. D. S., & Running, S. W. (2002). The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), 1705–1719. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1027>
- Pielke, Roger A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P., & de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Pielke, S. (2001). Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics*, 39(2), 151–177. <https://doi.org/10.1029/1999RG000072>
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, 28(10), 201–222.
- Poveda, Germán, & Mesa, O. (2000). On the existence of Lloró. In *Geophysical Research letters* (Vol. 27, pp. 1675–1678).
- Poveda, Germán, & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
- Poveda, Germán, Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda, Germán, Mesa, O. J., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear Forecasting of River Flows in Colombia Based Upon ENSO and Its Associated Economic Value for Hydropower Generation. January, 351–371. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15
- Poveda, Germán, Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., Van Lipzig, N. P. M., & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>

- Reindl, D. T., Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45(1), 1–7. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90060-P](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90060-P)
- Ruiz-Vasquez, M., Chica, E., Rodriguez, D., & Peñuela, G. (2019). Calibration of two mathematical models at laboratory scale for predicting the generation of methane and carbon dioxide at the entrance point of the Chucurí river to the Topocoro Reservoir, Colombia. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 21(1), 11-22. <https://doi.org/10.25100/iyc.v21i1.7651>
- Saavedra, M., Junquas, C., Espinoza, J. C., & Silva, Y. (2020). Impacts of topography and land use changes on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. *Atmospheric Research*, 234(April 2019), 104711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711>
- Salazar, A., Baldi, G., Hirota, M., Syktus, J., & McAlpine, C. (2015). Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. *Global and Planetary Change*, 128, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.009>
- Santanello, J. A., Dirmeyer, P. A., Ferguson, C. R., Findell, K. L., Tawfik, A. B., Berg, A., Ek, M., Gentine, P., Guillod, B. P., Van Heerwaarden, C., Roundy, J., & Wulfmeyer, V. (2018). Land-atmosphere interactions the LoCo perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(6), 1253–1272. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0001.1>
- Schaaf, C., Wang, Z. (2015). *MCD43A3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global - 500m V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A3.006>
- Shin, H. H., & Hong, S. Y. (2015). Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Monthly Weather Review*, 143(1), 250–271. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>
- Shuttleworth, W. J. (2012). Terrestrial Hydrometeorology. In *Terrestrial Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1002/9781119951933>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2015). Precipitation over Northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/634720>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Song, Z., Liang, S., Feng, L., He, T., Song, X., & Zhang, L. (2017). Temperature changes in Three Gorges Reservoir Area and linkage with Three Gorges Project Zhen. *Nature*, 175(4449), 238. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., & Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12), 5095–5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
- Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. 2015. Atlas potencial hidroenergético de Colombia.
- Wang, C. (2004). ENSO, Atlantic Climate Variability, and the Walker and Hadley Circulations. 173–202. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8_7
- Wang, S., Huang, J., He, Y., & Guan, Y. (2014). Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry-Wet Changes. *Scientific Reports*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep06651>
- Wang, Z., Schaaf, C. B., Sun, Q., Kim, J. H., Erb, A. M., Gao, F., Román, M. O., Yang, Y., Petroy, S., Taylor, J. R., Masek, J. G., Morissette, J. T., Zhang, X., & Papuga, S. A. (2017). Monitoring land surface albedo and vegetation dynamics using high spatial and temporal resolution synthetic time series from Landsat and the MODIS

BRDF/NBAR/albedo product. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 59, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.03.008>

Warner, T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction*. In Society.

Winchester, J., Mahmood, R., Rodgers, W., Hossain, F., Rappin, E., Durkee, J., & Chronis, T. (2017). A model-based assessment of potential impacts of man-made reservoirs on precipitation. *Earth Interactions*, 21(9). <https://doi.org/10.1175/EI-D-16-0016.1>

Woldemichael, A. T., Hossain, F., & Pielke, R. (2014). Impacts of postdam land use/land cover changes on modification of extreme precipitation in contrasting hydroclimate and terrain features. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2), 777–800. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-085.1>

Woldemichael, A. T., Hossain, F., Pielke, R., & Beltrán-Przekurat, A. (2012). Understanding the impact of dam-triggered land use/land cover change on the modification of extreme precipitation. *Water Resources Research*, 48(9). <https://doi.org/10.1029/2011WR011684>

Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2014). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77(1), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>