



INCORPORACIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL DE HUMEDAD DE SUELO EN MODELOS HIDROLÓGICOS PARA PRONÓSTICO DE INUNDACIONES EN CUENCAS DE URUGUAY

TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA – MECÁNICA DE LOS FLUIDOS APLICADA

Abril de 2021

SANTIAGO NARBONDO

TUTORES:

CHRISTIAN CHRETIES

ANGELA GORGOGNONE

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores, Christian Chreties y Angela Gorgoglione, por toda la disponibilidad mostrada y el constante aporte para enriquecer este trabajo. También por la buena predisposición y el excelente clima en el cual siempre desarrollamos las actividades referentes a la tesis. En este punto extendiendo el agradecimiento a Magdalena Crisci, quien estuvo al inicio y en gran parte del trabajo siendo un pilar fundamental en la realización del mismo y en mi formación dentro del grupo de trabajo del IMFIA.

Por otra parte, agradezco a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por otorgarme una beca de Maestría, con la cual tuve la posibilidad de realizar el trabajo y avanzar con el conocimiento en la temática.

Quisiera agradecer también a mis compañeros del IMFIA, por estar presentes a lo largo de todo el trabajo, siendo siempre un apoyo tanto en lo técnico como en lo anímico. En particular me gustaría agradecer a Federico por prestarse a escuchar y ser siempre un respaldo y en especial a Michelle por acompañarme desde hace años en el proceso académico y ser un gran apoyo.

Finalmente me gustaría agradecer a mis padres, siendo que este logro es suyo, por ser la base de todo lo que haga y a Cami y Coti, por ser mis personas en el mundo.

Resumen

Las inundaciones fluviales han sido la principal catástrofe natural en el Uruguay, dejando como consecuencias grandes pérdidas a lo largo de la historia. Estudios realizados en el país han demostrado que las medidas de mitigación más efectivas han sido un correcto ordenamiento territorial y una buena previsión de la inundación. Es así que los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI) juegan un rol preponderante en una buena gestión del evento.

Dentro de los SATIs, la modelación hidrológica juega un papel protagónico, siendo una de las claves para disminuir la incertidumbre. Es así que cuantificar correctamente las diferentes variables del sistema es de suma importancia. Para la generación de escorrentía a partir de precipitación en cualquier modelo es fundamental conocer o determinar acertadamente la mayor cantidad de componentes del ciclo hidrológico que sea posible. Una de ellas es la humedad de suelo. Esta variable, de gran peso en los procesos del ciclo es de compleja determinación a gran escala espacial con los instrumentos tradicionales de medición *in situ* debido a que toman medidas puntuales. Esto plantea, la necesidad de utilizar otras técnicas, como, por ejemplo, el sensoramiento remoto.

En las últimas décadas el desarrollo tecnológico ha permitido cuantificar de manera correcta la humedad de suelo en los primeros centímetros a través de sensoramiento remoto con sensores de microondas. Estos sensores, a bordo de satélites, son capaces de captar la diferencia en la longitud de onda reflejada en una superficie y, a partir del procesamiento de estos datos, inferir el contenido de humedad del suelo. Esto, sumado al desarrollo de diferentes modelos hidrológicos, ha generado diversos productos de humedad de suelo para diferentes profundidades. En particular, en los últimos años, se destacan las misiones SMAP y SMOS las cuales fueron específicamente creadas para la medición de humedad de suelo en superficie. A su vez, los productos satelitales de humedad del suelo de ASCAT son los que tienen la serie de datos más extensa de los que aún se encuentran activos.

En este contexto es que se realiza este trabajo de tesis de maestría, en el cual se incorporó humedad de suelo satelital en el SATI de la ciudad de Durazno (Uruguay), para evaluar si esta incorporación redundaba en mejoras en el pronóstico de niveles del río Yi en Durazno. Para esto, se estudiaron diferentes formulaciones para incorporar la humedad de suelo en modelos hidrológicos y se trabajó con distintos modelos (uno de eventos y dos continuos). Finalmente, se utilizaron dos productos satelitales en tres modelos hidrológicos diferentes y se evaluaron los resultados de dicha incorporación en una serie de 14 eventos extremos para el período 2013-2020 en la cuenca del río Yi. Por otro lado, también se evaluó un tercer producto satelital mediante la comparación con medidas *in situ* de la humedad del suelo. Los productos utilizados corresponden a las misiones SMOS, ASCAT y SMAP.

A partir del trabajo realizado, se concluye que el SATI Durazno puede ser beneficiado del aporte de la incorporación de humedad de suelo satelital en la modelación hidrológica, dependiendo de qué modelo se utilice y qué producto se incorpore. Estas mejoras fueron cuantificadas y los resultados de las diferentes propuestas comparados entre sí y con el



modelo actual en una serie de eventos ocurridos en la última década de manera de tener resultados robustos. Esto plantea la posibilidad de incorporar humedad de suelo satelital en el SATI Durazno y a su vez abre líneas de investigación en la temática a futuro.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	BACKGROUND: HUMEDAD DE SUELO COMO COMPONENTE DEL CICLO HIDROLÓGICO	1
1.2	ANTECEDENTES: SATI DURAZNO.....	2
1.3	MOTIVACIÓN.....	6
1.4	OBJETIVOS.....	6
1.5	ESTRUCTURA DE LA TESIS	7
2	MARCO TEÓRICO	9
2.1	CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	9
2.2	ESTADO DEL ARTE.....	21
3	MATERIALES Y METODOS	27
3.1	ÁREA DE ESTUDIO	27
3.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	28
3.3	COMPARACIÓN DE HUMEDAD DE SUELO MEDIDA <i>IN SITU</i> Y SATELITAL	39
3.4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	40
3.5	INCORPORACIÓN DE DATOS DE HUMEDAD DE SUELO MEDIDA CON SATÉLITE EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	50
3.6	RESUMEN DE MODELOS Y PROPUESTAS DE INCORPORACIÓN DE HUMEDAD	53
3.7	MODELO HIDRODINÁMICO.....	55
3.8	EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MODELOS	56
3.9	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE INCORPORAR HUMEDAD DE SUELO EN SATI-DURAZNO	59
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1	COMPARACIÓN DE HUMEDAD DE SUELO MEDIDA <i>IN SITU</i> Y SATELITAL	64
4.2	MODELACIÓN DE EVENTOS	71
4.3	MODELACIÓN CONTINUA.....	72
4.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	80
4.5	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO.....	100
4.6	DISCUSIÓN	102
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	105
5.1	RESUMEN DE LOS RESULTADOS PRINCIPALES.....	105
5.2	LÍNEAS FUTURAS.....	108
6	BIBLIOGRAFÍA.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema de ciclo hidrológico (extraído de Shaxson and Barber 2008)	2
Figura 1-2: Esquema de funcionamiento del SATI (extraído de Silveira et al. 2017).	4
Figura 2-1: Curva de humedad característica (Dingman 2002).....	11
Figura 2-2: Horizontes pedológicos del suelo.	13
Figura 2-3: Horizontes hidrológicos del suelo (Dingman 2002).....	14
Figura 2-4: Representación de satélite con sensor pasivo (extraído de NASA.gov).....	17
Figura 2-5: Representación de satélite con sensor activo (extraído de NASA.gov).....	18
Figura 3-1: Ubicación de la ciudad de Durazno en la cuenca del río Yí con punto de cierre en la desembocadura en Barra de Porongos.....	27
Figura 3-2: Representación del satélite SMAP (extraído de NASA) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).....	29
Figura 3-3: Representación del satélite SMOS (extraído de ESA) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).....	29
Figura 3-4: Representación del satélite MetOp (ASCAT) (extraído de Eumetsat) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).	30
Figura 3-5: Puntos de monitoreo en campo.	32
Figura 3-6: Sensores TDR instalados en la cuenca del río Yí.....	32
Figura 3-7: Resumen en formato box-plot de los datos de los datos medidos <i>in situ</i> a diferentes profundidades. Izquierda Sarandí Grande, derecha La Estanzuela.	33
Figura 3-8: Estaciones telemétricas y pluviométricas presentes en la cuenca (Silveira et al. 2017).....	34
Figura 3-9: Serie de precipitación media en la cuenca. Período 2013-2014.....	34
Figura 3-10: Estaciones limnométricas.	35
Figura 3-11: Serie de nivel medida en la estación telemétrica Durazno. Período 2017-2020.	35
Figura 3-12: Ubicación de la estación Meteorológica INIA Treinta y Tres	36
Figura 3-13: Serie de evapotranspiración Penman-Monteith correspondiente a la estación INIA 33. Período 2017-2020.	37
Figura 3-14: Grupos hidrológicos según la clasificación del NRCS presentes en la cuenca (Silveira et al. 2014).....	38
Figura 3-15: Relación entre precipitación, precipitación efectiva y Número de Curva (USDA 2010).....	41
Figura 3-16: Esquema conceptual del modelo GR4J (Perrin et al. 2003).....	43
Figura 3-17: Esquema del modelo conceptual de Geetha et al. 2008.	45
Figura 3-18: Subcuencas de aporte al río Yí (Silveira et al. 2017).	55
Figura 3-19: Mancha de inundación correspondiente a la cota 15 respecto al cero local.....	61
Figura 3-20: Manzanas afectadas por una inundación correspondiente a la cota 15 respecto al cero local.	62
Figura 3-21: Costo por inundación asociado a cota respecto al cero local. Línea continua curva calculada con datos, línea punteada ajuste a los datos según Eq. 43.....	63

Figura 4-1: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en Sarandí Grande.	65
Figura 4-2: Cuantil-Cuantil <i>in situ</i> vs satelital para Sarandí Grande.	65
Figura 4-3: Box-plot de humedad de suelo <i>in situ</i> y satelital para Sarandi Grande.....	66
Figura 4-4: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en Cerro Colorado.	67
Figura 4-5: Cuantil-Cuantil <i>in situ</i> vs satelital para Cerro Colorado.....	67
Figura 4-6: Box-plot de humedad de suelo <i>in situ</i> y satelital para Cerro Colorado.....	68
Figura 4-7: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en La Estanzuela.	69
Figura 4-8: Cuantil-Cuantil <i>in situ</i> vs satelital para La Estanzuela.....	69
Figura 4-9: Box-plot de humedad de suelo <i>in situ</i> y satelital para La Estanzuela.	70
Figura 4-10: Eventos simulados en base a la formulación del NRCS con humedad de suelo correspondiente a ASCAT.	71
Figura 4-11: Eventos simulados en base a la formulación del NRCS con humedad de suelo correspondiente a SMOS.....	72
Figura 4-12: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha.	73
Figura 4-13: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.....	74
Figura 4-14: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.....	74
Figura 4-15: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT según la simplificación de la ecuación de Richards.....	75
Figura 4-16: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS según la simplificación de la ecuación de Richards.	76
Figura 4-17: Resultados de la re-calibración del modelo GR4J.	77
Figura 4-18: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.....	78
Figura 4-19: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.....	78
Figura 4-20: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS según la simplificación de la ecuación de Richards.	79
Figura 4-21: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT según la simplificación de la ecuación de Richards.....	80
Figura 4-22: Indicadores para el nivel pico.	81
Figura 4-23: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.	83
Figura 4-24: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.	84
Figura 4-25: Indicadores para tiempo al pico.....	85
Figura 4-26: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.	86
Figura 4-27: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.	87
Figura 4-28: t-SNE para el nivel pico.....	88

Figura 4-29: t-SNE para el tiempo pico.....	89
Figura 4-30: t-SNE para el nivel pico.....	90
Figura 4-31: t-SNE para el tiempo pico.....	90
Figura 4-32: Clúster jerárquico para el nivel pico.....	92
Figura 4-33: Clúster jerárquico para el tiempo pico.....	93
Figura 4-34: t-SNE para separación de eventos por estación para el nivel pico.....	94
Figura 4-35: t-SNE para separación de eventos por estación para el tiempo pico.....	94
Figura 4-36: t-SNE para separación de eventos por estación evaluando evento a evento..	95
Figura 4-37: t-SNE para eventos correspondientes a verano.....	95
Figura 4-38: t-SNE para eventos correspondientes a invierno.....	96
Figura 4-39: Clúster jerárquico para eventos de verano.....	96
Figura 4-40: Clúster jerárquico para eventos de invierno.....	97
Figura 4-41: Indicadores correspondientes a verano.....	98
Figura 4-42: Indicadores correspondientes a invierno.....	99
Figura 4-43: Ahorro por mejoras.....	100
Figura 4-44: Ahorro por mejoras para el tiempo pico.....	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Niveles de alerta en Durazno.....	5
Tabla 2-1: Principales métodos de medición de humedad de suelo (adaptado de Liang & Wang 2020).....	15
Tabla 2-2: Principales misiones que miden humedad de suelo (Adaptado de Hong 2016)..	21
Tabla 3-1: Resumen de productos satelitales utilizados.....	31
Tabla 3-2: Fechas y características de los eventos.....	39
Tabla 3-3: Niveles de afectación de la ciudad de Durazno respecto al cero local.....	39
Tabla 3-4: Parámetros del modelo de GR4J.....	44
Tabla 3-5: Parámetros del modelo de Geetha et al. (2008).....	49
Tabla 3-6: Resumen de modelos y propuestas de incorporación de humedad de suelo.....	54
Tabla 3-7: Tiempo de concentración y Numero de Curva calibrados.....	56
Tabla 3-8: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning calibrados.....	56
Tabla 4-1: Indicadores comparación medida satelital vs <i>in situ</i> correspondiente a Sarandí del Yi.....	66
Tabla 4-2: Indicadores comparación medida satelital vs <i>in situ</i> correspondiente a Cerro Colorado.....	68
Tabla 4-3: Indicadores comparación medida satelital vs <i>in situ</i> correspondiente a La Estanzuela.....	70
Tabla 4-4: Indicadores para la re-calibración.....	73
Tabla 4-5: Indicadores correspondiente a Geetha re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.....	75
Tabla 4-6: Indicadores para correspondiente a Geetha re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con simplificación de Richards.....	76
Tabla 4-7: Indicadores para la re-calibración.....	77
Tabla 4-8: Indicadores para correspondiente a GR4J re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.....	79
Tabla 4-9: Indicadores para correspondiente a GR4J re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.....	80
Tabla 4-10: Indicadores para el nivel pico.....	82
Tabla 4-11: Indicadores para el tiempo pico.....	86
Tabla 4-12: Ordenamiento de los modelos en función de los valores registrados.....	91
Tabla 4-13: Ratio beneficio-costo para el nivel pico.....	101
Tabla 4-14: Ratio beneficio-costo para el tiempo pico.....	101

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales constituyen la emergencia de origen natural más frecuente y de mayor impacto para el Uruguay (SINAE 2019). Los estudios de diagnóstico y evaluación de soluciones realizados en el País coinciden en términos generales, priman medidas no estructurales sobre estructurales, como Sistemas de Alerta Temprana e instrumentación de políticas de ordenamiento territorial (SINAE 2019). En este contexto es que se han realizado múltiples avances en la implementación de Sistemas de Alerta Temprana para diferentes ciudades del Uruguay, siendo los mismos un insumo importante en la gestión de emergencias de origen naturales en el País.

Dentro de los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI), la modelación hidrológica e hidrodinámica son piezas clave. En particular, en la modelación hidrológica, una buena determinación de la *humedad de suelo* (HS) es fundamental para la representación del ciclo hidrológico. Es por esto que, además de tener una correcta cuantificación de los forzantes de un modelo hidrológico, es de interés conocer valores medidos de las variables, como la HS, que son representadas en mayor o menor medida por los modelos para poder ajustar la modelación al sistema real.

En el caso de la HS, es de particular importancia determinar el aporte de tener datos de esta variable a escala de cuenca. Debido a la falta y a la dificultad de generar redes de monitoreo, la incorporación de datos medidos con satélite de HS resulta de gran valor en la modelación hidrológica. Gracias al gran desarrollo de las técnicas de medición de HS con satélite en los últimos años es que se presenta la posibilidad de la utilización de estos datos en modelos hidrológicos, en particular en modelos aplicados para SATI. En el presente trabajo de tesis de maestría, se busca incorporar estos datos en la modelación hidrológica SATI desarrollada en Uruguay, en particular en el SATI implementado en la ciudad de Durazno, el cual fue calibrado y validado anteriormente.

1.1 Background: humedad de suelo como componente del ciclo hidrológico

Entendiendo el balance hidrológico como un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua a nivel de cuenca (Figura 1-1), la HS resulta de gran interés en el mismo, a pesar de no ser cuantitativamente el mayor aporte en el balance. La mayor cantidad de agua en el sistema se encuentra en los océanos siendo de alrededor del 96% (Dingman 2002). La cantidad de agua presente en el suelo representa el 0.001% del total que compone el ciclo hidrológico, esto es aproximadamente un 0.05% del agua dulce existente (Dingman 2002). Sin embargo, esta pieza del ciclo resulta llevar un rol preponderante y ser de particular importancia debido a que regula los flujos de energía y afecta tanto la escorrentía superficial como la percolación y el flujo en capas subterráneas.

En líneas generales, la HS refiere a la cantidad de agua que se encuentra almacenada en los espacios generados entre las partículas de suelo no saturado denominados poros. La

capacidad de determinar la distribución espacial y temporal de la HS se presenta como una pieza clave para explicar la Tierra como un sistema integrado, en particular para el ciclo hidrológico. Esto hace que, tanto para procesos hidrológicos como biológicos y químicos, el conocimiento de la HS es fundamental, sobre todo si se tiene en cuenta el intercambio de agua y energía entre la superficie y la atmósfera a través de la evapotranspiración de las plantas (Liang & Wang, 2020).

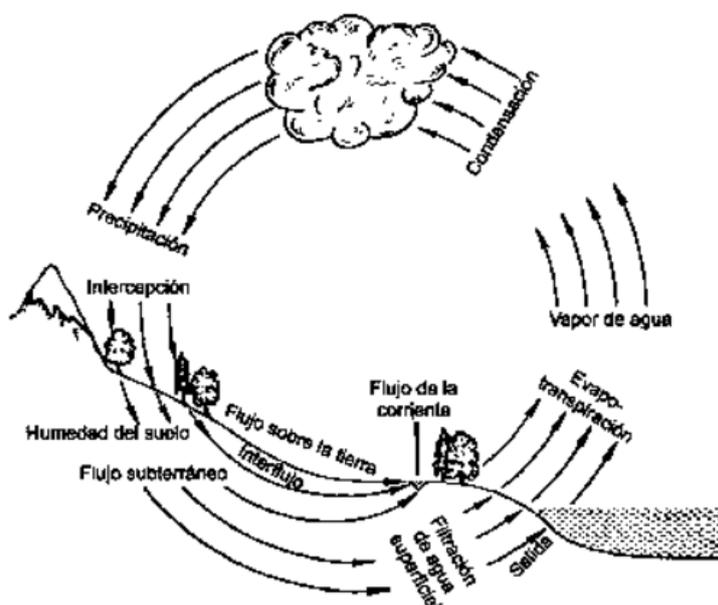


Figura 1-1: Esquema de ciclo hidrológico (extraído de Shaxson and Barber 2008) .

Existen diversas formas de cuantificar y medir la HS en suelos con cobertura natural pero la determinación de la misma en el sistema puede ser compleja desde el punto de vista espacial, ya que las técnicas tradicionales de medición *in situ* suelen ser puntuales. Esto hace que se necesiten formas alternativas de medición como pueden ser las redes de estaciones (implican costos significativos) o el sensoramiento remoto.

En lo que refiere a la generación de escorrentía y, en particular, en la modelación hidrológica, la correcta representación de la HS es de vital importancia sobre todo teniendo en cuenta que es una de las variables más importante a la hora de determinar la capacidad de infiltración de los suelos. Esto hace que una magra cuantificación de la HS puede redundar en una mala representación del sistema en su conjunto.

1.2 Antecedentes: SATI Durazno

En esta sección se presenta el principal antecedente de este trabajo de tesis, esto en orden de clarificar el punto de partida y los principales desafíos presentados para la aplicación práctica de los conceptos introducidos en el capítulo siguiente, a su vez se mencionan los principales avances y estado de los SATI en Uruguay. En líneas generales, los Sistemas de

Alerta Temprana de Inundaciones (SATI) son una herramienta fundamental para abordar el problema de las inundaciones fluviales en el mundo.

El Uruguay cuenta con sistemas de alerta temprana de inundaciones para diferentes ciudades implementados, calibrados y validados por el IMFIA (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental), como es el caso de Artigas y Durazno (Silveira, et al., 2017), en estas dos ciudades en la actualidad se encuentra operativo también un SATI que utiliza el sistema Delft-FEWS (Werner et al. 2013). A su vez según lo reportado en la ficha técnica 73 del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC 2019), además de estos dos SATI, el país cuenta con otros y avances en este sentido. Un caso es el sistema de pronósticos del Embalse de Salto Grande operado por la Comisión Técnica Mixta (CTM), que utiliza el sistema Delft-FEWS con el cual se difunde alertas a las ciudades ubicadas aguas abajo de la represa. Por otro lado, UTE (Usinas y Transmisiones Eléctricas del Estado), opera el sistema de alerta asociado a las represas del río Negro. A su vez, se cuenta con un modelo hidrológico-hidrodinámico acoplado para la cuenca del río Olimar implementado con el fin de generar un SATI en la ciudad de Treinta y Tres. Un caso similar es el de la ciudad de Río Branco, que cuenta con un modelo hidrológico-hidrodinámico acoplado para la cuenca del río Yaguarón. A su vez, en el mencionado reporte, se informa que está en desarrollo un SATI para las ciudades de la cuenca del río Santa Lucia, en particular para San José, Santa Lucia, Florida y Canelones. A continuación, se presenta el caso del Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones para la ciudad de Durazno, principal antecedente de este trabajo de tesis.

En primera instancia, el desarrollo del SATI Durazno y su puesta en operación en el año 2011 fue resultado de un proyecto piloto de la Red Iberoamericana para el Monitoreo y Pronóstico de Fenómenos Hidrometeorológicos (PROHIMET) con financiación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Luego se continuó trabajando en el mismo, realizándole diversas mejoras, lo que se resume en el informe final del proyecto ANII SATI-UY: Sistema de Alerta Temprana para previsión y gestión de Inundaciones (Silveira, et al. 2017).

El sistema, como se esquematiza en Figura 1-2, se compone de tres bloques: uno de adquisición de datos de entrada, otro de modelación, donde se ejecuta el modelo hidrológico-hidrodinámico, y un tercero donde se generan y publican los datos de salida. La descripción del Sistema presentada a continuación se limita principalmente a los primeros dos bloques, ya que son los inherentes al presente trabajo de tesis. Esta descripción se basa en lo detallado en publicaciones realizadas sobre el SATI Durazno (Silveira et al. 2012, 2016, 2017; Chreties et al. 2012, 2016).

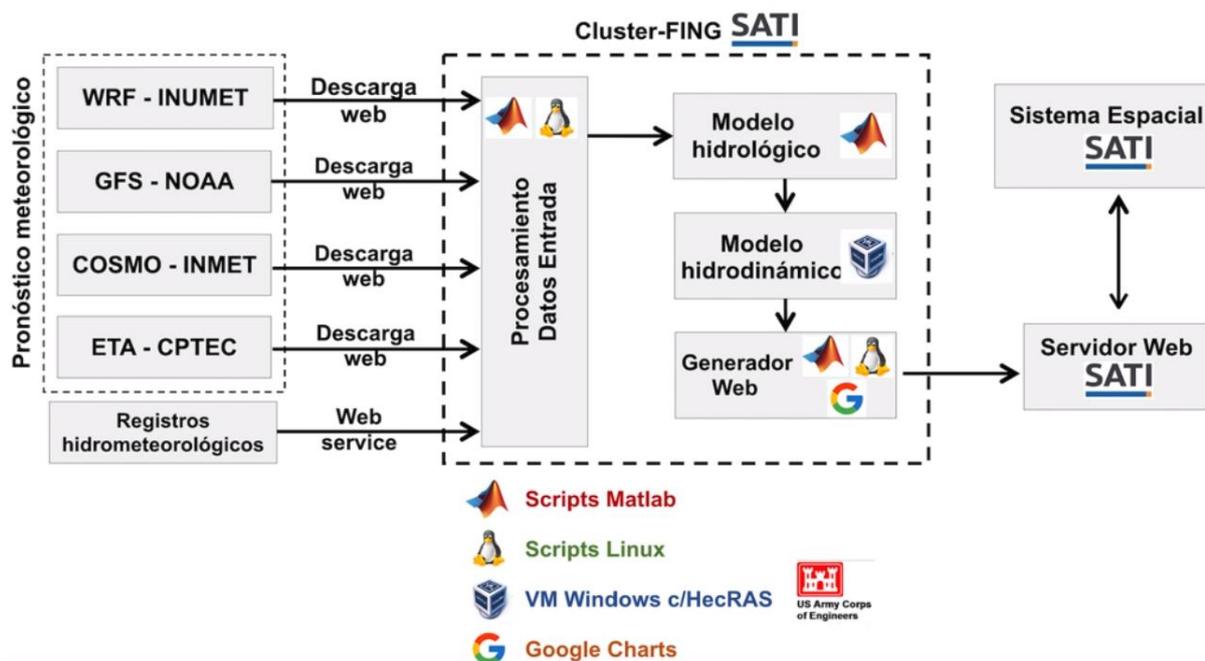


Figura 1-2: Esquema de funcionamiento del SATI (extraído de Silveira et al. 2017).

El SATI Durazno utiliza información de pronósticos meteorológicos de múltiples fuentes (COSMO INMET -Instituto Nacional de Meteorología de Brasil-, ETA CPTEC -Centro de Investigaciones del Tiempo y el Clima del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil-, GFS NOAA escalado a nivel de cuenca por el IMFIA y WRF INUMET – Instituto Nacional de Meteorología), así como de precipitación registrada en estaciones automáticas telemétricas. Los datos de las diferentes fuentes de pronóstico de precipitación son cargados en promedio cada 6 horas por el SATI, en forma automática, disponiéndose en cada momento del pronóstico más reciente disponible publicado en la web.

En el esquema actual, una vez que un evento de precipitación sobre la cuenca ha comenzado, se utilizan complementariamente a los datos de pronóstico meteorológico, registros de precipitación de la red telemétrica, que cuenta con 8 estaciones de registro horario de precipitación que son adquiridos por el SATI en tiempo real, de las cuales 4 están en funcionamiento actualmente. Los datos de los pronósticos meteorológicos más los de la información en tiempo real permiten la elaboración de hietogramas del evento (uno por fuente pronostico). Esto se realiza acorde a la siguiente lógica: mientras no haya comenzado el evento real, el hietograma es íntegramente formado por precipitación pronosticada; una vez iniciada la precipitación en la cuenca, dichos hietogramas estarán compuestos en parte por la precipitación registrada y en parte por la precipitación pronosticada; una vez finalizado el evento de lluvia, los hietogramas convergerán a un único registrado.

Para cada paso temporal, se tienen tantos limnigramas pronosticados como hietogramas construidos según la etapa del evento en que se encuentre. En todos los casos, el evento de precipitación se define cada día considerando como máximo 15 días de precipitación

anteriores al día en cuestión (siempre que no haya más de 5 días consecutivos sin lluvia y 7 días consecutivos con precipitación acumulada menor a 10 mm) y 5 días posteriores con datos de pronóstico. A su vez, se leen los datos de nivel del río Yí registrados por las estaciones telemétricas de UTE.

Luego de tener los forzantes de precipitación, el siguiente paso consiste en ejecutar un modelo hidrológico-hidrodinámico de la cuenca del río Yí, implementado y calibrado en el marco del proyecto PROHIMET considerando las mayores crecidas históricas registradas.

Para la modelación hidrológica, la cuenca del río Yí con cierre en Paso del Bote, de 12.670 km², fue subdividida en 16 subcuencas. En cada una de ellas, a partir de los hietogramas de precipitación generados anteriormente, se simulan los procesos de infiltración y escurrimiento a través del método propuesto por el Natural Resources Conservation Service (NRCS, USDA 2010) de Estados Unidos. Como resultado, se obtienen los hidrogramas de aporte de cada subcuenca.

Acoplado a ello, se ejecuta un modelo hidrodinámico en una dimensión (HEC-RAS; USACE 2010), implementado en base a información topográfica relevada a lo largo del río Yí. Dicho modelo resuelve las ecuaciones 1D de Saint-Venant a partir de un esquema numérico de diferencias finitas a lo largo del río y su planicie de inundación, recibiendo los hidrogramas de las subcuencas que resultan de la modelación hidrológica como condición de borde o como caudal lateral de aporte según corresponda. Como resultado, se obtiene la evolución del nivel del agua en el río en cada paso de tiempo (horario). Los hietogramas de precipitación correspondientes a los diferentes pronósticos son utilizados en forma independiente, obteniendo diferentes pronósticos de la evolución del nivel del río.

Los niveles de alerta son definidos a partir de la infraestructura afectada por la inundación correspondiente a ese nivel y por la afectación de viviendas, y surge a partir del análisis de la exposición y vulnerabilidad de los distintos componentes del sistema espacial correspondiente en la ciudad de Durazno. Principalmente, los rangos se definen en función de las cotas que generan cambios significativos en la operativa de respuesta frente al evento de inundación, en Tabla 1-1 se presentan los niveles de alerta.

Tabla 1-1: Niveles de alerta en Durazno.

Rango nivel máximo	Nivel de Alerta	Alerta
Menor a 6.83 m	Verde	Sin alerta
Entre 6.83 m y 8.50 m	Amarilla	Aviso
Entre 8.50 m y 11.14 m	Naranja	Seguridad
Entre 11.14 m y 14.85 m	Roja	Afectación sensible
Mayor a 14.85 m	Morada	Afectación extrema

Niveles referidos al cero local (regla) del Puente Nuevo sobre la Ruta 5.

El nivel de alerta varió en los diferentes trabajos antecedentes entre 8.50 y 9.60, para el presente trabajo se tomó 8.50

Desde la puesta en funcionamiento del SATI Durazno, se realiza una actualización periódica de la performance de los modelos frente a los eventos de crecida, esto hace que se tenga un conocimiento de la robustez del SATI, conociendo a su vez en que eventos se tienen mejores o peores desempeños (Chreties et al. 2016).

1.3 Motivación

Por un lado, se identifica una motivación inherente a conocer una variable de singular importancia en el ciclo hidrológico como es la HS. Esto implica como determinarla y para esto es de particular interés ahondar en la forma y la calidad de las medidas satelitales de HS, las técnicas de medición y el comportamiento de los diferentes productos frente a medidas puntuales realizadas in situ en Uruguay.

A su vez, desde la puesta en operación del Sistema de Alerta de Durazno en el año 2011, el equipo del IMFIA, en diálogo con el CECOED-Durazno, ha realizado un seguimiento y análisis de todos los eventos extremos ocurridos evaluando la performance del Sistema de Alerta. Si bien la evaluación general del sistema de alerta de Durazno es satisfactoria, se siguen identificando muchas situaciones donde la relación precipitación-escorrentía no se modela correctamente, generando en algún caso diferencias cercanas a los 2 metros en el nivel pico (Chreties et al. 2016). Se ha concluido que esta situación responde fundamentalmente a que:

- i) La condición de humedad antecedente al evento, actualmente se representa en forma indirecta, a partir de la precipitación de los 5 días previos al evento independientemente del tipo y uso de suelo de cada zona de la cuenca. Este punto es altamente sensible en el modelo hidrológico de eventos extremos.
- ii) La evolución de HS de la cuenca durante el evento no se está midiendo, por tanto, no se dispone de ningún tipo de ajuste/corrección de la principal variable de estado del modelo hidrológico de simulación continua.

A la luz de las experiencias regionales e internacionales en el campo de sensoramiento remoto, en este trabajo se propone analizar la información actualmente disponible sobre estimaciones satelitales de HS y evaluar la factibilidad de su implementación en forma distribuida en la cuenca del río Yí para ser utilizada en el Sistema de Alerta Temprana para la ciudad de Durazno.

1.4 Objetivos

En base a la motivación presentada en la sección anterior, se plantea el objetivo general de este trabajo de tesis de maestría que es avanzar en el conocimiento de los productos satelitales de humedad de suelo disponibles para su utilización en modelos hidrológicos de pronóstico de crecidas.

De esta forma, el objetivo específico principal de esta tesis de maestría es analizar e implementar metodologías para mejorar el rendimiento de los SATI en base a la utilización de

datos satelitales de HS. En particular, se busca incorporar HS satelital en el SATI Durazno, con el fin de mejorar su performance, reduciendo los errores entre la salida del modelo y los valores posteriormente observados, para producir pronósticos mejorados.

Como objetivo secundario, se plantea evaluar la calidad de las medidas de HS satelital mediante la comparación de las mismas con medidas *in situ* realizadas en distintos puntos de Uruguay.

En este marco, el trabajo busca responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué información satelital de estimación de humedad de suelo se dispone para cuencas en Uruguay?
- ¿Qué tan precisa es la medida del satélite comparado con medidas *in situ*?
- ¿Cuál es la performance del modelo actual de predicción de crecidas en la ciudad de Durazno, actualizado con los eventos extremos hasta la fecha, luego de su puesta en operación?
- ¿Los resultados obtenidos con el modelo actual de predicción de crecidas en Durazno pueden enriquecerse con la incorporación de productos satelitales de HS?
- En caso positivo, ¿Se puede cuantificar esta mejora en el modelo?
- ¿Cómo varían los resultados si se utiliza un modelo hidrológico continuo en lugar del modelo de eventos actualmente implementado?
- ¿Es posible identificar y cuantificar una mejora en la performance de los modelos continuos al agregar productos satelitales de HS?
- Si se identifica una mejora en alguno de los puntos anteriores, ¿Vale la pena el esfuerzo de la implementación de la misma en el modelo actual?

1.5 Estructura de la tesis

Este documento consta de 5 capítulos y se articula como se detalla a continuación.

El presente capítulo introductorio (capítulo 1) describe los principales componentes asociados al tema de estudio, luego, se muestra el antecedente central del trabajo y finalmente se describe la motivación y los objetivos del mismo.

El segundo capítulo, presenta el estado del arte del tema de tesis, detallando el marco teórico desde los conceptos básicos de HS hasta los últimos avances en cuanto a la estimación con satélite de la misma y su aplicación en la modelación hidrológica.

El capítulo 3 presenta los materiales y métodos del trabajo, donde se describe la información disponible y utilizada y la metodología empleada para abordar la aplicación del tema del trabajo de tesis.

En el capítulo 4, se presentan los resultados, en primer lugar, las comparaciones de productos de HS medidas *in situ* y satelital y luego los resultados propios de la modelación hidrológica y

la posterior incorporación de HS, presentando, en el final del capítulo, la discusión correspondiente a la comparación de resultados y un análisis costo-beneficio.

Finalmente, en el capítulo 5, se desarrollan las conclusiones y se identifican las posibles líneas futuras a abordar relacionadas al presente trabajo.

2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se sintetizan los conceptos aplicados en el trabajo de tesis, además de profundizar en ciertos aspectos teóricos relevantes para la cabal comprensión del problema abordado. El capítulo se articula en dos subcapítulos, los cuales se separan en Conceptos teóricos básicos (sección 2.1) y Estado del arte (sección 2.2). En primer lugar, se pone foco en la HS y los principales conceptos y leyes físicas que rigen a esta variable (sección 2.1.1.), luego se detallan las formas de medirla (sección 2.1.2.) que incluyen las técnicas *in situ* (sección 2.1.2.1) y de sensoramiento remoto, en particular satelital (sección 2.1.2.2). Finalmente, se presentan las relaciones entre la modelación hidrológica y la HS, para analizar las diferentes formas de incorporar dicha variable en la modelación (secciones 2.2.1 a 2.2.3), tanto de eventos como continua, con especial interés en la simulación de crecidas.

2.1 Conceptos teóricos básicos

2.1.1 Humedad de suelo

En líneas generales, la HS refiere a la cantidad de agua que se encuentra almacenada en los espacios generados entre las partículas de suelo no saturado denominados poros. La capacidad de determinar la distribución espacial y temporal de la HS se presenta como una pieza clave para explicar la Tierra como un sistema integrado, en particular para el ciclo hidrológico. Esto hace que, tanto para procesos hidrológicos como biológicos y químicos, el conocimiento de la HS es fundamental, sobre todo si se tiene en cuenta el intercambio de agua y energía entre la superficie y la atmósfera a través de la evapotranspiración de las plantas (Liang & Wang 2020).

En términos específicos, suele definirse a la HS como la cantidad de agua contenida en el volumen total de suelo, la misma se puede expresar en peso (gravimétrica) o en base al volumen (usualmente en porcentaje). De esta forma, se puede definir el contenido volumétrico de *humedad de suelo* (HS) como (Eq. 1):

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (1)$$

Siendo V_w el contenido de agua en volumen [L^3] y V_s el volumen total de suelo [L^3]. De esta manera, la HS puede variar entre 0 y la porosidad (ϕ), definiendo la *porosidad* como el volumen de aire y agua sobre el volumen total de suelo, aunque en suelos naturales la HS no alcance el valor de la porosidad (Dingman 2002).

Es claro que el conocimiento de esta variable es de valor en aplicaciones como cálculo de escorrentías y control de inundaciones, erosión de suelo y falla de taludes, alerta temprana de sequías, riego, pronóstico para cultivos, ingeniería geotécnica y calidad de aguas. Esto hace que la correcta cuantificación de la humedad de suelo cobre mayor interés (Liang &

Wang 2020). Dependiendo de su aplicación, puede ser de interés determinar el valor de la variable en diferentes zonas del suelo.

Así como se define la HS, también puede definirse la variación de la misma en los diferentes horizontes de suelo. Para esto, se introducen los conceptos de grado de saturación, potencial matriz y conductividad hidráulica. En primer lugar, se define el *grado de saturación* (S) como la relación entre la humedad $[\text{L}^3]$ y la porosidad $[\text{L}^3]$ (Eq. 2):

$$S = \frac{\theta}{\phi} \quad (2)$$

La Ley de Darcy permite conocer la infiltración y redistribución en medios no saturados, como pueden ser los suelos. A continuación, se presenta la ecuación que rige esta ley (Eq. 3):

$$\begin{aligned} q_x &= -K_h \frac{d\left(z + \frac{p}{\gamma_w}\right)}{dx} \\ &= -K_h \left[\frac{dz}{dx} + \frac{d\left(\frac{p}{\gamma_w}\right)}{dx} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo q_x la relación volumétrica de flujo en la dirección x por área $[\text{L}/\text{T}]$, z es la elevación sobre un punto de referencia arbitrario $[\text{L}]$, p es la presión de agua $[\text{F}/\text{L}^2]$, γ_w es el peso específico del agua $[\text{F}/\text{L}^3]$, y K_h es la conductividad hidráulica del agua $[\text{L}/\text{T}]$.

De esta forma, para la componente vertical z definiendo K_v en este caso como la conductividad hidráulica en la componente vertical, se puede reescribir la ecuación anterior como sigue (Eq. 4):

$$\begin{aligned} q_z &= -K_h \frac{d\left(z + \frac{p}{\gamma_w}\right)}{dz} \\ &= -K_h \left[\frac{dz}{dz} + \frac{d\left(\frac{p}{\gamma_w}\right)}{dz} \right] \\ &= -K_h \left[1 + \frac{d\left(\frac{p}{\gamma_w}\right)}{dz} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

A su vez, teniendo en cuenta que, para problemas hidrológicos, el peso específico del agua es constante, se puede definir el potencial de presión como la relación entre la presión y el peso específico. El mismo tiene unidades de $[\text{L}]$ y se suele expresar en cm de agua. También se observa que, cuando la presión es negativa, el potencial presión también lo es y usualmente se denomina potencial matriz (Dingman, 2002) (Eq. 5):

$$\psi = \frac{p}{\gamma_w} \quad (5)$$

De esta manera, se puede reescribir (Eq. 6):

$$q_z = -K_h \frac{d(z+\psi(\theta))}{dz} \quad (6)$$

Sabiendo que el potencial matriz y la conductividad hidráulica son función de la humedad, se llega a (Eq. 7):

$$q_z = -K_h(\theta) \left[1 + \frac{d\psi(\theta)}{dz} \right] \quad (7)$$

A partir de esta expresión de la Ley de Darcy, combinándola con la conservación de masa, se llega a la ecuación de Richards para percolación vertical en un suelo (Eq. 8). Esta ecuación no tiene solución analítica, salvo para simplificaciones $\psi - \theta$ $K_h - \theta$ con condiciones de borde particulares.

$$-\frac{\partial K_h(\theta)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_h(\theta) \cdot \frac{d\psi(\theta)}{dz} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

Es por esto que es conveniente encontrar relaciones entre del tipo $\psi - \theta$. Como ya se mencionó cuando la presión es negativa, el potencial presión se denomina potencial matriz, es por esto que para el caso de suelos no saturados como se denomina indistintamente potencial matriz y su valor es negativo. La relación entre el potencial matriz y la humedad de suelo para un suelo dado se puede determinar y se representa con la curva de humedad característica. Esta relación es no lineal y depende de varios factores, entre ellos el tipo de suelo. En Figura 2-1, se presenta una curva de humedad característica típica.

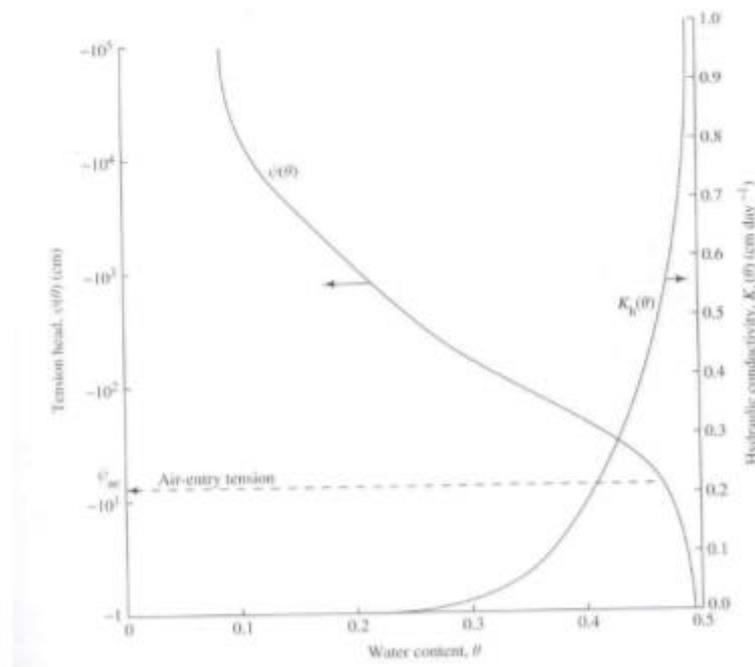


Figura 2-1: Curva de humedad característica (Dingman 2002).

Dado que la medición de la relación entre el potencial matriz es dificultosa, es útil definir relaciones en forma de ecuación. Brooks and Corey 1964, Campbell 1974 y Van Genuchten 1980 proponen diferentes relaciones, en particular Campbell propone una relación potencial según la siguiente Eq 9.

$$|\psi(S)| = \frac{|\psi_{ea}|}{S^b} \quad (9)$$

Lo cual se puede reescribir como Eq 10.

$$|\psi(\theta)| = |\psi_{ea}| \left(\frac{\phi}{\theta}\right)^b \quad (10)$$

Donde ψ_{ea} es la tensión de entrada de aire que se define como la presión para la cual significantes burbujas de aire comienzan a aparecer en la masa de suelo. A su vez el término b usualmente se denomina como índice de distribución tamaño de poros, se define como la medida de la relación de la distancia recorrida por el agua en el suelo en una línea recta. Este parámetro depende principalmente de la textura del suelo, y fue determinado para diversos tipos de suelos, en particular Clapp and Hornberger (Clapp and Hornberger 1978) determinaron el valor del mismo para distintos tipos de suelo.

En cuanto al comportamiento de los suelos naturales, es conveniente definir según el grado de humedad diferentes estados límites, es así que se define la capacidad de campo (θ_{fc}) como la cantidad de agua que es capaz de retener el suelo en forma natural, es decir que sería un indicador del contenido de agua que puede retener el suelo contra la fuerza de gravedad. Se puede definir en función de la porosidad, la presión de entrada de aire y el coeficiente b . A su vez, se puede definir el punto de marchitez permanente como el grado de humedad del suelo que las fuerzas de succión de las raíces son menores que las de retención del suelo. Se definen ambas en Eq. 11 y 12.

$$\theta_{fc} = \phi \left(\frac{|\psi_{ea}|}{340}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

$$\theta_{pmp} = \phi \left(\frac{|\psi_{ea}|}{15000}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (12)$$

Habiendo definido estas dos condiciones de humedad en el suelo, se puede definir el *agua disponible* (AD) como la diferencia entre las anteriores (Eq. 13), siendo el AD la cantidad de agua que puede ser utilizada por las plantas.

$$\theta_{AD} = \theta_{fc} - \theta_{pmp} \quad (13)$$

En este punto es importante introducir los conceptos de perfiles del suelo. La primera clasificación que se puede hacer para diferenciar las capas (u horizontes) de un suelo es según los horizontes pedológicos. Estos son los que constituyen el perfil del suelo y se definen por la proporción de materia orgánica y el grado es que los materiales se depositaron o removieron por procesos químicos o físicos, se presenta una representación de los mismos en Figura 2-2. Normalmente en Uruguay se presentan dos horizontes, la capa superior (A)

que generalmente se compone de materiales más gruesos y mayor cantidad de materia orgánica en proporción y por debajo el horizonte B donde se acumulan materiales más finos provenientes del A. Por debajo de estos se encuentra generalmente la roca madre, la cual usualmente está muy poco modificada por los procesos formadores de suelo. Vale aclarar que entre la roca madre y el horizonte B puede encontrarse el substrato u horizonte C.

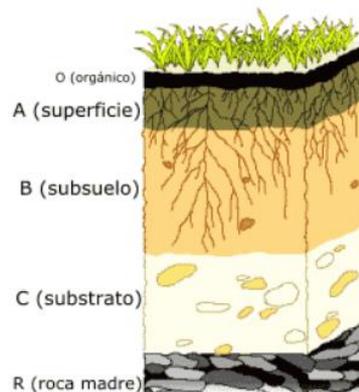


Figura 2-2: Horizontes pedológicos del suelo.

Por otro lado, se definen los horizontes hidrológicos (Figura 2-3), que son más útiles para describir los movimientos de agua en el suelo. En primer lugar, se identifica la zona freática, se denomina de esta manera a la fracción saturada en la cual las presiones son positivas. La zona no saturada (*vadose zone* en inglés) se refiere a toda la región de presiones de agua negativas por encima de la freática. Luego, se define una zona intermedia donde se dan procesos de percolación. Dependiendo de la región esta fracción de suelo, puede ser de extensiones del orden de los metros. A partir de esta, se define la zona radicular que es aquella donde las plantas obtienen el agua para la evapotranspiración, es la más cercana a la superficial.

Desde el punto de vista hidrológico, para el último horizonte definido, se puede establecer una última subdivisión. La humedad de suelo superficial se refiere al contenido de agua para los primeros 5 cm de profundidad, mientras que el contenido de agua en la zona radicular es la que está disponible para las plantas, para esta se considera hasta los 200 cm de profundidad (Liang & Wang 2020).

De esta manera, se tienen formas teóricas de cuantificar la humedad de suelo en toda la columna del mismo. Esto hace que, desde el punto de vista teórico, se puede conocer el valor de humedad de suelo a partir de obtener el valor en determinado horizonte o punto del suelo (en la vertical), lo cual genera que el obtener mediciones de humedad de suelo en cualquier horizonte del mismo es de suma importancia.

La medición de humedad de suelo se puede separar en dos clases, mediciones in situ (*contact based*) y con sensoramiento remoto (*contact free*). Para la primera mencionada, se tiene una definición y una fiabilidad grande en cuanto a los resultados que se obtienen, pero cuenta con la desventaja de no poder cubrir áreas espacialmente grandes. El sensoramiento remoto

presenta la versatilidad de tener mejor distribución espacial, pero presenta la desventaja de cubrir únicamente los primeros centímetros de profundidad (Vereecken et al. 2008).

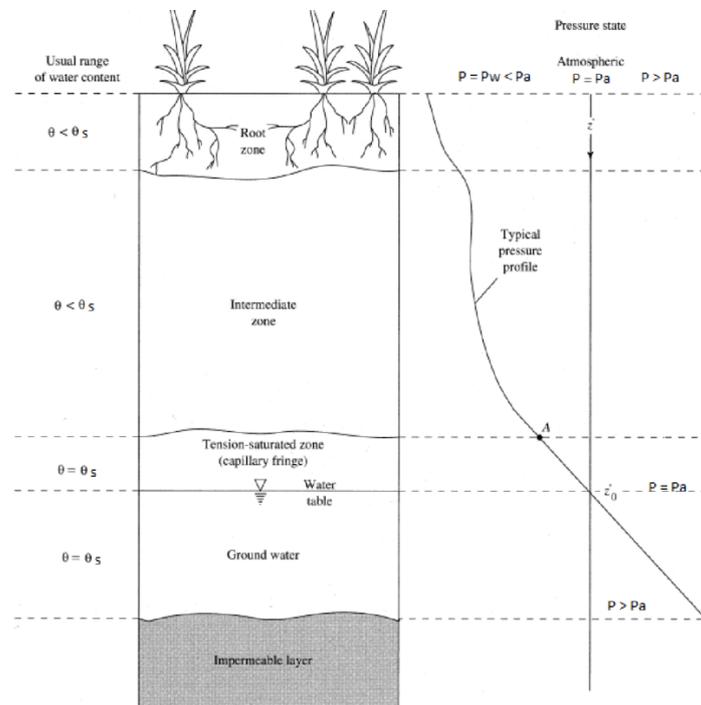


Figura 2-3: Horizontes hidrológicos del suelo (Dingman 2002).

2.1.2 Métodos de medición de humedad de suelo

Existen diferentes técnicas para la medición de la HS *in situ*, que se podrían separar en dos grandes tipos, los directos y los indirectos (Bittelli 2011). Dentro de los directos o *contact based*, se pueden mencionar sensores de capacitancia, *Time Domain Reflectometry* (TDR), mediciones de resistividad eléctrica (FDR), sensores de pulso de calor y los métodos destructivos (gravimétricos). En cuanto a los métodos indirectos, que consisten en medir otra variable que está afectada por la HS para luego estimar la misma, se destacan radiómetros pasivos de microondas, radares de apertura sintética (SAR), dispersómetros y métodos térmicos.

2.1.2.1 Métodos de medición *in situ*

En Tabla 2-1, se presenta un resumen de los métodos de medidas de HS *in situ*. Los mismos, como se mencionó anteriormente, tienen como primera virtud el hecho de poder medir la variable a diferentes profundidades. Sin embargo, tienen como principal desventaja el hecho

de ser medidas puntuales, que necesitan de una red de monitoreo extensa para definir el valor de la variable en una determinada área.

Tabla 2-1: Principales métodos de medición de humedad de suelo (adaptado de Liang & Wang 2020).

Escala	Método	Ejemplo	Descripción
Puntual-Local	Gravimétrico	Secado en horno	Método estándar, destructivo, se debe realizar con una muestra inalterada
	Nuclear	Neutrones	Mide la diferencia de velocidades de los neutrones emitidos provocada por los átomos de hidrógeno
		Rayos Gamma	La absorción de rayos gamma está relacionada a la densidad de la materia que atraviesa
		Sensores de Resistividad	La resistividad del suelo depende de las propiedades dieléctricas del mismo y de la humedad
		Sensores de Capacitancia	Usa la constante dieléctrica midiendo la capacitancia del suelo con dos electrodos implantados
	Electromagnético	Reflectometría de Dominio Temporal (TDR)	Propagación de señales electromagnéticas. La velocidad depende de las propiedades del suelo como el contenido de agua y la conductividad eléctrica
		Reflectometría de Dominio de Frecuencia (FDR)	Un oscilador detecta cambios en las propiedades dieléctricas del suelo asociados al contenido de agua en el mismo
	Tensiométricos	Potencial matriz del suelo	Medición del potencial matriz a través de la tensión capilar
	Hidrométricos	Inercia Térmica	La relación entre la humedad en los poros y la humedad relativa ya que la inercia térmica de un poro depende de la humedad del suelo y la temperatura en superficie es un indicativo
	Disipación de calor	Pulso de calor	Medir el aumento o disminución de la temperatura después de un pulso de calor
	Óptica	Sensores de fibra óptica	La atenuación de la fibra en el suelo varía con el contenido de agua en el suelo
	Modelos Hidrológicos	WAVE; SWAP	Basados en resolver la ecuación de Richards en una dimensión conociendo las condiciones de borde superior e inferior (atmósfera y suelo)

Entre las diferentes técnicas de medición *in situ*, se pone especial énfasis en *Time Domain Reflectometry* (Topp et al. 1980). La técnica consiste en medir el retraso de señal eléctrica medida a través de un material con un determinado contenido de humedad. El principio básico es la reflexión sufrida por una onda al cambiar de medio por el cual viaja. Lo que realiza,

entonces, es calcular la constante dieléctrica de un medio (suelo) midiendo el tiempo que demora una onda electromagnética en propagarse por una línea de transmisión, el tiempo que demora en llegar es función de la constante dieléctrica del medio en el que se encuentra la transmisión (Calvache 2013).

Este método se puede aplicar de diferentes formas, como sondas verticales de diferente longitud, sondas horizontales enterradas en el suelo a diferentes profundidades o sondas TDR simples enterradas verticalmente en el suelo. De estas tres modalidades las sondas verticales son las que presentarían más ventajas con respecto a los sistemas de sondas horizontales, ya que permiten realizar medidas con casi nula afectación del suelo (Calvache 2013).

Tanto para esta técnica, como para el resto de las mediciones in situ, como ya se mencionó, la principal desventaja se encuentra en la distribución espacial de la medida. Si bien las mediciones in situ permiten la medición acertada de la HS cerca de la superficie y a diferentes profundidades en el suelo, están limitadas a locaciones específicas y no son capaces de representar distribuciones espaciales de gran escala (Petropoulos et al. 2013), por ej. cuencas hidrográficas. Para cualquier evento que se requiera la estimación de HS a esta escala espacial, es necesario otra forma de estimación, es donde entra el sensoramiento remoto, en particular la estimación de HS satelital, con su limitación de estimación en superficie (Srivastava et al. 2016).

Si bien las redes de monitoreo in situ son herramientas muy valiosas, tanto para la aplicación directa que puedan tener las mediciones como para la utilización para calibración de modelos o productos satelitales, presentan la desventaja de ser muy costosas y de difícil implementación a grandes escalas espaciales. A nivel mundial el número de estaciones meteorológicas que miden HS ha crecido sostenidamente (Petropoulos et al. 2013), esto se refleja también en Uruguay donde gracias a diferentes trabajos y proyectos se viene aumentando el número de puntos donde se tienen series de datos de HS medidos por ej., en proyectos de investigación en relación a los efectos de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales. Sin embargo, esto no es suficiente para constituir una red de monitoreo que cubra distribuciones espaciales importantes como por ejemplo la cuenca del río Yi.

En particular en este trabajo, se presentan resultados correspondientes a medidas con sensores TDR en la zona de estudio. Estas medidas se comparan con las medidas a partir de productos satelitales que se describirán en la siguiente sección.

2.1.2.2 Métodos de medición con sensoramiento remoto

Desde la década de 1980, se conocen resultados de investigación de acerca de la estimación de HS a partir de sensores de microondas (Wang and Schmugge 1980; Ulaby et al. 1986). En los últimos 25 años, el avance en el sensoramiento remoto con microondas permitió estimar con éxito las propiedades dieléctricas de la superficie del suelo, en base a la emisividad del mismo; esto hace posible estimar la humedad (Mohanty 2017). En particular, en los últimos 15 años, con el lanzamiento de misiones específicas dedicadas a la medición de estos

parámetros, la determinación de la humedad de suelo a partir de información satelital se ha tornado un insumo cada vez más utilizado en la modelación hidrológica.

Es así que las misiones que utilizan sensores de bandas con baja frecuencia (bandas C, X y L), son capaces de estimar la humedad de suelo. Dentro de estas frecuencias, las longitudes de onda captadas van desde 2.75 a 30 cm. Existen básicamente dos tipos de sensores que logran captar radiación para estos usos, los activos y los pasivos. Estos últimos, en particular los radiómetros, normalmente tienen otros propósitos fuera de medir la humedad de suelo, pero pueden utilizarse para esto con buenos resultados. A su vez, los sensores activos son un número menor que los anteriores, dentro de los que se destacan los escaterómetros y los radares de apertura sintética.

Un sensor pasivo es un instrumento capaz de recibir y medir emisiones de microondas producidas por constituyentes de la superficie de la Tierra y la atmósfera (Figura 2-4). La radiación medida por los sensores pasivos es una función de la composición y rugosidad de la superficie, la temperatura y otras características físicas de la Tierra. Las bandas de frecuencia para las mediciones de los sensores pasivos están determinadas por propiedades físicas fijas (resonancia molecular) de la sustancia que se mide. Los sensores pasivos siguen el modelo de los instrumentos de radioastronomía (radiómetros), que detectan emisiones de muy baja potencia. Son particularmente sensibles a la radiación acumulada de una multitud de emisores en el suelo, tanto dentro de la banda de frecuencia en la que se están realizando las mediciones, como fuera de banda (NASA 2012).

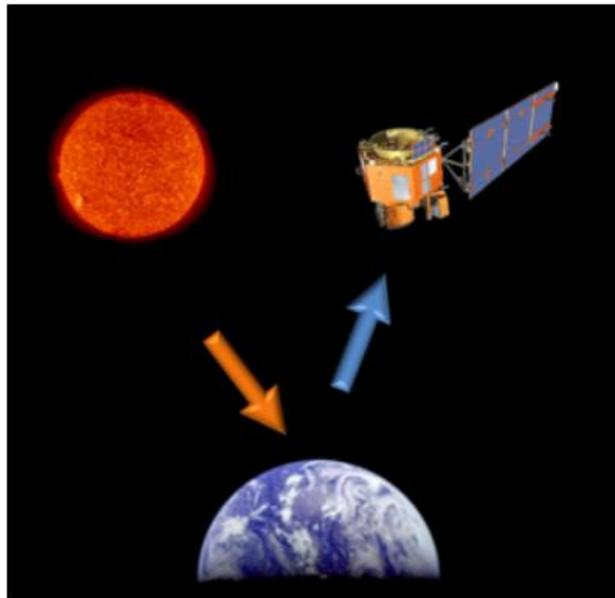


Figura 2-4: Representación de satélite con sensor pasivo (extraído de NASA.gov).

Un sensor activo es un instrumento de radar que se utiliza para medir las señales transmitidas por el sensor que fueron reflejadas, refractadas o dispersadas por la superficie de la Tierra o

su atmósfera (Figura 2-5). Las señales reflejadas son captadas por el radar y se pueden determinar la localización y las propiedades del objeto. Entre los sensores activos se encuentran los escaterómetros y los radares de apertura sintética (NASA 2012).

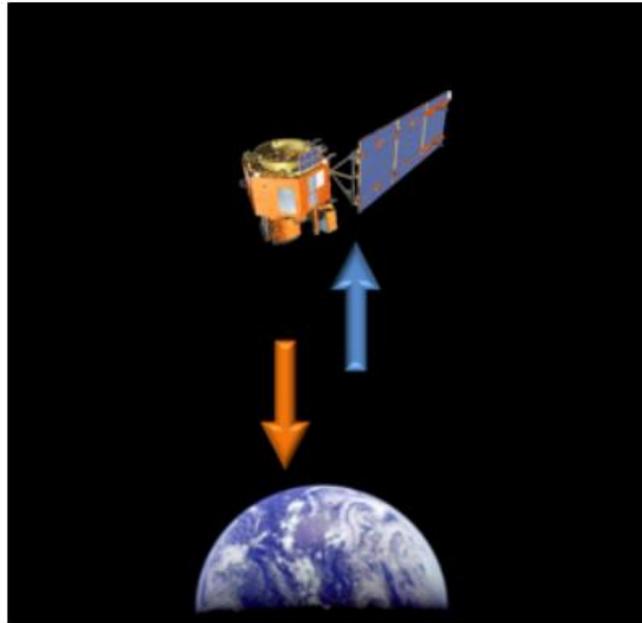


Figura 2-5: Representación de satélite con sensor activo (extraído de NASA.gov).

Dentro de los diferentes enfoques para medir microondas, existen diferentes herramientas, como algunas de las que se mencionan anteriormente. Los Radares de Apertura Sintética (SAR por su sigla en inglés) son sensores activos y están en uso desde fines de la década de 1970 (Sea Satellite, SEASAT). Este tipo de sensores con muy buena resolución espacial presenta baja resolución temporal lo que no lo hace tan útil para algunas aplicaciones como el pronóstico hidrológico (Wagner, Lemoine, and Rott 1999). De todas formas, la mayor complicación en cuanto a los sistemas SAR radica en la forma en que las interacciones del medio afectan la señal que capta el radar. Las imágenes SAR son afectadas por la rugosidad de la superficie, sobre todo la vegetación, lo cual en algunos casos puede hacer que esta variable afecte tanto como la humedad de suelo en si (Srivastava et al. 2016).

Otro enfoque para sensores activos se puede dar mediante el uso de escaterómetros, los cuales tienen una resolución espacial menor, del orden de las decenas de kilómetros, pero cuentan con una mayor resolución temporal (de una medición cada 2 a 6 días, aunque depende del sistema). También en este caso la presencia de vegetación afecta de manera significativa la medida. Dentro de este tipo de sensores, el Advanced Scatterometer (ASCAT) a bordo de MetOp (Meteorological Operational Satellite), es un instrumento que mide en banda C operado en una frecuencia de 5.255 GHz. El objetivo central de la instalación de ASCAT es monitorear velocidad y dirección de viento sobre los océanos, pero a pesar de esto se ha convertido en una buena opción para la medición de humedad de suelo.

Además de estas dos formas de medir microondas para los sensores activos, en el caso de los pasivos comúnmente se utilizan radiómetros. Estos sistemas para inferir la humedad de suelo tienen mejores resultados operados a bajas frecuencias (Jackson et al. 2004). Para ser eficientes, estos sensores tienen que operar en una frecuencia que no se vea afectada por emisiones e interferencias de radio frecuencia generadas por el hombre. En comparación con los sensores activos, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los radiómetros tienen menor afectación debido a la rugosidad de la superficie y a la vegetación del suelo (Ulaby and Long 2014). Si bien tiene estas ventajas, la desventaja inherente a la técnica radica en que la resolución espacial es proporcional al diámetro de la antena e inversamente proporcional a la longitud de onda. Esto hace que, para una longitud de onda de 21 cm, para tener una resolución de 40 km, se necesita una antena de aproximadamente 8 metros de diámetro (Srivastava et al., 2016).

En este punto, existen actualmente dos misiones específicamente dedicadas a la medición de humedad de suelo con radiómetros pasivos para banda L, por un lado Soil Moisture and Ocean Salinity SMOS (Kerr et al. 2001, 2010) lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en el año 2009, cuya frecuencia característica es 1.4 GHz, y Soil Moisture Active Passive SMAP (Entekhabi et al. 2010, 2014) lanzado por la National Aeronautic and Space Administration (NASA) en 2015, cuya frecuencia característica es 1.41 GHz (pasivo); 1.26 GHz (activo). También vale destacar el instrumento Aquarius (LeVine et al. 2014), que a pesar de que su propósito principal era medir la salinidad en el océano, también era capaz de inferir la humedad de suelo. Cabe mencionar que, en junio de 2015, el satélite en el cual estaba a bordo el instrumento sufrió una falla lo cual determinó el fin de la misión.

Los radiómetros pasivos de las misiones SMOS y SMAP proporcionan actualmente una buena estimación de la humedad de suelo en intervalos de entre 2 y 3 días, con una resolución espacial entre 35 y 60 Km, cubriendo todo el globo. Por su parte, el radar activo de SMAP tuvo una falla en la fuente de alimentación en julio de 2015 (luego de 3 meses de operación) y está fuera de servicio (Mohanty, 2017).

Si bien antes del lanzamiento de estas dos misiones la mayoría de las estimaciones de humedad de suelo eran mediante sensores pasivos con longitudes de onda menores a las óptimas para medición de humedad de suelo, para estos datos se desarrollaron diferentes productos operacionales y experimentales con buenos resultados (Hong 2016). A su vez varios de los productos de humedad generados a partir de las misiones antes mencionadas, han tenido sus programas de validación o ajuste a nivel global, comparando resultados de la estimación satelital con datos de campo. Pueden destacarse los casos de Aquarius (Bindlish et al. 2015) y ASCAT (Albergel et al. 2009). Además, para el caso de la misión SMAP (Entekhabi et al. 2010) esta comparación se realizó a paso semanal en diferentes coberturas, mientras que para el caso de la misión SMOS se utilizaron datos de campo asociados a redes de cuencas (Jackson et al. 2012; Panciera et al. 2009). En general, se han validado prácticamente todas las misiones con datos de campo de HS, de acuerdo a los criterios de exigencia propuestos por Chan et al. 2016.

Cabe destacar que en el trabajo realizado por Albergel et al. 2009, las comparaciones se realizan en función de indicadores entre los cuales se evalúa el coeficiente de correlación, el sesgo (*bias*) y la raíz cuadrada de los errores medios (RMSE) entre 13 estaciones *in situ* y el producto de ASCAT. El coeficiente de correlación va desde 0.31 a 0.81, el sesgo de -0.041 a 0.096 y el RMSE de 0.74 a 1.21. Para el caso de Bindlish et al. (2015), se tienen valores de 0.89 y 0.82 para el r , -0.018 y 0.002 para el sesgo y 0.031 y 0.030 para el RMSE comparando datos *in situ* con satelitales en dos cuencas en Estados Unidos. En el caso de Entekhabi et al. (2010), la comparación en tres sitios de Estados Unidos muestra un error estándar de 0.03 m³/m³. Finalmente, en Jackson et al. 2012, se comparan las medidas satelitales de SMOS con medidas *in situ* en una red de monitoreo de 4 cuencas de Estados Unidos con resultados de entre 0.034 y 0.072 para el RMSE, de 0.81 a 0.14 para el r y sesgos de entre -0.02 y 0.04.

De las misiones antes mencionadas, para este trabajo de tesis se utilizan las misiones SMAP, SMOS y ASCAT. Esto en parte se debe a que permanecen activas actualmente y que son ampliamente utilizados para determinar esta variable, en particular para la modelación hidrológica (Jiang 2019). En la actualidad cada una de estas misiones cuenta con diferentes niveles de productos, los cuales se diferencian en el grado de procesamiento de los datos. Siendo el Nivel 1 los datos casi sin procesamiento, Nivel 2, los datos procesados a partir de los de Nivel 1 (dato de HS para media orbita), Nivel 3 corresponde a la composición del anterior para la generación de productos diarios o de mayor paso temporal, mientras que Nivel 4 implica un grado de procesamiento mayor aun en el cual se le agrega modelación para la obtención del dato, donde por ejemplo puede generarse un producto de HS en la zona radicular. En Tabla 2-2, se presenta un resumen de las misiones capaces de medir HS.

Tabla 2-2: Principales misiones que miden humedad de suelo (Adaptado de Hong 2016)

Sensor y Plataforma	Canal	Pixel (Km)	Frecuencia	Periodo
Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR), Nimbus-7	Múltiple, desde 6.6 GHz (4.5 cm)	140	Diaria	1978-1987
Microwave Imager/Sounder (MIS), Windsat	Múltiple, desde 6.8 GHz (4.4 cm)	25	Diaria	2003-actualidad
TRMM Microwave Imager (TMI), TRMM	Múltiple, desde 10.7 GHz (2.8 cm)	25	Diaria	1997-actualidad
Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), DSMP	Múltiple, desde 19.4 GHz (1.5 cm)	25	Diaria	1987-actualidad
Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), EOS-Aqua	Múltiple, desde 6.9 GHz (4.3 cm)	25	Diaria	2002-2011
Scatterometer (SCAT), ERS	5.3 GHz (5.7 cm)	50	3-4 días	1992-actualidad
Advanced Scatterometer (ASCAT), MetOp	5.3 GHz (5.7 cm)	25	1-2 días	2006-actualidad
Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), SMOS	1.4 GHz (4.3 cm)	35	2-3 días	2009-actualidad
Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR-2), GCOM-W	Múltiple, desde 6.9 GHz (4.3 cm)	25	Diaria	2012-actualidad
Soil Moisture Active and Passive (SMAP), SMAP	1.4 GHz (21 cm)	3, 9, 36	2-3 días	2015-actualidad

2.2 Estado del arte

2.2.1 Humedad de suelo satelital y modelación hidrológica

La estimación de la HS mediante información satelital se focaliza en los primeros centímetros del suelo (variable entre 1 y 5 cm de acuerdo al sensor empleado). Sin embargo, para su utilización en los modelos hidrológicos en muchos casos se requiere una estimación del

contenido de humedad en toda la zona radicular (al menos 100 cm, de acuerdo al suelo y cobertura).

En este sentido, la comunidad internacional ha realizado varios esfuerzos a partir de la integración de la información satelital de HS con modelos de funcionamiento hidrológico del suelo (Das y Mohanty 2006; Das et al. 2010; Ridler et al. 2014; Dumedah et al. 2015; González-Zamora et al. 2016; de Lannoy y Reichle 2016; Muñoz-Sabater 2015). En base a estos modelos de suelo, se destacan algunos productos integrados del contenido de humedad en la zona radicular (Wagner et al. 1999; Brocca et al. 2010; Mecklenburg et al. 2016). Estos avances han permitido el desarrollo de varias experiencias de aplicación de la información satelital de HS en modelación hidrológica para la simulación de caudales.

A nivel internacional, en cuanto a la utilización de HS satelital, múltiples estudios se han realizado para mejorar la predicción de caudales y corregir la humedad antecedente, entre los primeros avances se destaca, Pauwels et al. 2001, donde se mejora la predicción de caudales en la cuenca del río Zwalm en Bélgica con asimilación de datos de humedad satelital en superficie de la primer y segunda misión ERS con frecuencia cada 35 días y una resolución espacial de 50 km en dos versiones del modelo TOPLATS, la versión concentrada y la versión distribuida. Para este caso, los autores trabajaron por subcuencas llegando a mejoras de entre el 20 y el 50% evaluando el RMSE para ambas versiones del modelo.

Como ejemplo de primeros avances para uso de HS en previsión de crecidas, puede citarse el caso de la cuenca del río Carpathian, en Hungría, donde se utilizó la información generada a partir del procesamiento de señales de microondas, se monitorea el estado de humedad de suelo de la cuenca, para mejorar la respuesta hidrológica de la misma frente a eventos extremos (Lacava 2005). En el mencionado trabajo los resultados obtenidos son evaluados de manera cualitativa, aunque los autores exploran posibles potencialidades de la técnica.

En Brocca et al. 2012, se encontraron grandes mejoras al asimilar el producto diario de ASCAT de 25 km diario asimilado en el MIDs model en la cuenca del río Niccone. La cuenca en la que se realiza el trabajo es de aproximadamente 140 km² y se asimila el dato de humedad de suelo en superficie y en la zona radicular con Filtro de Kalman ensamblado encontrando particulares mejoras para inundaciones ocurridas durante el proceso de periodos secos a húmedos. En particular, estas mejoras se daban cuando se asimilaba el dato de humedad de suelo en la zona radicular donde la mejoría en la predicción era notoria evaluando con el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), ya que se pasaba de un NS=0.76 (modelo sin HS satelital) a NS=0.86, no así cuando se asimilaba el dato de HS en los primeros centímetros donde la mejora era menor, donde se alcanzaba un NS de 0.79. Con el mismo producto de HS satelital, en Matgen et al. 2012 se encontraron mejoras en la implementación del BibModel en una cuenca experimental de 10 km² en Luxemburgo, la asimilación se realizó con filtro de partículas y se comparó tanto caudales como humedad de suelo, donde se encontraron mejoras en ambas variables modeladas en comparación con medidas, en particular mejorando la eficiencia de la predicción de caudal en un 15%. A su vez se determinaron

diferencias en las mejoras dependiendo de la estación del año dividiendo en periodo seco, húmedo y de transición.

Massari et al. 2015 utiliza el producto de H-SAF derivado de ASCAT para aplicar en cinco subcuencas del río Tibber con áreas desde 140 a 2000 km² en Italia. Mejorando los caudales cuando se asimilaba datos de humedad de suelo superficial y en la zona radicular en el MISDC model, con una eficiencia de 30% en promedio. A su vez, en este trabajo se analiza la incidencia del área de cuenca, el tipo y uso de suelo y el error provocado por la asimilación de datos.

También, el trabajo de Lievens et al. 2015 es un ejemplo del uso exitoso de los productos humedad de suelo (SMOS) para mejorar los resultados de un modelo hidrológico de simulación continua (modelo VIC) en la cuenca del río Murray Darling en Australia. En este caso se mejoró levemente la performance para simulaciones diarias de caudal pasando de un R² de 0.61 a 0.65 con la asimilación de datos.

Por otro lado, en Montero et al. 2016 se evalúa el impacto en el pronóstico hidrológico evaluando diferentes productos incluidos en el proyecto HSAF con notorias mejoras en el pronóstico de caudales y niveles cuando se asimilaban datos de humedad de suelo y caudal en comparación con asimilar únicamente caudal. En el caso de la asimilación de HS obtiene mejoras de 0.87 a 0.93 o de 0.66 a 0.83 en NS dependiendo la cuenca. Mientras que asimilando caudal se llega a valores de 0.98 y 0.95 de NS para las mismas cuencas.

Patil and Ramsankaran 2017 utiliza el producto nivel 3 de SMOS para asimilar en el modelo SWAT en la cuenca del río Munneru de 10000 km² en India encontrando claras mejoras en la modelación de las diferentes capas del suelo del modelo SWAT, pero moderadas mejoras en la predicción de caudales (NS varían de 0.57 a 0.71), principalmente asociados a las limitaciones intrínsecas del modelo según los autores. Los mismos autores en 2018 (Patil and Ramsankaran 2018) agregaron el producto de ASCAT para asimilarlo al modelo hidrológico SWAT nuevamente, en dos cuencas de India de 1600 (río Wyara) y 5000 km² (río Varada) donde nuevamente obtuvieron mejoras moderadas en la simulación de caudales utilizando una propuesta de ensamble para los dos modelos. En el caso de una de las cuencas (río Wyara) se pasa de un NS=0.23 sin HS a NS=0.45 con el producto de SMOS y 0.42 para ASCAT. Mientras que en la cuenca Varada se parte de NS=0.52 llegando a NS=0.65 con SMOS y NS=0.70 con ASCAT.

A su vez, en Leach et al. 2018, se aplica el producto diario de SMOS en diferentes modelos hidrológicos implementado en una cuenca urbana del río Don en Canadá encontrando algunas mejoras en diferentes aspectos de la simulación y pronóstico hidrológico y concluyendo que los mejores resultados los obtienen con el modelo GR4J, el cual era el más simple de los implementados.

A nivel regional, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, viene trabajando en los últimos años en el procesamiento y generación de productos satelitales para la estimación de humedad del suelo. En efecto, ha desarrollado y puesto a disposición, mapas de humedad de suelo generados a partir de productos de ASCAT y SMOS

en el marco del proyecto ISAGRO (Información Satelital para el Agro). Si bien la utilización de los mismos en nuestra región es muy amplia, la CONAE ha desarrollado experiencia en la incorporación de los productos de HS satelital (e.g. producto de SMOS) en modelos hidrológicos para previsión de crecidas. En este sentido se destaca a nivel regional los trabajos de Goniadzki et al. 2011, Bianchi 2014, Thibeault et al. 2015 y Uriburu Quirno 2019.

Refiriéndose a la comparación entre productos de satélites para modelación hidrológica, a nivel internacional, se destaca en el trabajo realizado por Wanders et al. 2014, en el que se comparan tres productos satelitales (ASCAT, AMSR-E y SMOS) para asimilación en modelación hidrológica con buenos resultados.

2.2.2 Modelación hidrológica para eventos extremos

En cuanto a la modelación de eventos, a nivel mundial uno de los modelos más conocidos y ampliamente utilizados es el modelo del Número de Curva (NC), propuesto por el Natural Resources Conservation Service (NRCS, USDA 2010) de Estados Unidos. Debido a su simplicidad y versatilidad, tiene una larga trayectoria en el campo del diseño hidrológico. A su vez, al no necesitar más forzantes que la precipitación y depender de un único parámetro, cuenta con popularidad mundial (Mishra et al. 2006). En este sentido el modelo del NC es uno de los más utilizados para la estimación de escorrentía para eventos a escala de cuenca en los últimos 60 años (Chung et al. 2010). En particular, para el caso de Uruguay, se trata de un modelo ampliamente difundido y utilizado, siendo la base del diseño hidrológico en lo referente a la temática. A su vez, se cuenta con una clasificación de los suelos de Uruguay (Duran 1996) que permite determinar los grupos hidrológicos de acuerdo con lo propuesto por el método.

Por otro lado, para este trabajo de tesis se implementan los modelos continuos GR4J (Perrin et al. 2003) y Geetha (Geetha et al. 2008), los cuales son modelos concentrados simples que permiten realizar la modelación hidrológica a escala de cuenca. La aplicación de estos modelos en Uruguay es reciente. Se cuenta con antecedentes de trabajo por parte del equipo del IMFIA; en particular, en Chreties et al. 2017 y Narbondo et al. 2020, respectivamente los modelos Geetha y GR4J fueron calibrados y validados para cuencas de Uruguay. Para el primer modelo, se trabajó con diferentes cuencas de Uruguay, obteniendo una calibración de los parámetros que arribara a una performance satisfactoria del modelo en cada una de las cuencas. En el caso del antecedente correspondiente a GR4J, se cuenta con una calibración regional, válida para todo el Uruguay, con parámetros del modelo asociados a características físicas de las cuencas. Estos modelos, en ambos casos, se calibraron para todo rango de caudal.

Para este trabajo de tesis, los modelos continuos se calibraron y validaron acoplados al modelo hidrodinámico de la cuenca del río Yí para eventos extremos (sección 3.4.4). En sección 3.4, se presenta una breve descripción de los modelos.

2.2.3 Incorporación de humedad de suelo en la modelación hidrológica

En cuanto a la incorporación de humedad de suelo en la modelación hidrológica de extremos, en particular para el modelo del NC, se han realizado muchos trabajos a nivel mundial, sobre todo desde el punto de vista de la evaluación de la forma en la cual el modelo tiene en cuenta la humedad antecedente, *Antecedent Moisture Condition* (AMC). En este sentido, se destaca el trabajo realizado por Verma et al. 2017, en donde entre otros resultados se realiza un resumen de las metodologías y formulaciones para incorporar la humedad antecedente en el modelo del NC. A su vez, se destaca dentro de estas formulaciones la propuesta por Wang et al. 2008, que relaciona el NC con el contenido de humedad antecedente medido en la cuenca. En cuanto a los antecedentes a nivel local, se puede mencionar el trabajo de Silveira et al. 2000, donde se estudió el comportamiento de la escorrentía y la aplicabilidad del método propuesto para calcular AMC por el NRCS en una cuenca de Uruguay. En particular se estudió el uso de parámetros del suelo y ecuaciones de infiltración alternativas que permitieron definir la condición de humedad del suelo previa a cada tormenta y revisar los límites estacionales de AMC.

Por otro lado, para modelos continuos, se destaca en cuanto a la incorporación de la HS en la modelación el filtro *Soil Water Index* (SWI) propuesto por Wagner et al. 1999 y mejorado Albergel et al. 2008 y las simplificaciones para integración de la ecuación de Richards en la vertical propuestas en Koster et al. 2000 y Ducharne et al. 2000.

Para el primer caso, los autores encontraron que el dato de humedad de suelo se puede relacionar con el valor de la misma variable en toda la zona radicular siguiendo la formulación matemática, dicha formulación relaciona el valor de la HS en los primeros centímetros con el valor de todo el horizonte correspondiente a la zona radicular y se expresa como sigue en base a un filtro exponencial. Para esto, en el trabajo se buscaba simplificar las expresiones que se utilizan habitualmente para describir el comportamiento de la variable HS en la vertical y se llegó a que este valor se puede escribir según la Eq. 14.

$$SWI(t_n) = \frac{\sum_i^n ms(k)e^{-\frac{t_n-t_k}{T}}}{\sum_i^n e^{-\frac{t_n-t_k}{T}}} \quad (14)$$

Siendo t el paso temporal, ms la humedad satelital y T es el parámetro que representa la duración característica del proceso, es decir la escala de tiempo de la variación de humedad de suelo en la capa a determinar. El subíndice k corresponde a la última medida con la que se cuenta.

Por otra parte, según Koster et al. 2000, se puede integrar el perfil de HS en la vertical para calcular el valor que la variable toma en todos los horizontes del suelo. Acorde también a lo presentado en Ducharne et al. 2000, se puede, a partir de la ecuación de Richards, encontrar expresiones que permitan realizar este cálculo. Es así que tomando en cuenta las relaciones expresadas en Dingman 2002, entre el potencial matriz y la humedad de suelo para el perfil de equilibrio, se puede escribir el valor de HS para una profundidad z como se observa en Eq. 15.

$$w(z) = \left(\frac{\psi_s - z}{\psi_s} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (15)$$

Donde $w(z)$ es el grado de saturación a una distancia z por encima del nivel freático, ψ_s es el potencial matriz de saturación y b es un parámetro de los suelos que depende de la composición del mismo y se determina según Clapp and Hornberger 1978. Estos parámetros, dependientes de la composición de arena, arcilla y limo de los suelos, pueden ser determinados para cualquier suelo de Uruguay en base a la clasificación realizada por Molino 2001.

Es así que integrando $1 - w(z)$ en la vertical teniendo en cuenta lo anterior se puede llegar a una expresión para la humedad en función de la profundidad la cual se logra calcular un valor para esta variable en cada punto z .

3 MATERIALES Y METODOS

El presente capítulo describe la metodología empleada, así como la información utilizada en el presente trabajo de tesis. En primer lugar, se describe el área de estudio, en particular la cuenca del río Yi (sección 3.1); luego, se enumera la información disponible (sección 3.2), poniendo especial énfasis en la información de HS. Luego, se pasa a la metodología implementada en el trabajo, donde, en primer lugar, se detalla cómo se realiza la comparación entre humedad de suelo medida *in situ* y con satélite (sección 3.3), luego se describen los modelos hidrológicos utilizados (sección 3.4), para posteriormente pasar a las formas de incorporar la humedad de suelo en la modelación (sección 3.5 y 3.6). Una vez explicada la componente hidrológica, se muestran las principales características de la modelación hidrodinámica (sección 3.7). En sección 3.8, se detallan las formas en la cual se evaluaron y compararon los resultados de los distintos modelos. Finalmente, en sección 3.9 se describe la metodología utilizada para el análisis costo beneficio.

3.1 Área de estudio

La zona de estudio es la cuenca del río Yi. Para el sistema de alerta temprana de inundaciones, el punto de mayor interés es la ciudad de Durazno; de esta manera se toma la cuenca del río Yí con punto de cierre en su desembocadura en el río Negro (Figura 3-1). En esta cuenca está incluida la ciudad de Durazno.

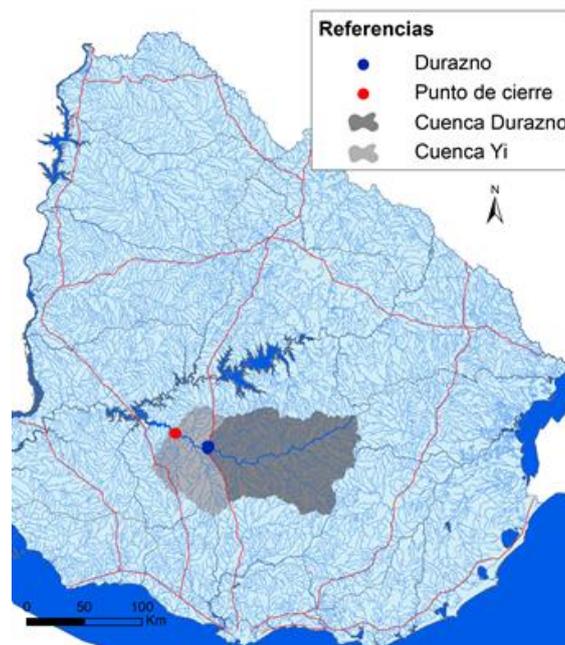


Figura 3-1: Ubicación de la ciudad de Durazno en la cuenca del río Yi con punto de cierre en la desembocadura en Barra de Porongos.

En particular, la ciudad de Durazno es donde se realiza la comparación de niveles en este trabajo. La cuenca con punto de cierre en la ciudad de Durazno tiene un área total de 8850 km² y una pendiente media de 4.2%. El agua disponible (AD) promedio de la cuenca es igual a 99 mm y el tiempo de concentración es de 54 hs. La cobertura y uso de suelo dominantes en la cuenca son pastura natural utilizada para ganadería extensiva con un 10% de mejoras (MVOTMA, 2020), siendo una zona también agrícola y forestal.

3.2 Información disponible

La presente sección muestra la información con la cual se trabaja en esta tesis, detallando las fuentes y diferentes características en cada caso y mencionando donde y de qué manera se aplica la información.

3.2.1 Humedad de suelo

Los datos de HS que se utilizaron en el trabajo son de dos tipos, satelitales (sección 3.2.1.1) e *in situ* (sección 3.2.1.2).

3.2.1.1 Productos satelitales

En las siguientes secciones, se presentan las principales características de los productos de HS satelital utilizados en el presente trabajo.

3.2.1.1.1 SMAP

Se utiliza el producto de HS en m³ / m³ para los primeros 5 cm de profundidad, Surface Soil Moisture (9 km) (Reichle et al. 2018) (Figura 3-2). Dicho producto cubre todo el globo y obtiene las estimaciones diarias de HS al combinar las observaciones del SMAP con las estimaciones de un modelo de superficie terrestre con asimilación de datos de humedad ensamblados con filtro de Kalman. En particular, se utiliza en la comparación con los datos medidos *in situ*, cuenta con la serie histórica en el servidor de la NASA y el acceso a la misma es sencillo.

La información del producto SMAP se obtiene de la página del NSIDC (National Snow and Ice Data Center – Earth Data - NASA), donde se cuenta con un visualizador para descargar datos (SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 5) <https://nsidc.org/data/SPL4SMAU/versions/5>

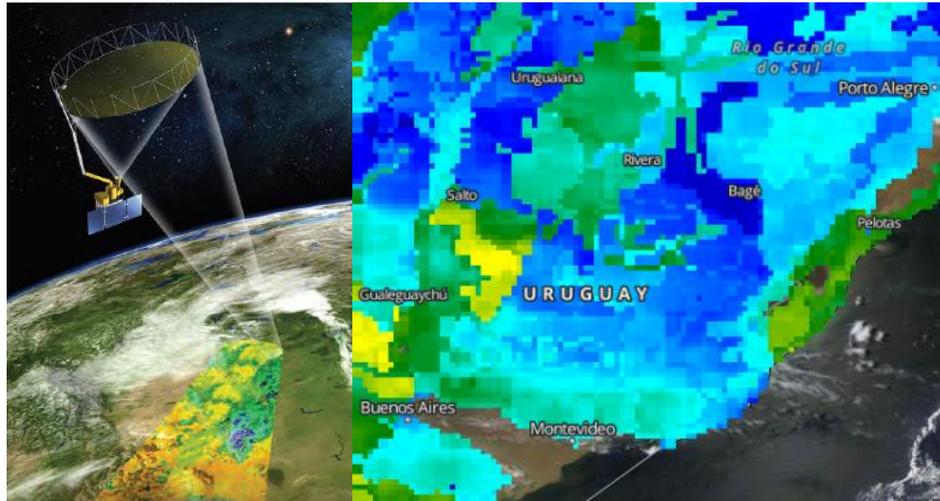


Figura 3-2: Representación del satélite SMAP (extraído de NASA) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).

3.2.1.1.2 SMOS

El producto de HS de SMOS (Figura 3-3) en las cuencas del Yi se obtuvo para eventos que se simularon en el SATI y otros eventos que se identificaron de interés. Tiene un tamaño de celda de 2.5 km y estima la humedad en los primeros 5 cm. Producto nivel 3, que a partir de la medida satelital calcula grado de saturación presentando los valores de 0 a 1 con una resolución temporal de entre 2 y 4 días.

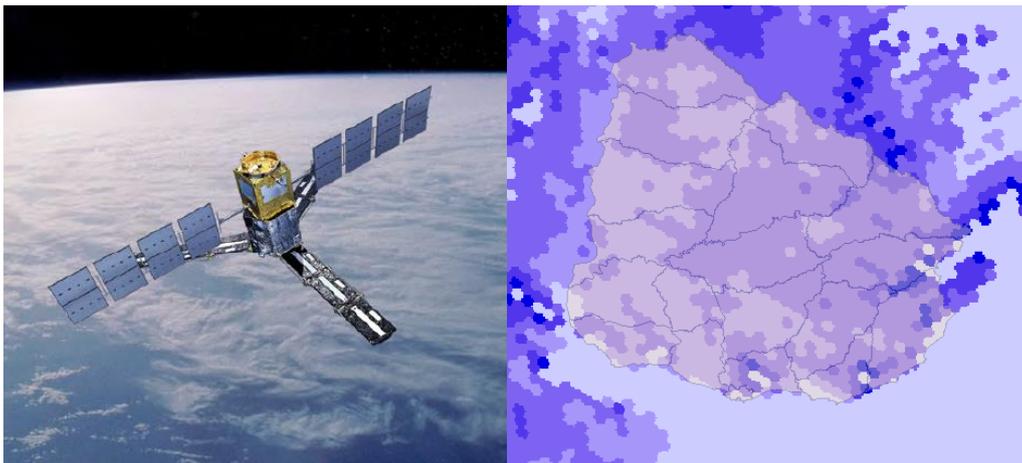


Figura 3-3: Representación del satélite SMOS (extraído de ESA) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).

La ESA permite descargar datos de SMOS (nivel 1 y 2) desde su página web (https://smos-diss.eo.esa.int/oads/access/collection/SMOS_Open y https://smos-diss.eo.esa.int/oads/access/collection/SMOS_Open/tree)

En particular, para el producto (nivel 3) utilizado en esta tesis, se descargan los datos procesados por la CONAE por intermedio del visualizador del proyecto ISAGRO (Información Satelital para el Agro) <http://200.16.81.92/geoexplorer/composer/>

3.2.1.1.3 ASCAT

Al igual que el anterior, no se cuenta una serie continua, sino que algunos eventos en todo el Uruguay. Para el producto de ASCAT (Figura 3-4), el tamaño de celda es de 25 km y estima la HS para los primeros 5 cm. Mide el grado de saturación y los valores se presentan entre 0 y 1. El producto es diario con algunos faltantes.

Se pueden descargar los productos de la web de Eumetsat (Nivel 1, 2 y 3) <https://archive.eumetsat.int/usc/>

En particular para el producto utilizado en esta tesis se descargan los datos, del producto nivel 3, provistos por la CONAE por intermedio del visualizador del proyecto ISAGRO. <http://200.16.81.92/geoexplorer/composer/>

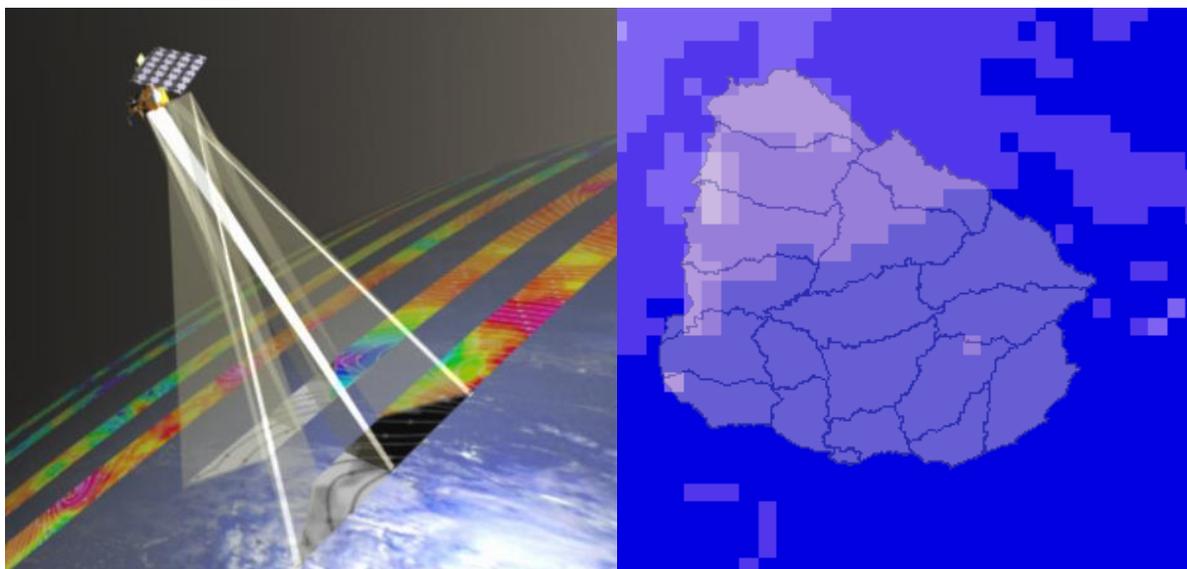


Figura 3-4: Representación del satélite MetOp (ASCAT) (extraído de Eumetsat) (izquierda). Producto de HS utilizado sobre Uruguay (derecha).

3.2.1.1.4 Resumen

La información disponible de HS satelital para este trabajo se obtuvo de las fuentes detalladas en Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Resumen de productos satelitales utilizados.

Misión	Fuente	Celda (km)	Recurrencia	Profundidad (cm)	Observaciones	Periodo de datos disponibles
SMAP	NASA - server	9	Diaria	5	Modelo nivel tres con asimilación	2015- actualidad
SMOS	CONAE – SIRIS - ISAGRO	2.5	3-4 días	5	Producto provisto por la CONAE para eventos concretos	2009- actualidad
ASCAT	CONAE – SIRIS - ISAGRO	25	Diaria	5	Producto provisto por la CONAE para eventos concretos	2006- actualidad

3.2.1.2 Medición *in situ*

Se cuenta con datos de medidas de HS con TDR en 3 puntos (Figura 3-5). Dos en pastura natural y una en colza. Los casos de pastura natural son los que se ubican dentro de la cuenca del río Yi, mientras que el restante es el punto que se encuentra más distante a la cuenca correspondiente a medidas realizadas en INIA La Estanzuela.

Para la cuenca del Yi, desde el 10 de mayo de 2018, por un período de aproximadamente un año, se monitoreó el contenido de agua en forma diaria con sensores TDR a 5, 10 y 20 cm de profundidad en una pastura instalada (Figura 3-6). En este sentido, en el marco de un proyecto anterior se contaba con los sensores TDR, los cuales se colocaron en la zona por parte de un equipo del Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía. Los datos de los sensores se descargan, en colaboración con personal del Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía periódicamente para compararlos con los datos satelitales. El procesamiento primario de los datos y la validación de los mismos estuvo a cargo del mismo equipo en el marco del proyecto de Investigación ANII-FMV-136852-2017: “Estimación de humedad de suelo en base a información satelital para su aplicación en Sistemas de Alerta Temprana ante Inundaciones”.

Por otra parte, para el punto correspondiente a La Estanzuela, se cuenta con 6 meses de datos de HS correspondientes a los años 2015 y 2016 que se comparan con los datos satelitales. El dato *in situ* se mide a 10 y 20 cm e profundidad y los sensores están instalados en una plantación de colza. En Figura 3-7, se muestra un resumen de los datos obtenidos en campo en formato box-plot.

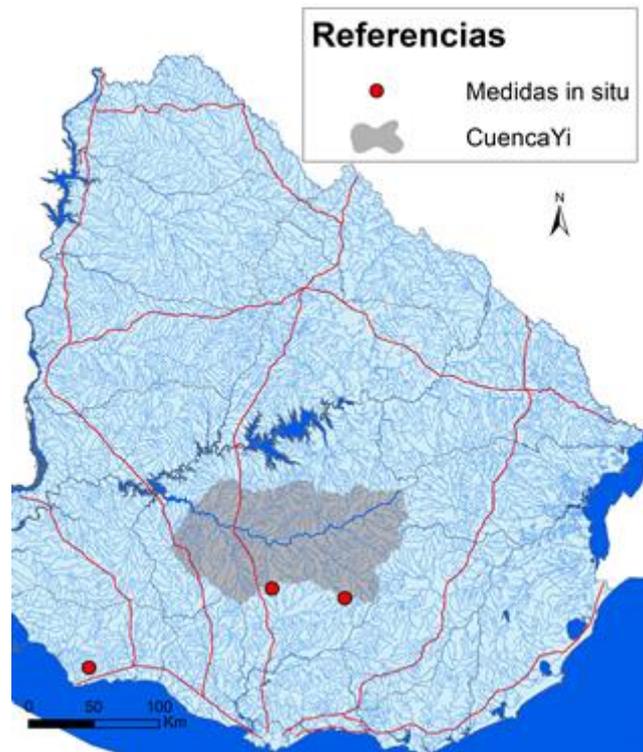


Figura 3-5: Puntos de monitoreo en campo.



Figura 3-6: Sensores TDR instalados en la cuenca del río Yi.

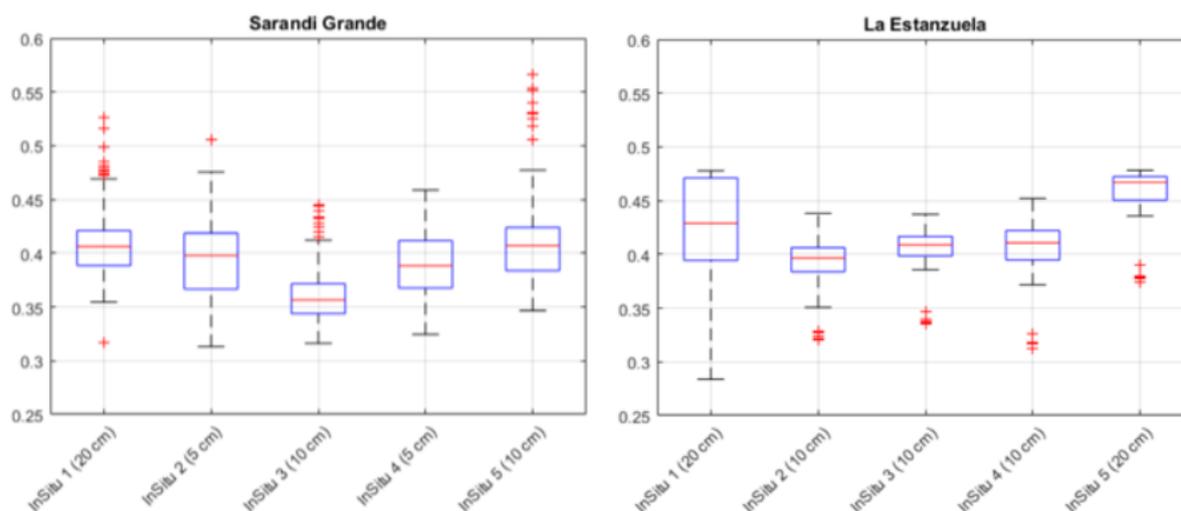


Figura 3-7: Resumen en formato box-plot de los datos de los datos medidos *in situ* a diferentes profundidades. Izquierda Sarandí Grande, derecha La Estanzuela.

3.2.1 Precipitación

Los datos de precipitación utilizados en el presente trabajo corresponden a las series de precipitación diaria registrados en los pluviómetros de influencia de la cuenca en el período 1981-2020, en particular, se utilizan en este trabajo de 2013 en adelante debido a que es el periodo con que se cuentan datos de HS satelital, suministrados por INUMET, UTE e INIA. En la Figura 3-8, se presenta la ubicación de los pluviómetros considerados en el presente trabajo de tesis. La calidad de los datos de estos pluviómetros se evaluó en trabajos anteriores (Silveira et al. 2017). Para realizar la comparación de resultados entre el modelo actual y las modificaciones que se proponen en este trabajo, se utilizan estaciones telemétricas de UTE debido a que son los que está utilizando actualmente el SATI. La serie de precipitación media en la cuenca se obtiene a través de la ponderación según el método de los polígonos de Thiessen. En Figura 3-9, se presenta parte de la serie de precipitación ponderada en toda la cuenca.

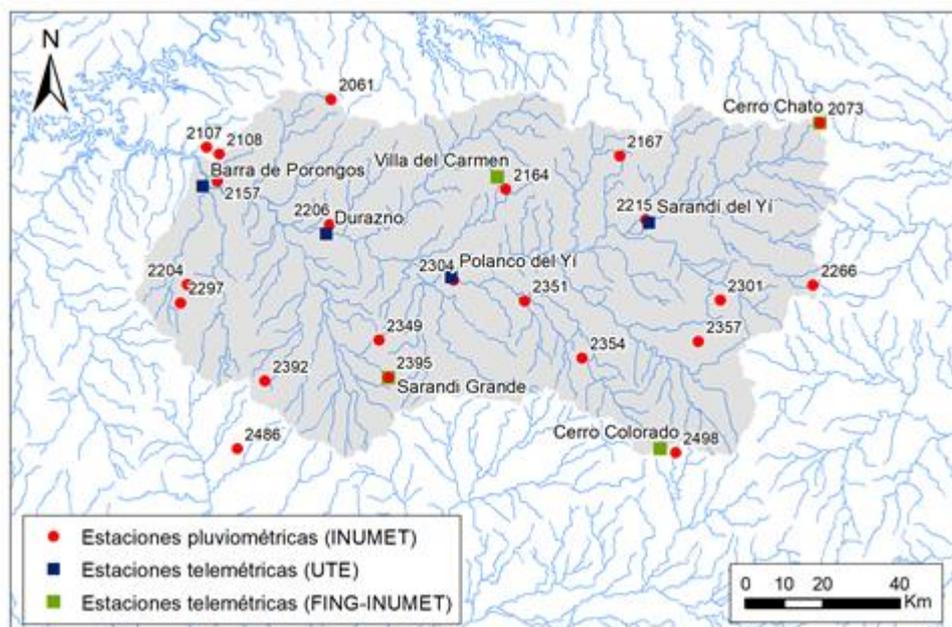


Figura 3-8: Estaciones telemétricas y pluviométricas presentes en la cuenca (Silveira et al. 2017).

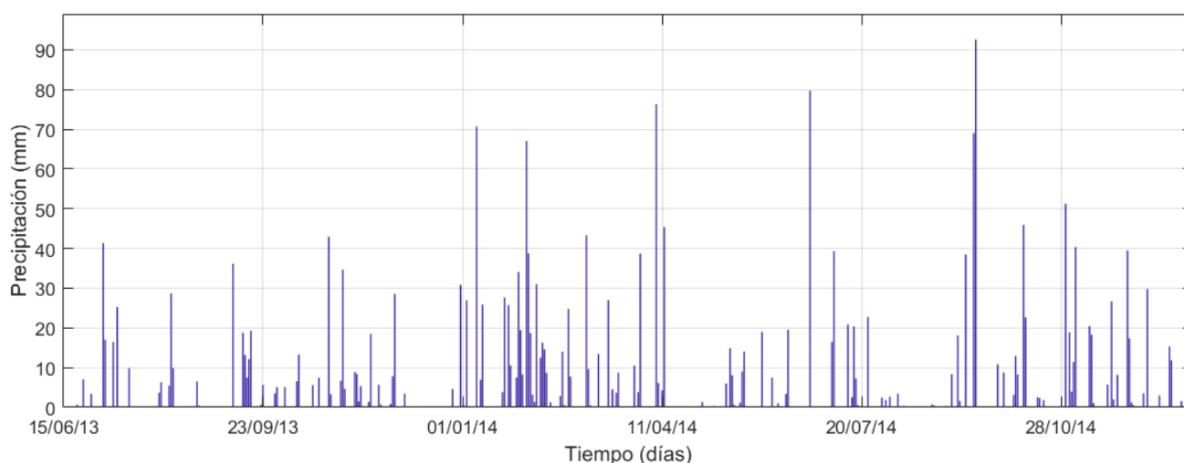


Figura 3-9: Serie de precipitación media en la cuenca. Período 2013-2014.

3.2.2 Nivel

Se cuenta con datos de nivel registrado en las estaciones hidrométricas identificadas en la cuenca (Figura 3-10), suministrados por la DINAGUA y UTE. Las series de nivel correspondientes a cada estación tienen una frecuencia horaria en el período de interés (2013-2020), que corresponde al período con que se cuenta con datos satelitales de HS.

Actualmente existen 4 estaciones telemétricas en la progresiva del río Yi que miden nivel, de las cuales, en este trabajo, se utiliza la información de la estación Durazno. En particular, la estación Durazno se utiliza para la calibración y validación de los modelos hidrológicos continuos. A su vez, los datos de esta estación son los utilizados en la comparación de los eventos modelados ya que el punto de medición corresponde al punto de cierre de la cuenca. Los niveles expresados en el presente trabajo corresponden al cero de la escala de la estación telemétrica Durazno. Se presenta parte de la serie de la estación Durazno en Figura 3-11.

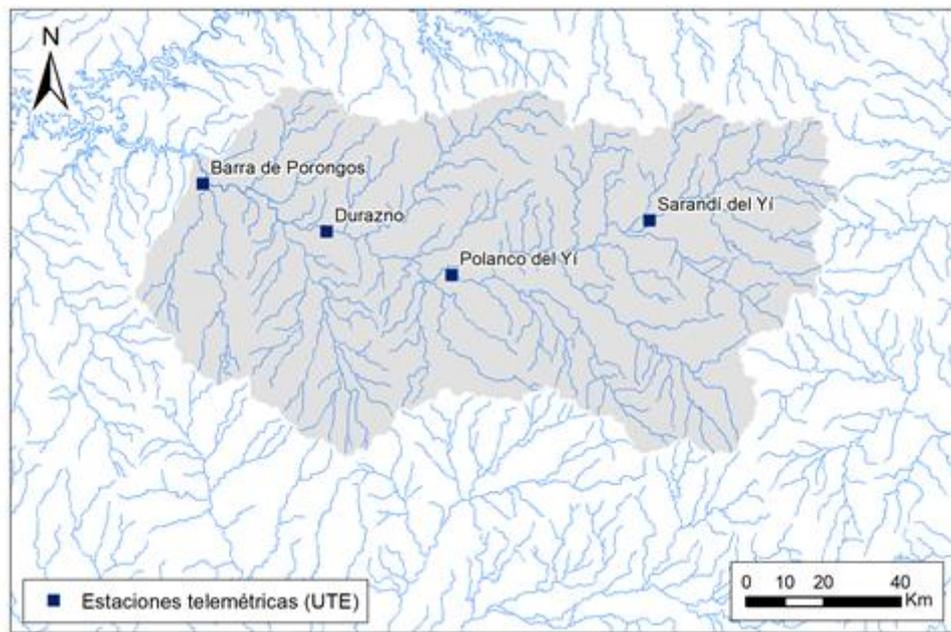


Figura 3-10: Estaciones limnimétricas.

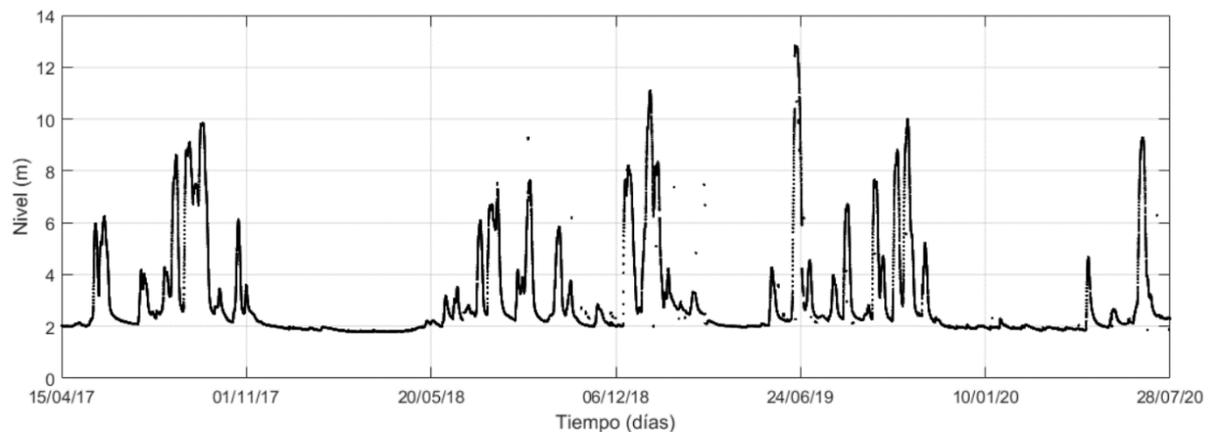


Figura 3-11: Serie de nivel medida en la estación telemétrica Durazno. Período 2017-2020.

3.2.3 Evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración corresponden a la estación INIA Treinta y Tres. Los mismos se calculan mediante la formulación de Penman-Monteith en base a las variables meteorológicas medidas por el INIA. La serie es actualizada diariamente y está disponible para descargar en la web de INIA (INIA GRASS), por lo que se cuenta con un dato diario. Esta información se utiliza en los modelos hidrológicos continuos. El período considerando es el correspondiente a los años desde 2013 hasta 2020, que son los años en los que se cuenta con la información satelital de HS. En Figura 3-13, se muestran tres años de la serie.

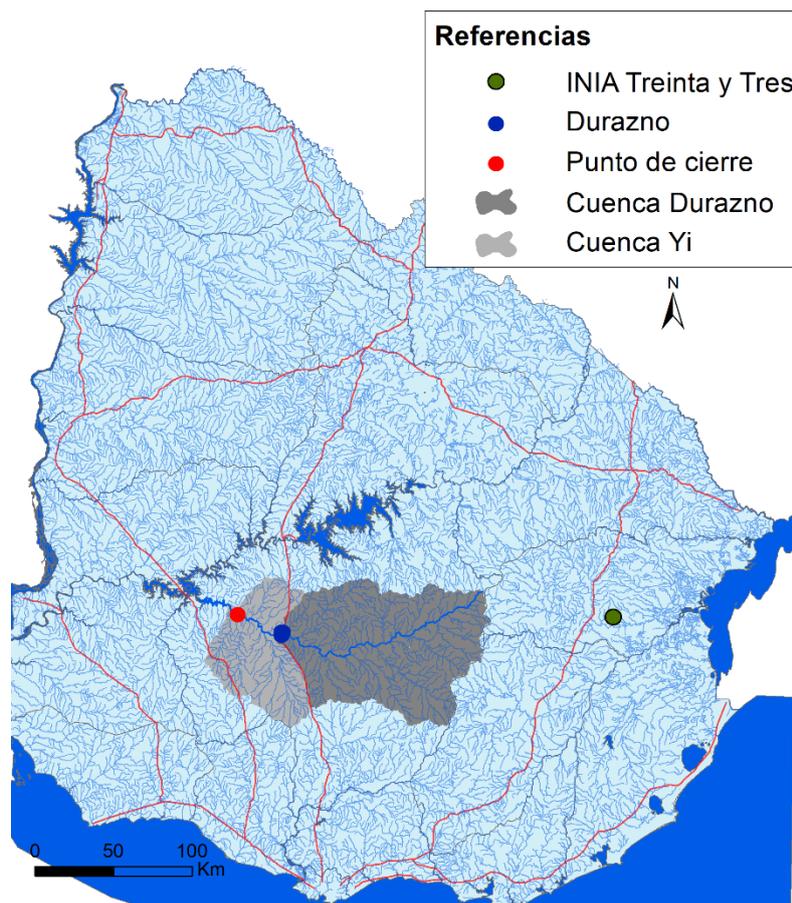


Figura 3-12: Ubicación de la estación Meteorologica INIA Treinta y Tres

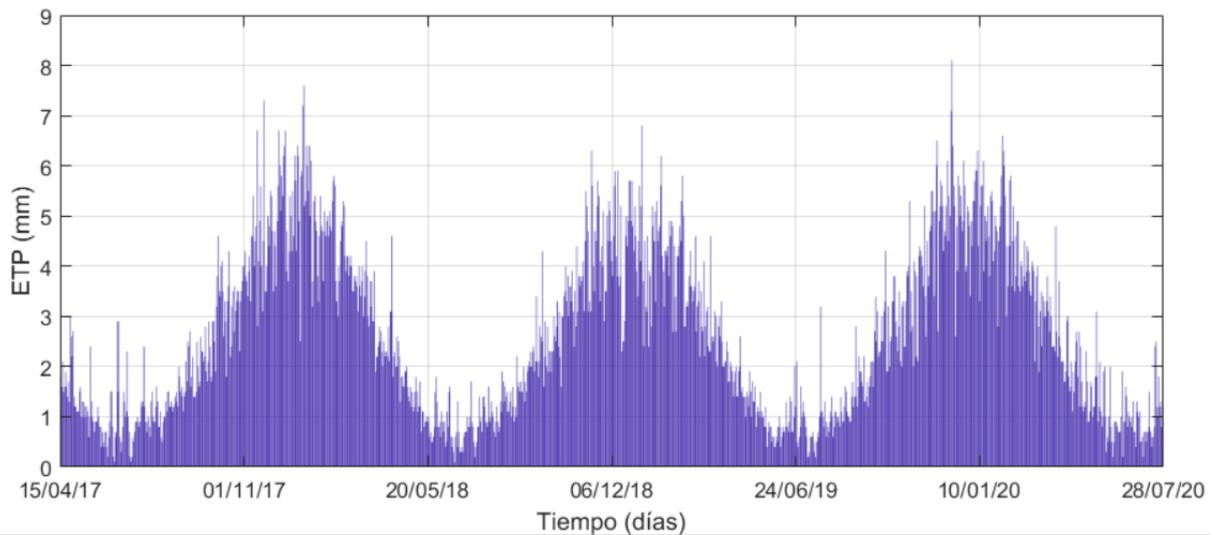


Figura 3-13: Serie de evapotranspiración Penman-Monteith correspondiente a la estación INIA 33. Período 2017-2020.

3.2.4 Información edafológica

La información de suelos se obtiene a partir del mapa de suelos CONEAT (MGAP). A su vez, para este mapa, se cuenta con la información correspondiente a la composición de los suelos en función del porcentaje de limo, arena y arcilla (Molfino 2001). De esta forma, se obtienen las características del suelo en la cuenca, así como se determinan los grupos hidrológicos según la clasificación del NRCS. En Figura 3-14, se presentan los grupos hidrológicos presentes en la cuenca. El grupo hidrológico se utiliza en el modelo propuesto por el NRCS mientras que la determinación de la composición de los suelos obtenida a partir de los grupos CONEAT se utiliza para calcular el agua disponible y la capacidad de campo para el modelo continuo. A su vez, estas variables y la composición del suelo expresado en porcentaje de limo, arena y arcilla son utilizadas en la incorporación de la humedad de suelo como se detalla en la sección 3.5.

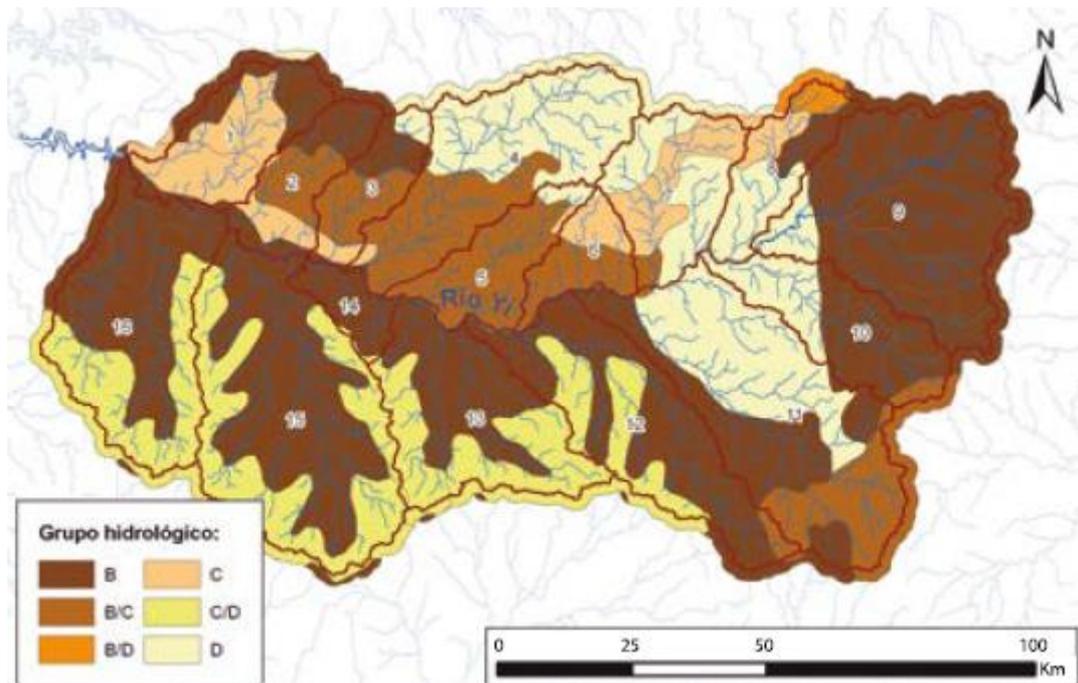


Figura 3-14: Grupos hidrológicos según la clasificación del NRCS presentes en la cuenca (Silveira et al. 2014).

3.2.5 Registro de eventos de inundación

A partir de trabajos anteriores del IMFIA (Silveira et al. 2017), se cuenta con un registro de fechas donde ocurrieron eventos de inundación y características de su magnitud. A su vez este registro se actualizó para el presente trabajo de tesis de manera de contar con una mayor cantidad de eventos registrados hasta la actualidad, se presentan los eventos en Tabla 3-2. Por otro lado, se cuenta con los niveles de riesgo de la ciudad, como puede ser la cota de seguridad o cota de inundación, los mismos se definieron en trabajos anteriores realizados por el IMFIA (Silveira et al. 2017) y se presentan en Tabla 3-3.

Para el caso de los eventos registrados, se verifica que en esas fechas no existan medidas satelitales de HS de los productos seleccionados. Es por esto que el número de eventos se ve reducido para el caso de la misión SMOS. De los 14 eventos que se tienen en este trabajo, 9 tenían datos de la misión SMOS, por lo que 5 no entraron dentro de la comparación. En el caso de ASCAT, se tienen datos para todos estos eventos. Los productos correspondientes a dos misiones son los que se utilizarán en la modelación hidrológica.

Tabla 3-2: Fechas y características de los eventos.

Evento	Inicio-Fin	Estación	Evacuados	Nivel Registrado	HS disponible
Sep-2013	9/9 al 21/9	Invierno	-	9.59	ASCAT
Feb-2014	25/1 al 6/2	Verano	2290	10.69	ASCAT
Abr-2014	5/4 al 17/4	Invierno	-	8.45	ASCAT
Jul-2014	27/6 al 9/7	Invierno	-	9.46	ASCAT
Sep-2014	18/9 al 20/9	Invierno	4420	12.21	ASCAT
Nov-2014	1/11 al 7/11	Verano	-	8.45	ASCAT-SMOS
Dic-2014	22/11 al 28/11	Verano	-	8.80	ASCAT-SMOS
Dic-2016	20/12 al 1/1	Verano	-	7.05	ASCAT-SMOS
Ago-2017	3/8 al 11/9	Invierno	-	9.84	ASCAT-SMOS
Dic-2018	18/12 al 20/12	Verano	-	8.20	ASCAT-SMOS
Ene-2019	8/1 al 14/1	Verano	746	11.09	ASCAT-SMOS
Jun-2019	16/6 al 24/6	Invierno	5000	12.82	ASCAT-SMOS
Oct-2019	5/10 al 19/10	Verano	-	10.00	ASCAT-SMOS
Jun-20	25/6 al 29/6	Invierno	-	9.27	ASCAT-SMOS

Tabla 3-3: Niveles de afectación de la ciudad de Durazno respecto al cero local.

Alerta	Nivel (m)	Observaciones
Aviso	6.83	Corresponde a afectación al camping sobre el río Yí
Seguridad	8.50	Corresponde a la primer vivienda afectada
Afectación sensible	11.14	Corresponde aproximadamente con el área de riesgo medio del Plan Local
Afectación extrema	14.85	Corresponde al mayor evento registrado (mayo de 2007)

3.3 Comparación de humedad de suelo medida *in situ* y satelital

En esta sección, se realiza una breve descripción de cómo se compara la HS medida *in situ* con la información satelital. En primer lugar, se obtienen los datos satelitales a partir de las series de los servidores de la NASA y de los eventos registrados con ASCAT y SMOS. Una vez obtenida la serie, se compara la medida *in situ* y la satelital y se calculan indicadores aptos para verificar el comportamiento de los datos de HS satelital en comparación a los datos medidos *in situ*. Los indicadores elegidos fueron el coeficiente de correlación (r) y el sesgo ($BIAS$) (Eq. 16 y 17). Vale la pena aclarar que para los puntos de medición *in situ*, los registros corresponden a un punto en el espacio y no a un promedio en el espacio como es el caso del pixel del satélite.

$$r = \frac{\sum_1^n [(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (16)$$

$$BIAS = \frac{\sum_1^n (X_i - Y_i)}{\sum_1^n Y_i} \quad (17)$$

3.4 Modelación hidrológica

En esta sección, se presentan los tres modelos hidrológicos utilizados en este trabajo de tesis. En primer lugar, se muestra el caso del modelo del Número de Curva (NC) y, luego, los modelos continuos, GR4J y Geetha. Para estos últimos, se utilizan primero los parámetros calibrados en Chreties et al. 2017 y Narbondo et al. 2020 para Geetha y GR4J respectivamente; luego, se realiza una re-calibración para eventos extremos en ambos casos para poder evaluar si la performance mejora para valores máximos de caudal en los eventos seleccionados. Dicha calibración se realiza con una validación cruzada en un periodo de 7 años (k-fold, con k=7). Para el caso del modelo del NC, se utilizan los valores de NC obtenidos en Silveira et al. (2012).

3.4.1 Método del número de curva (NC)

El método del NC (USDA 2010) es la metodología más utilizada a nivel local y regional para la determinación de precipitación efectiva en eventos extremos. Es un método simple capaz de calcular la precipitación efectiva o escorrentía asociada a un evento extremo de precipitación.

El método asume que la infiltración tiene dos componentes, una donde la tasa de infiltración es mayor o igual a la intensidad de lluvia, lo cual implica que no hay escurrimiento, y otra donde la tasa de infiltración decrece en función del tiempo. De esta forma, se define la abstracción inicial (I_a) y la abstracción continuada (F_a). Es así que el método toma como hipótesis la relación entre estas dos variables y la precipitación (Eq. 18).

$$\frac{P_e}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (18)$$

Siendo P_e la precipitación efectiva y P la precipitación. Aplicando la continuidad del evento, se tiene la Eq. 19

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (19)$$

Definiendo la precipitación efectiva como Eq. 20

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

(20)

Finalmente se tiene que

$$P_e = 0 \rightarrow \text{si } P \leq 0.2S$$

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \rightarrow \text{si } P \geq 0.2S$$

Definiendo $S[L]$ como el almacenamiento máximo de la cuenca, sabiendo que este depende del uso y tipo de suelo y de las condiciones previas de humedad, se puede estandarizar las relaciones definiendo el número de curva como se expresa en Eq. 21.

$$S(mm) = 25.4 \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right) \quad (21)$$

De esta forma se puede tener una precipitación efectiva a partir de una precipitación medida y del número de curva. En Figura 3-15, se presenta la relación entre las mismas graficada.

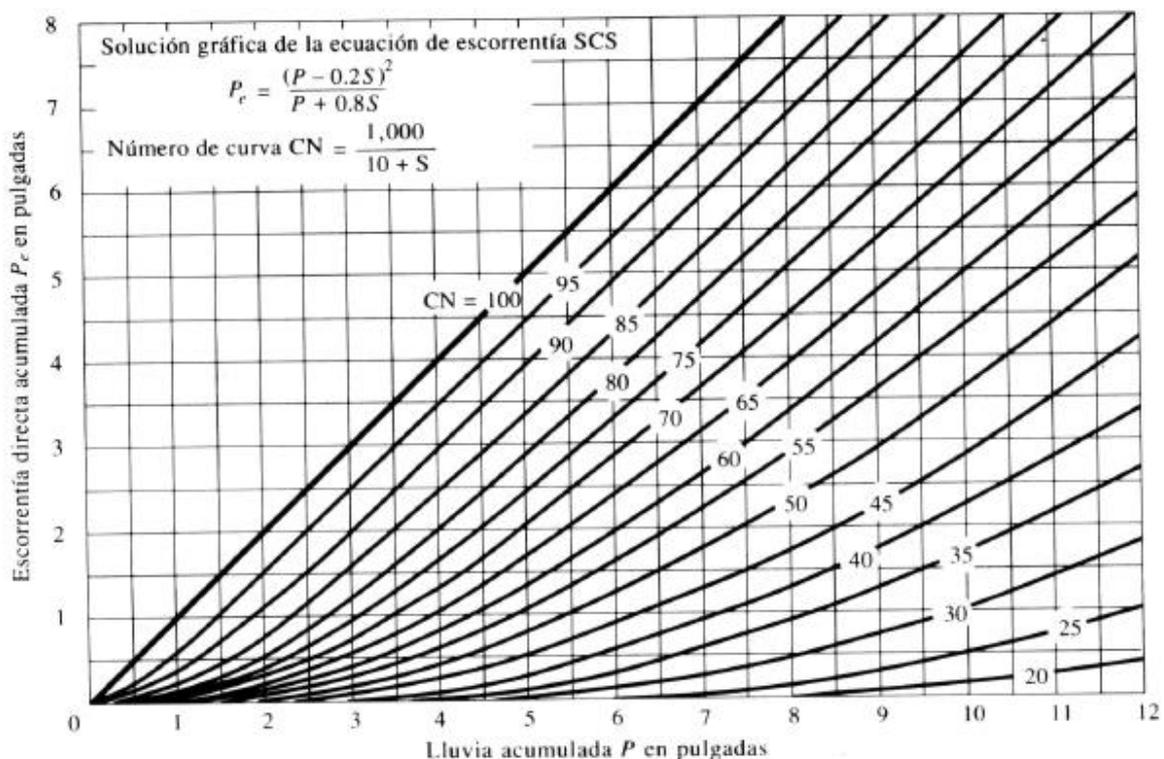


Figura 3-15: Relación entre precipitación, precipitación efectiva y Número de Curva (USDA 2010).

Sabiendo que el NC también depende de la condición de humedad antecedente (AMC por sus siglas en inglés), se definen las condiciones I y III de AMC (Eq. 22 y 23).

$$NC(III) = \frac{23 NC(II)}{10 + 0.13 NC(II)} \quad (22)$$

$$NC(I) = \frac{4.2 NC(II)}{10 + 0.058 NC(II)} \quad (23)$$

Esta variación en el NC se determina en función de la precipitación en los 5 días antecedentes al evento que se busca simular. La cantidad de precipitación que determina el cambio en el NC depende de la estación en la que se dé el evento.

Finalmente cabe aclarar que, según la propuesta del modelo, los pulsos de precipitación son convertidos a hidrogramas de caudal por medio del Hidrograma Unitario Triangular propuesto por el NRCS, mediante el cual modela el tránsito dentro de la cuenca para la generación del hidrograma en el punto de cierre.

3.4.2 Modelo GR4J

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) propuesto y mejorado por Perrin et al. 2003, es un modelo de 4 parámetros, basado en la cuantificación de la humedad del suelo. El mismo toma como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial para luego modelar el almacenamiento en el suelo teniendo en cuenta dos reservorios. El modelo transita una parte del escurrimiento a través de un hidrograma unitario simple, y otra parte, a través otro hidrograma unitario que se almacena en un reservorio no lineal, para luego formar con ambas la esorrentía total (Figura 3-16).

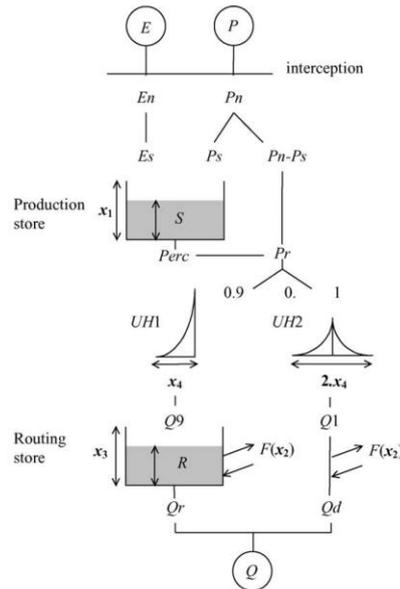


Figura 3-16: Esquema conceptual del modelo GR4J (Perrin et al. 2003).

La estructura del modelo es sencilla y se explicita a continuación. En primer lugar, se determina la precipitación neta (P_n) o la evaporación neta (E_n), dependiendo de si la precipitación (P) es mayor a la evapotranspiración potencial (E) o viceversa:

- Si $P \geq E$ $P_n = P - E$ y $E_n = 0$
- Si $P < E$ $P_n = 0$ y $E_n = E - P$

En caso de que P_n sea mayor a 0, una fracción de la misma (P_s) aporta al reservorio de producción (capa sub-superficial del suelo), la cual es función del contenido de agua en el suelo (S), como se observa en Eq 24.

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (24)$$

En caso contrario, cuando E_n es mayor que 0, se determina la evapotranspiración real (E_s), también en función del contenido de agua en suelo (S) (Eq. 25)

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}$$

(25)

siendo x_1 un parámetro del modelo que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (es decir, del reservorio de producción).

Una vez calculado P_s o E_s , el contenido de agua en el suelo es actualizado con: $S = S - E_s + P_s$.

Luego, se estima la percolación hacia la zona saturada del suelo a partir de Eq. 26 y se actualiza nuevamente el contenido de agua en el suelo.

$$\text{Perc} = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 x_1} \right)^4 \right]^{1/4} \right\} \quad (26)$$

$$S = S - \text{Perc}$$

Finalmente, la escorrentía total (P_r) se calcula como: $P_r = S - \text{Perc}$, la cual es transitada hasta la salida de la cuenca, de acuerdo a lo siguiente:

- El 10% de P_r , correspondiente a la escorrentía directa, se transita a través de un hidrograma unitario simple.
- El 90% restante, correspondiente a la escorrentía subsuperficial o flujo lento, se transita a través de un hidrograma unitario y un posterior reservorio no lineal.

El tiempo base de ambos hidrogramas unitarios se representa a través de un único parámetro (x_4) y la capacidad de almacenamiento del reservorio no lineal constituye otro parámetro (x_3).

Además, el modelo representa un intercambio de agua subterránea, a través de una función dependiente de un cuarto parámetro x_2 .

Se resumen los parámetros en Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Parámetros del modelo de GR4J.

Parámetro	Descripción
x_1 (mm)	Capacidad máxima del primer reservorio
x_2 (mm)	Coefficiente de intercambio con el agua subterránea
x_3 (mm)	Capacidad máxima del segundo reservorio
x_4 (días)	Tiempo base del hidrograma unitario

3.4.3 Modelo Geetha

El modelo propuesto por Geetha et al. (2008), basado en el método del NC, considera 3 tipos de escurrimiento: superficial (SRO), sub-superficial (THR) y flujo base (BF); y 2 reservorios de agua en el suelo: almacenamiento de humedad del suelo (SMS) y almacenamiento de agua subterránea (GWS). Se presenta el esquema del modelo en Figura 3-17.

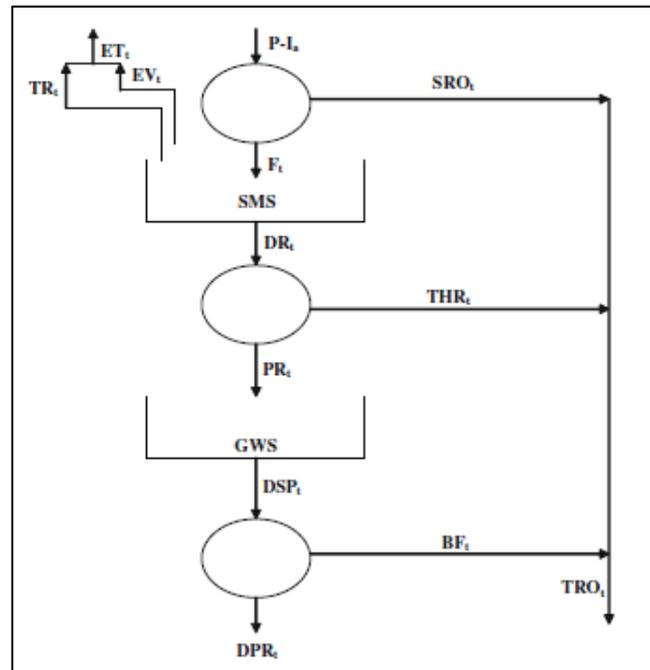


Figura 3-17: Esquema del modelo conceptual de Geetha et al. 2008.

A continuación, se describen las ecuaciones correspondientes a cada paso.

- Cálculo de la escorrentía superficial directa:

En primer lugar, se calcula la escorrentía superficial a partir del método del NC según Eq. 27.

$$RO_t = \frac{Pe_t^2}{Pe_t + S_t} \quad (27)$$

$$\text{Con } Pe_t = P_t - Ia_t S_t = \frac{25400}{NC_t} - 254$$

El cálculo de Ia se realiza en función de la cantidad de días de simulación:

$$Ia_t = \lambda S_t \quad \text{para los primeros 5 días}$$

$$Ia_t = \lambda_1 S_t \left(\frac{P_t}{P_t + S_t} \right)^\alpha \text{ para los días siguientes}$$

Siendo: RO_t la escorrentía superficial del tiempo t

Pe_t la precipitación efectiva del tiempo t

Ia_t la abstracción inicial del tiempo t

λ el coeficiente de abstracción inicial (igual a 0.2)

S_t la capacidad de almacenamiento del suelo en el tiempo t

λ_1 y α parámetros del modelo

Una vez calculada la escorrentía superficial, la misma se transita utilizando el principio de embalse lineal (Mishra y Singh, 2004), obteniendo la escorrentía superficial a la salida de la cuenca (SRO) como se expresa en Eq. 28.

$$SRO_t = b1 \times RO_t + b2 \times RO_{t-1} + b3 \times SRO_{t-1} \quad (28)$$

Siendo: SRO_t y SRO_{t-1} el caudal superficial a la salida de la cuenca en los tiempos t y $t-1$ respectivamente

$b1, b2$ y $b3$ Coeficientes dependientes de K , el coeficiente de almacenamiento de la cuenca, correspondiente a un parámetro del modelo.

- Cálculo de la infiltración de agua en el suelo (Eq. 29)

$$F_t = P_t - Ia_t - RO_t \quad (29)$$

Siendo: F_t la infiltración en el tiempo t

- Cálculo de la evapotranspiración (Eq. 30)

$$ET_t = EV_t + TR_t \quad (30)$$

$$\text{Con } EV_t = \text{PANC} \times \text{EVP}_t \text{ y } TR_t = C1 \times (\text{Sabs} - S_t - \theta_w)$$

Siendo: ET_t la evapotranspiración en el tiempo t

EV_t la evaporación en el tiempo t

TR_t la transpiración en el tiempo t

PANC el coeficiente de tanque

EVP_t la evapotranspiración potencial en el tiempo t , obtenida de datos de campo.

Sabs la capacidad máxima de almacenamiento del suelo

C1 un parámetro del modelo

θ_w el punto de marchitez permanente del suelo.

- Cálculo del drenaje hacia la zona saturada y zona subterránea (Eq. 31)

$$DR_t = C2 \times (\text{Sabs} - S_t - \theta_f)$$

(31)

Siendo: DR_t la tasa de drenaje en el tiempo t

C2 un parámetro del modelo

θ_f la capacidad de campo del suelo

- Cálculo de la escorrentía sub-superficial (32)

$$\text{THR}_t = C3 \times DR_t$$

(32)

Siendo: THR_t la escorrentía sub-superficial a la salida de la cuenca en el tiempo t

C3 un parámetro del modelo

- Cálculo del flujo hacia la zona saturada (33)

$$\text{PRT}_t = (1 - C3) \times DR_t$$

(33)

Siendo: PRT_t el flujo hacia la zona saturada en el tiempo t

- Cálculo del flujo base (Eq. 34)

$$BF_t = BCOEF \times PR_t^E \quad (34)$$

Siendo: BF_t el flujo base de salida de la cuenca en el tiempo t
 $BCOEF$ y E parámetros del modelo

- Pérdida por percolación profunda (Eq. 35)

$$DPR_t = (1 - BCOEF) \times PR_t^E \quad (35)$$

Siendo: DPR_t la percolación profunda en el tiempo t

Una vez calculados los 3 tipos de escorrentía considerados, se calcula la escorrentía total de salida de la cuenca como la suma de las mismas (Eq. 36).

$$TRO_t = SRO_t + THR_t + BF_t \quad (36)$$

Luego, al final de cada día se realiza el balance en la capa sub-superficial del suelo para obtener la capacidad de almacenamiento del suelo, a ser utilizada en el día siguiente (Eq. 37).

$$S_{t+1} = S_t - F_t + ET_t + DR_t \quad (37)$$

De las ecuaciones anteriores se desprende que el modelo cuenta con 8 parámetros calibrables (Tabla 3-5).

Tabla 3-5: Parámetros del modelo de Geetha et al. (2008).

Parámetro	Descripción
λ_1 (-)	Coeficiente para el cálculo de la abstracción inicial
α (-)	Exponente para el cálculo de la abstracción inicial
C1 (-)	Coeficiente transpiración
C2 (-)	Coeficiente drenaje
C3 (-)	Coeficiente de ruteo de flujo subsuperficial
BCOEF (-)	Coeficiente de ruteo del flujo subterráneo
E (-)	Exponente de ruteo del flujo subterráneo
K (días)	Coeficiente de almacenamiento de la cuenca

3.4.4 Re-calibración para extremos

Para los dos modelos, GR4J y Geetha, se realiza una re-calibración para eventos extremos, esto se debe a que los resultados de calibraciones realizadas en trabajos anteriores eran para todo rango de caudal. En la re-calibración, se calibra el modelo hidrológico acoplado con el hidrodinámico comparando los niveles resultantes de la modelación con los niveles medidos mayores a determinado umbral. En este caso, se fija el umbral en 3 metros que es el nivel correspondiente al caudal de bancas (*bankfull discharge*) en el punto de cierre del río Yi. Este nivel es el que llena la sección de río y está estrechamente ligado a la dinámica de la inundación y la morfología del cauce. Este nivel se determinó en Silveira et al. 2017.

Para determinar el rendimiento de los modelos re-calibrados, los indicadores utilizados fueron el coeficiente de correlación (R^2) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). La calibración se realizó en forma manual, con el objetivo de encontrar el paquete de parámetros que mejor ajuste la serie modelada a la observada, en la totalidad del período de calibración para cada cuenca. Para esto, el ajuste tuvo como objetivo maximizar el coeficiente NS, función objetivo, mientras el R^2 se utilizó como indicador de performance. Es decir, que se calibra maximizando el valor de NS, que es de los indicadores más utilizados en modelación hidrológica, y se evalúa además la performance del modelo luego de calibrado también con el R^2 .

En el caso del modelo GR4J, la calibración se limita a modificar los parámetros que no fueron fijados en relaciones con características físicas de las cuencas (según Narbondo et al., 2020), es decir se calibra x_2 y x_3 . El parámetro x_1 que corresponde al agua disponible media de la cuenca y el parámetro x_4 que se determina en función del tiempo de concentración de la cuenca.

Para el modelo de Geetha, la re-calibración se basa en modificar los parámetros λ_1 alfa y C_{coef} que fueron identificados como los más sensibles para cuencas en Uruguay según Chreties et

al 2017. En base a esto, se modifican estos parámetros del modelo hasta encontrar el paquete que mejor ajusta a la serie medida.

Cabe destacar que la re-calibración para ambos modelos se realiza con una lógica de validación cruzada donde, en un periodo de 7 años, se particiona la serie dejando un lapso que oficie como validación, en este caso un año. Este procedimiento se repite hasta que se complete que todos los años sean utilizados como validación. Una vez que se realiza este procedimiento, se selecciona el paquete de parámetros que mejor ajusta a la serie medida.

3.5 Incorporación de datos de humedad de suelo medida con satélite en la modelación hidrológica

En esta sección, se presenta la forma en la cual se incorpora la información obtenida a partir de los diferentes productos satelitales en la modelación hidrológica para los diferentes modelos. En primer lugar, se muestra el caso del modelo del NC y, luego, los modelos continuos, GR4J y Geetha. A posteriori, se compara la aplicación de los diferentes productos para los modelos y, finalmente, se incorpora la humedad en los modelos continuos para todo el reservorio subsuperficial según dos proposiciones diferentes, una basada en las ecuaciones que rigen el comportamiento de la HS y el otro en base al filtro empírico. Ambos métodos son presentados en Sección 2.2.3.

Tanto para los modelos continuos como para el modelo de eventos, para la incorporación de la HS satelital se utilizan los productos de ASCAT y SMOS. Para esto, en ambos casos al tratarse de modelos concentrados que trabajan a escala de cuenca, se utilizan datos de humedad promedio en las mismas. Esta humedad promedio se calcula mediante el procesamiento de los datos satelitales en un sistema de información geográfica para luego ser utilizada en los modelos.

3.5.1 Incorporación de HS en el modelo de eventos

En primer lugar, para el modelo del NC se plantea la posibilidad de tomar el NCII, como una función explícita del contenido de HS cuando se tenga esta medida a partir de las propuestas recogidas en Verma et al. 2017. De esta manera, se tiene un NC variable que depende de la actualización del estado de la humedad en la cuenca. Esta relación queda dada por la siguiente formulación (Eq. 38)

$$NC_t = NC(\theta_t) = NC(I) + (NC(III) - NC(I)) \left(\frac{\theta_t - \theta_{pwp}}{\theta_{fc} - \theta_{pwp}} \right) \quad (38)$$

Siendo θ_t el contenido de humedad de suelo, θ_{pwp} el punto de marchitez permanente y θ_{fc} la capacidad de campo. Es así que para cada actualización del dato de humedad se actualiza el NC y se calcula la precipitación efectiva.

Por otro lado, se utiliza la corrección por humedad antecedente propuesta por el modelo donde, en función de la precipitación en los 5 días antecedentes, se corrige el número de curva a NC(I) o NC(III) como se describe en la sección anterior. Si bien esta formulación no tiene en cuenta la humedad de suelo satelital, si es una forma indirecta de tener en cuenta el estado de humedad antes del inicio del evento.

A su vez, se calcula el Índice de Precipitación Antecedente (API, mm). El mismo es un indicador del contenido de HS en un momento dado; se calcula a partir de la acumulación de la precipitación ocurrida en días previos y las pérdidas por evapotranspiración. La expresión del índice API para el instante t tiene la siguiente forma (Eq. 39) (Kohler and Linsley, 1951):

$$API_t = \gamma \cdot API_{t-1} + P_t \quad (39)$$

Donde P_t es la precipitación (mm) acumulada en el intervalo $[t-1, t]$ de 24 horas de duración, y γ es un coeficiente adimensional de decaimiento contempla las pérdidas de humedad como podría ser por evapotranspiración. A partir del cálculo del API, se puede calcular un valor de humedad de suelo (Eq. 40).

$$\theta_t = \theta_{pwp} + (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \frac{2}{\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{API}{\phi} - \operatorname{shift} \right) \quad (40)$$

Siendo ϕ y shift son dos parámetros ajustables.

Finalmente, se propone realizar una propuesta más de incorporación de humedad en la cual se combina el uso del dato satelital y el del API. De esta forma, la propuesta se compone de utilizar el producto satelital en los momentos en que hay dato del satélite, y completar los días donde no hay producto satelital con el dato correspondiente a API.

En todos los casos en los cuales se utiliza HS o API, se modifica el número de curva según lo propuesto en Eq. 38. De esta manera, se tiene un NC dependiente de la humedad y variable según la condición antecedente.

3.5.2 Incorporación de HS en la modelación continua

Para el caso de Geetha y GR4J, se toman el filtro Soil Water Index (SWI) propuesto por Wagner et al. 1999 y mejorado Albergel et al. 2008 y las simplificaciones para integración de la ecuación de Richards en la vertical propuestas en Koster et al. 2000 y Ducharne et al. 2000. En ambos casos, se propone utilizar las formulaciones para incorporar la HS en los reservorios correspondientes en cada modelo, S en el caso de Geetha y el primer reservorio correspondiente al agua disponible en el modelo GR4J. Vale aclarar que el contenido de HS se termina expresando en función del agua disponible en los dos modelos.

Para el primer caso, se toma el dato de HS y se calcula el dato en toda la zona radicular siguiendo la formulación propuesta en Wagner et al. (1999). Dicha formulación relaciona el valor de la HS en los primeros centímetros con el valor de todo el horizonte correspondiente a la zona radicular y se expresa según Eq. 41.

$$SWI(t_n) = \frac{\sum_i^n ms(t_k) e^{-\frac{t_n - t_k}{T}}}{\sum_i^n e^{-\frac{t_n - t_k}{T}}} \quad (41)$$

Siendo t el paso temporal, ms la humedad satelital y T es el parámetro que representa la duración característica del proceso, es decir la escala de tiempo de la variación de HS en la capa a determinar. El subíndice k indica el tiempo en el cual se cuenta con el último dato de HS.

Para el caso de la simplificación de la ecuación de Richards, se toman en cuenta las relaciones expresadas en Digman 2002, entre el potencial matriz y la HS para el perfil de equilibrio, a su vez se toman los valores de los parámetros de las ecuaciones definidos en Clapp and Hornberger (1978). Estos parámetros, dependientes de la composición de arena, arcilla y limo de los suelos, pueden ser determinados para cualquier suelo de Uruguay en base a la clasificación realizada por Molino (2001). Es así que se presenta que la humedad para una profundidad z se puede escribir según Eq. 42.

$$w(z) = \left(\frac{\psi_s - z}{\psi_s} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (42)$$

Donde $w(z)$ es el grado de saturación a una distancia z por encima del nivel freático, ψ_s es el potencial matriz de saturación y b es un parámetro de los suelos que depende de la composición del mismo y se determina según Clapp and Hornberger (1978).

De esta forma, según Koster et al. (2014), se puede integrar $1 - w(z)$ en la vertical teniendo en cuenta lo anterior y de esta manera llegar a una expresión para la humedad en función de la profundidad.

3.6 Resumen de modelos y propuestas de incorporación de humedad

En esta última sección de este capítulo, se realiza un breve resumen de los modelos utilizados con las diferentes formas de incorporar la HS en cada caso. De esta manera, se busca ordenar lo realizado desde el punto de vista de la modelación, para hacer más simple la comprensión de los resultados. En la Tabla 3-6, se presentan todas las propuestas de modelos numerados con una breve descripción y las correspondientes observaciones.

Para el caso de los modelos de eventos, se pueden agrupar los mismos en el modelo actual (1), que es el modelo como está funcionando en este momento (considerado como *baseline* para este trabajo). Luego, se presenta el modelo H_{ant} (2) que corresponde al modelo del NRCS con la corrección por humedad antecedente, correspondiente a la precipitación en los 5 días previos. Se presenta a su vez las variables de la incorporación de HS en el modelo de eventos con ASCAT (3) por un lado y con SMOS (4) por otro. Por otra parte, se observan los resultados del modelo con la incorporación de la HS calculada mediante el índice de precipitación antecedente (API, 5), las siguientes dos propuestas corresponden a la combinación de API + Información satelital, en primer lugar, agregando el producto de ASCAT (6) y luego el de SMOS (7). Finalmente, se calculan los resultados para los casos de fijar el NC en NC(I) (8) y NC(III) (9) para obtener los resultados más extremos que se podrían obtener con el modelo.

En cuanto a los modelos continuos, se tiene en ambos casos la propuesta del modelo con la re-calibración para extremos y dos propuestas más correspondientes a las diferentes formas de incorporar la HS. De esta forma, se tienen tres propuestas por modelo totalizando un número de modelos continuos de seis. A su vez, se tiene que para cada modelo y cada propuesta de incorporación de HS se evalúa la performance de ASCAT y SMOS. En primer lugar, entre estos, figura la re-calibración para el modelo GR4J (10). Luego sus variantes según incorporación de HS y producto satelital (11 al 14). Finalmente se presenta el modelo Geetha re-calibrado (15) y sus variantes de incorporación de HS y producto satelital empleado (16 a 19).

Tabla 3-6: Resumen de modelos y propuestas de incorporación de humedad de suelo.

Numero id	Modelo	Descripción
1	Modelo actual	Configuración actual del modelo SATI.
2	H Antecedente (H_{ant})	Proposición del NRCS de corrección de NC por precipitación antecedente, correspondiente a la precipitación en los 5 días previos.
3	Modelo Eventos + ASCAT	Modelo del NRCS variando NC en función del producto de humedad de ASCAT.
4	Modelo Eventos + SMOS	Modelo del NRCS variando NC en función del producto de humedad de SMOS.
5	API	Modelo del NRCS variando NC en función de la humedad de suelo calculada con API.
6	Modelo Eventos + ASCAT+API	Modelo del NRCS variando NC en función del producto de humedad de ASCAT y API cuando no hay dato satelital.
7	Modelo Eventos + SMOS+API	Modelo del NRCS variando NC en función del producto de humedad de SMOS y API cuando no hay dato satelital.
8	NC I	Proposición del NRCS de corrección de NC a condiciones secas.
9	NC III	Proposición del NRCS de corrección de NC a condiciones húmedas.
10	GR4J	Modelo continuo GR4J.
11	GR4J HS Dig ASCAT	Modelo continuo GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT con la simplificación de la ecuación de Richards.
12	GR4J HS Filtro ASCAT	Modelo continuo GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.
13	GR4J HS Dig SMOS	Modelo continuo GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS con la simplificación de la ecuación de Richards.
14	GR4J HS Filtro SMOS	Modelo continuo GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.
15	Geetha	Modelo continuo Geetha.
16	Geetha HS Dig ASCAT	Modelo continuo Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT con la simplificación de la ecuación de Richards.
17	Geetha HS Filtro ASCAT	Modelo continuo Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.
18	Geetha HS Dig SMOS	Modelo continuo Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS con la simplificación de la ecuación de Richards.
19	Geetha HS Filtro SMOS	Modelo continuo Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

3.7 Modelo Hidrodinámico

El modelo hidrodinámico utilizado, como ya se mencionó en antecedentes, es el modelo correspondiente al SATI-Durazno. El mismo consiste en el acople de los modelos hidrológicos al modelo hidrodinámico implementado en HEC-RAS (USACE 2010), que resuelve las ecuaciones de la dinámica del flujo a lo largo del cauce y la planicie de inundación en una dimensión. La cuenca del río Yí se divide en subcuencas de aporte donde se realiza la modelación hidrológica (Figura 3-18). Los hidrogramas resultantes de la misma son utilizados como forzantes del modelo hidrodinámico, mientras que como condición de borde aguas abajo se pone como condición el tirante normal del último tramo del cauce.

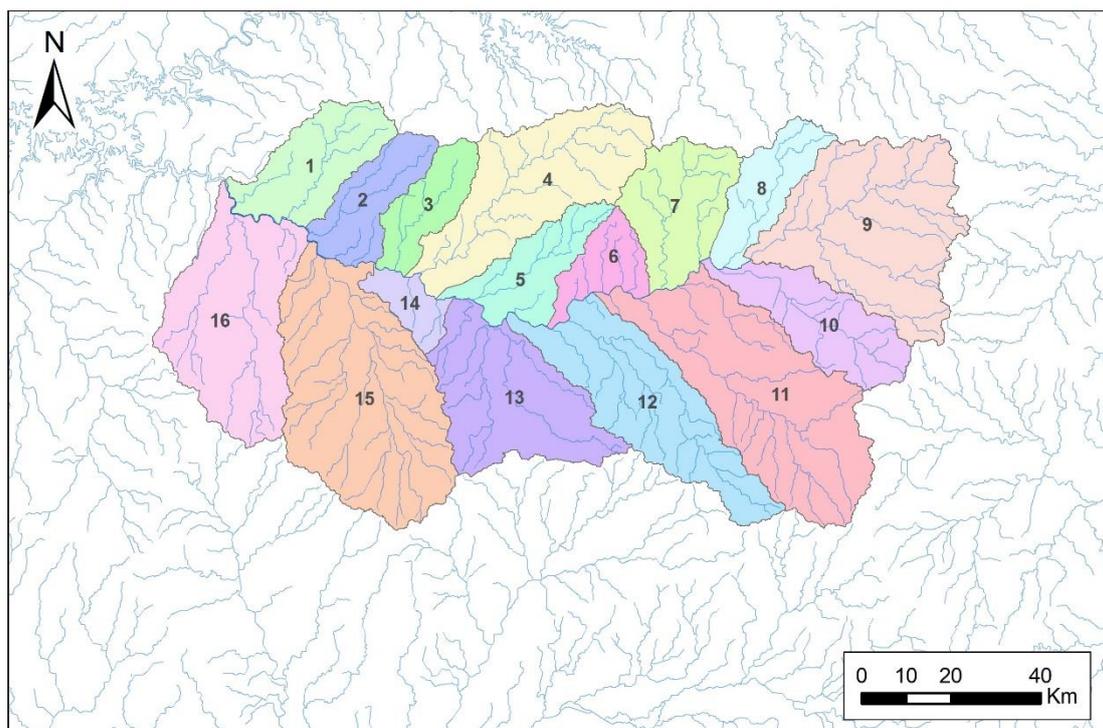


Figura 3-18: Subcuencas de aporte al río Yí (Silveira et al. 2017).

El modelo fue calibrado y validado en el principal antecedente de este trabajo de tesis (SATI-Durazno) utilizando el modelo acoplado comparando los niveles simulados con los medidos en Durazno. En ese caso, se realizó una calibración de los parámetros hidrológicos más importantes que entran en el modelo del NRCS donde se modificaron el NC y el tiempo de concentración de la cuenca. En Tabla 3-7, se presentan los resultados para cada subcuenca. A su vez, en el mismo trabajo, se calibran los parámetros del modelo hidrodinámico, por lo que se modifica el coeficiente de rugosidad de Manning correspondientes al cauce y a la planicie de inundación de manera de tener las menores diferencias entre los niveles medidos y los simulados en la ciudad de Durazno. Los resultados de la calibración se presentan en Tabla 3-7 y Tabla 3-8.

Tabla 3-7: Tiempo de concentración y Numero de Curva calibrados.

Subcuenca	Tc (hs) (AMC II)	NC (AMC II)
1	41.1	94.8
2	60.4	85.0
3	58.8	86.0
4	84.0	95.2
5	61.9	83.9
6	18.1	83.3
7	42.1	99.0
8	42.4	95.0
9	82.4	82.8
10	43.3	94.8
11	67.6	94.4
12	97.2	84.4
13	69.1	86.0
14	14.8	85.0
15	95.0	86.0
16	79.1	85.0

Tabla 3-8: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning calibrados.

Número de Manning	Cauce	Planicie
	0.05	0.15

3.8 Evaluación y comparación de los modelos

En cuanto a la evaluación de los modelos utilizados y las diferentes propuestas de incorporación de HS, se plantean diferentes opciones. En primer lugar, cabe aclarar que las comparaciones de nivel, así como el cálculo de los indicadores, en todos los casos refieren al acople de los modelos hidrológicos, en sus diferentes versiones, y al hidrodinámico, observando los resultados en una determinada sección del modelo, ubicada en la ciudad de Durazno. Esta sección es la correspondiente al punto de medición de niveles de la estación telemétrica Durazno (Figura 3-10).

Para el caso de los modelos continuos y sus respectivas calibraciones, se evalúan la performance de estos con los mismos indicadores utilizados en la re-calibración para el caso de la comparación modelo a modelo con los niveles medidos en Durazno, NS y R². Por otro lado, en el caso de los modelos de eventos, al tratarse de eventos puntuales, aislados temporalmente, carece de validez una evaluación de performance para series continuas. Es por ello que se trabaje con indicadores específicos para la modelación de eventos y se opte

por una estrategia diferente para la evaluación y comparación de todos los modelos continuos y de eventos juntos.

Por un lado, se toman dos variables de interés en el caso de sistemas de alerta de inundaciones, que son el nivel pico y el tiempo al pico. Estos valores corresponden al máximo valor de nivel registrado en cada evento y al tiempo en horas en el que se da ese valor. De esta forma, se tiene para cada modelo y para cada propuesta de incorporación de HS, un valor de nivel y tiempo al pico por evento. Para estos, en primer lugar, se comparan los resultados obtenidos de las modelaciones con los datos correspondientes a estas variables registradas en la estación telemétrica. Estas dos variables que de ser acertadas en su pronóstico, son claves para los SATI y a su vez la mejora en la previsión de ambas o una de ellas constituye una mejora en el SATI.

A su vez, se calculan diferentes indicadores para poder evaluar cada modelo y, a su vez, tener herramientas para comparar los modelos entre sí. Los indicadores utilizados son el error medio cuadrático (RMSE), el coeficiente de correlación (R^2) y el valor absoluto de la diferencia de nivel medido y simulado (DifAbs). De esta manera, se tiene un paquete de indicadores para cada variable que permite tener una primera aproximación a la proximidad de los modelos con las variables registradas.

Por otro lado, para lograr discernir qué modelo o qué conjuntos de modelos se asemejan más a los valores registrados, se realiza para cada variable (tiempo y nivel pico) un análisis de agrupamiento teniendo en cuenta dos técnicas de agrupamiento, clúster jerárquico y t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) (lineal y no-lineal, respectivamente) (van der Mateen and Hinton, 2008). Esto bajo la hipótesis que los modelos que quedaran agrupados por las técnicas con los datos medidos serán los modelos que muestren mayor similitud con los registrados. Una vez analizados los agrupamientos, se puede cuantificar la distancia de cada modelo a las variables registradas. De esta manera, se puede determinar qué modelo se asemeja más a lo medido.

La elección de la técnica t-SNE para realizar el análisis de agrupamiento además del clúster jerárquico, se basa en que ha sido establecido por varios investigadores que las técnicas lineales de agrupamiento están limitadas por la asunción de linealidad. Si bien esto no implica que las técnicas tradicionales, como clúster jerárquico, carezcan absolutamente de validez, la hipótesis de linealidad no es estrictamente correcta para el caso de los procesos lluvia-escorrentía. Por esta razón, últimamente, las técnicas no lineales han tenido particular atención por parte de los investigadores en temas ambientales (van der Maten, 2009). Entre estos métodos, t-SNE se utilizó en este trabajo, ya que es capaz de detectar información oculta en bases de datos no lineales, como pueden ser los resultados de este estudio.

3.8.1 Técnica de agrupamiento lineal: clúster jerárquico

El análisis de clústers tiene por objetivo agrupar objetos (datos) por similitud en grupos o conjuntos de tal forma que los individuos del grupo tengan características similares. En

particular, los métodos jerárquicos buscan agrupar objetos para formar un clúster nuevo o separar los objetos para generar otros clústers de manera que a medida que se va efectuando esta separación o unión se minimice alguna distancia o se maximice alguna medida de similitud (Wilks, 2011). Vale aclarar que, con la metodología de clúster jerárquico, las decisiones que se toman en una etapa se mantienen hasta el final, por lo que dos elementos que se juntan no se vuelven a separar o viceversa. Los métodos jerárquicos se dividen en dos tipos, divisivos y aglomerativos, que difieren en la manera en la que se generan los clusters de la siguiente manera (Wilks, 2011):

- Los métodos aglomerativos parten de un número de conjuntos igual al número de elementos y van "juntando" individuos de manera de formar grupos. Primero se agrupan los individuos más cercanos y luego los aglomerados de mayor cercanía. La cantidad de aglomerados va decreciendo hasta llegar a uno solo.
- Los métodos divisivos conforman el proceso inverso al anterior, se comienza por un conjunto en donde se encuentren todos los elementos y se va particionando para formar subconjuntos más pequeños. En la primera división, se separan los dos aglomerados con mayor cohesión interna y separación externa. Se continúa el proceso hasta tener tantos grupos como se determine, siendo el máximo el número de individuos.

En particular, para este estudio se trabaja con la primera utilizando el método de Ward para unir los clusters. El mismo es un procedimiento mediante el cual se unen los clústers que tengan el menor incremento en el valor total de la suma de los cuadrados de las diferencias de cada individuo al centroide del clúster.

3.8.2 Técnica de agrupamiento no-lineal: t-SNE

t-SNE es una técnica no supervisada diseñada para la visualización de conjuntos de datos de alta dimensionalidad que permite visualizar los datos en dos o tres dimensiones de manera clara (reducción de dimensiones). La técnica es una variación de Stochastic Neighbor Embedding (Hinton and Rowies, 2002) pero más simple de optimizar. La misma aplica una técnica no lineal para la disminución de la dimensionalidad donde el foco está en mantener los puntos similares juntos y cerca en el espacio de menor dimensión. Para esto preserva la estructura local de los datos en el espacio de mayor dimensión en el de menor utilizando una distribución t-Student (van der Mateen and Hinton, 2008).

La técnica comienza construyendo una distribución de probabilidad sobre parejas de datos en el espacio original de forma tal que las parejas de datos semejantes tienen probabilidad alta de ser elegidas, mientras que los pares más diferentes tienen una probabilidad baja de ser elegidos. La densidad de probabilidad de un par de puntos es proporcional a su similaridad, por lo que la probabilidad condicionada de dos datos cercanos será relativamente alta en relación a dos datos que estén separados (van der Mateen and Hinton, 2008).

Luego se pasan los datos desde la dimensión mayor al espacio de menor dimensión basándose en la similaridad por parejas en el espacio de dimensión mayor. Usualmente se pasa a un espacio de dimensión dos o tres para la representación. Una vez realizado esto, se busca la mejor representación para la dimensión menor en base a minimizar la divergencia de Kullback-Leibler. Finalmente se utiliza la distribución t-Student para calcular la similaridad entre dos puntos en el espacio de menor dimensión (van der Mateen and Hinton, 2008).

3.9 Análisis costo-beneficio de incorporar humedad de suelo en SATI-Durazno

El análisis costo-beneficio de la incorporación de la HS en la modelación hidrológica para el caso de SATI Durazno se basa en estudios antecedentes realizados para poder cuantificar los costos asociados a las inundaciones en Durazno (Silveira et al. 2017) y a partir de estos poder cuantificar los beneficios obtenidos asociados a una mejora en el pronóstico, ya sea en el tiempo pico o en el nivel pico. Estos estudios utilizaron una metodología de cuantificación del daño (CEPAL 2014). A su vez, se busca determinar los costos asociados a las mejoras y de esta manera calcular la relación costo-beneficio. Todo el análisis se realiza desde el punto de vista económico (costos).

Para cuantificar los costos asociados intrínsecamente a la incorporación de los productos satelitales en la modelación correspondiente del SATI, se identificaron los requerimientos necesarios para la implementación operativa. De esta forma, se tienen valores estimados de los costos actualizados para poder tener una relación de los mismos respecto a los beneficios calculados. Dentro de los costos asociados, se tienen en cuenta los siguientes:

Costos

- Costos asociados a los datos
 - Frecuencia de actualización
 - Complejidad de asimilación
- Recursos
 - Variación en el tiempo de ejecución del modelo
 - Recursos de hardware necesarios
 - Recursos de software necesarios
 - Capacitación de usuarios u operados

En cuanto a los beneficios, se identifican principalmente dos, uno asociado a la mejora en el pronóstico del nivel pico y otro asociado a la mejora en el pronóstico del tiempo pico. Para el análisis se selecciona dentro de todas las propuestas de incorporación de HS la que obtiene los mejores resultados para estas dos variables y a partir de los resultados de esta propuesta se realiza la comparación con el modelo actual. Esto permite determinar para cada evento una diferencia cuantitativa entre el modelo actual y la propuesta de incorporación de HS, para las variables tiempo al pico y nivel pico. De esta forma dándole un valor económico a estas

diferencias se logra cuantificar el beneficio. A continuación, se resumen los beneficios identificados.

Beneficios

- Beneficios asociados a la performance del modelo
 - Mejora en el pronóstico del tiempo pico
 - Mejora en el pronóstico del nivel pico

La cuantificación de los beneficios desde el punto de vista económico se basa en las pérdidas ocasionadas por las inundaciones para la ciudad de Durazno. En este aspecto, se realizaron varios trabajos a nivel local en los cuales se cuantifica, desde el punto de vista económico, el costo generado por las crecidas del río Yí. Dentro de estos trabajos, se destaca el realizado por un equipo de Facultad de Arquitectura donde se actualizaron al año 2017 los costos directos e indirectos por día y por afectados asociados a las inundaciones en Durazno (Anexo III; Silveira et al. 2017).

De esta forma, al tener el costo asociado a los daños provocados por inundación por persona, se puede determinar, conociendo la población que se ve afectada para una determinada cota, el costo de que una inundación llegue dicha cota. Es por esto que se realiza una cuantificación de la población por cota para la ciudad de Durazno. Para ello, se trazan las curvas de inundación correspondientes a cada cota (Figura 3-19), con las cuales se determina el área urbana afectada (Figura 3-20). Una vez obtenida el área afectada, se calcula la población que habita dicha área, con la densidad de población de la ciudad, publicada en el último censo realizado en el país (INE 2011). Dicha población se corrige en base a las cotas donde no hay afectación, según lo determinado en Silveira et al. 2017.



Figura 3-19: Mancha de inundación correspondiente a la cota 15 respecto al cero local.

Una vez obtenidos los desplazados por cota, se determina el costo asociado por cota como el producto entre la cantidad de afectados y el costo por día por desplazado. A partir de esto se puede construir una curva cota-costo que indique la variación de este último en función de la cota (Figura 3-21). Una vez obtenida esta curva, se puede, mediante un ajuste, obtener la relación entre estas dos variables y de esta forma poder determinar a partir de una cota dada el costo asociado a la misma.

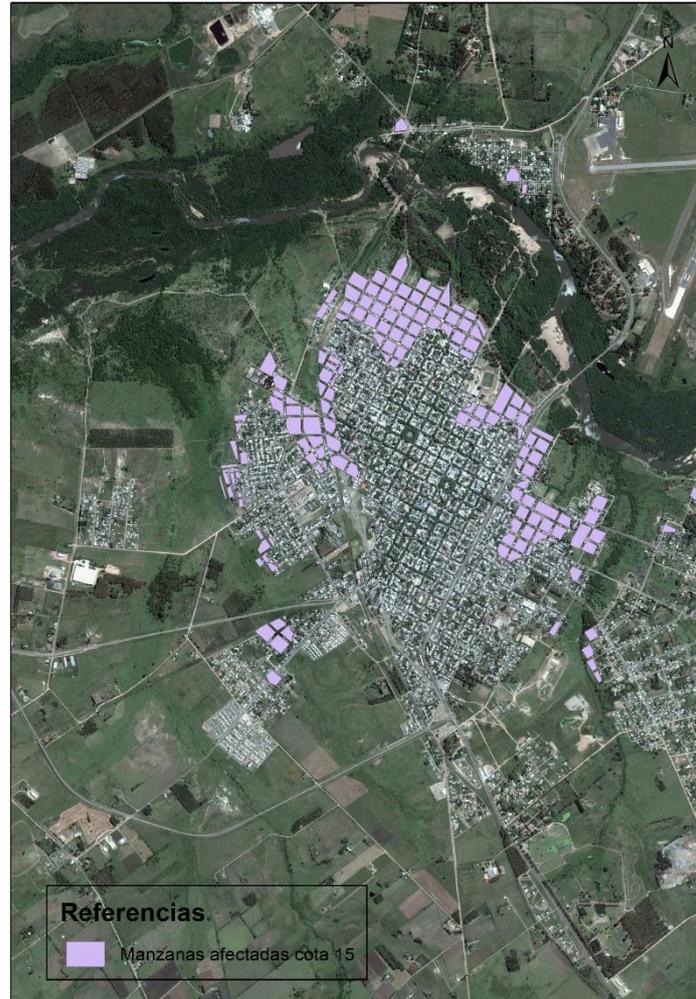


Figura 3-20: Manzanas afectadas por una inundación correspondiente a la cota 15 respecto al cero local.

Es así que se obtiene la relación presentada en la Eq. 43, con la cual se determina el costo asociado a cada evento de crecida estudiado en el presente trabajo. De esta forma para cada uno de los eventos, se obtiene el valor económico de los daños ocasionados por el mismo, así es que teniendo además el valor del pronóstico del modelo actual y de cualquier de los modelos que incorporan HS, se puede calcular la diferencia entre los mismos y el nivel medido para, de esta forma, cuantificar el beneficio que podría significar tener un pronóstico más acertado.

$$Costo(z) = 1 \times 10^{-7} z^{12} \quad (43)$$

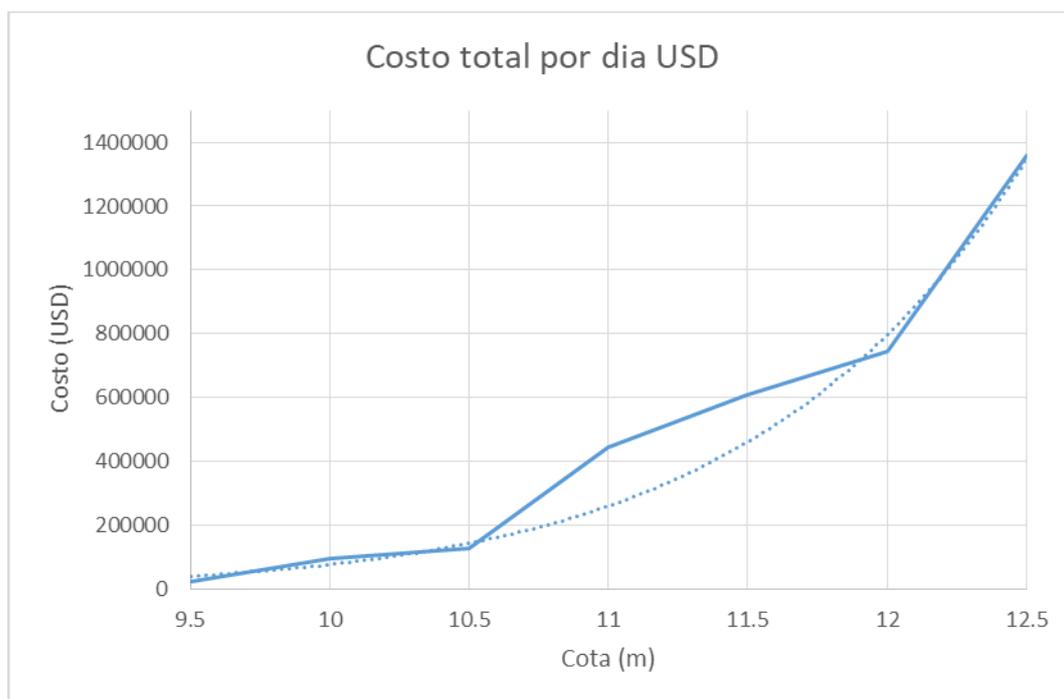


Figura 3-21: Costo por inundación asociado a cota respecto al cero local. Línea continua curva calculada con datos, línea punteada ajuste a los datos según Eq. 43.

Luego se realiza un procedimiento análogo para cuantificar el beneficio provocado por una mejora en el pronóstico del tiempo pico. En este caso, se diferencia entre la situación en donde se adelanta o se atrasa el tiempo al pico, ya que es diferente el problema dependiendo de cuál sea el error en el pronóstico. De esta forma, si el error se da por una anticipación del nivel pico, simplemente se multiplica el costo de la diferencia de los evacuados por el tiempo en el cual se atrasó el pico ya que no incluye más gasto que esto. Pero, si el error se da en un atraso del tiempo pico por parte del pronóstico, los daños asociados son mayores debido a que la evacuación de los afectados será con la inundación en pleno curso.

Finalmente, se calcula la relación beneficio-costo en base a lo descrito anteriormente y a la estimación del promedio de las mejoras en cuanto al tiempo pico y al nivel pico para la que resulte como mejor opción en cuanto a las propuestas de incorporación de HS para el SATI Durazno. Dependiendo de si la relación resulta mayor o menor a 1, se podría concluir si los beneficios superan a los costos asociados a las mejoras.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo busca describir los resultados obtenidos a partir de las metodologías ilustradas en el capítulo anterior. En primer lugar, se muestran los resultados correspondientes a la comparación de HS satelital y la medida *in situ* (sección 4.1). Posteriormente, se exponen los resultados de la modelación de eventos (sección 4.2); luego, se pasa a los diferentes modelos continuos (sección 4.3) y se realiza una comparación de todos los resultados obtenidos (sección 4.4), luego se presentan los resultados del análisis costo-beneficio (sección 4.5) y finalmente, en sección 4.6, se realiza una discusión de los resultados obtenidos.

4.1 Comparación de humedad de suelo medida *in situ* y satelital

Con el fin de evaluar el comportamiento de la medida de HS satelital, se compararan los datos obtenidos en campo con los datos satelitales de HS del producto SMAP para la celda correspondiente a la ubicación de los sensores TDR. En Figura 4-1 y Figura 4-4, se presentan los resultados correspondientes a los sensores instalados en Sarandí Grande y Cerro Colorado respectivamente. Se muestra en ambas figuras la serie obtenida del producto satelital SMAP, el mismo se presenta en un rango de valores, esto implica que para el producto satelital se tiene una serie que tiene en cuenta la incertidumbre de la medida incluida en dicho rango. En cuanto a los resultados *in situ*, se presentan los resultados de todos los sensores instalados a diferentes profundidades, cada uno indicado como "*in situ*" y su profundidad correspondiente.

En este caso, vale remarcar que hay más de 10 meses de registro continuo de paso diario, con eventos de precipitación y de períodos de recesión. Si bien es en un punto en particular permite, al menos, evaluar el comportamiento del satélite a la hora de medir la humedad del primer horizonte de suelo.

Se puede observar en todos los casos que el satélite sigue el comportamiento de la medida *in situ*. En Figura 4-2 y Figura 4-3, se muestran resultados de la comparación en Sarandí Grande. En Tabla 4-1, se presentan los resultados de los indicadores de la comparación datos satelitales-datos de campo.

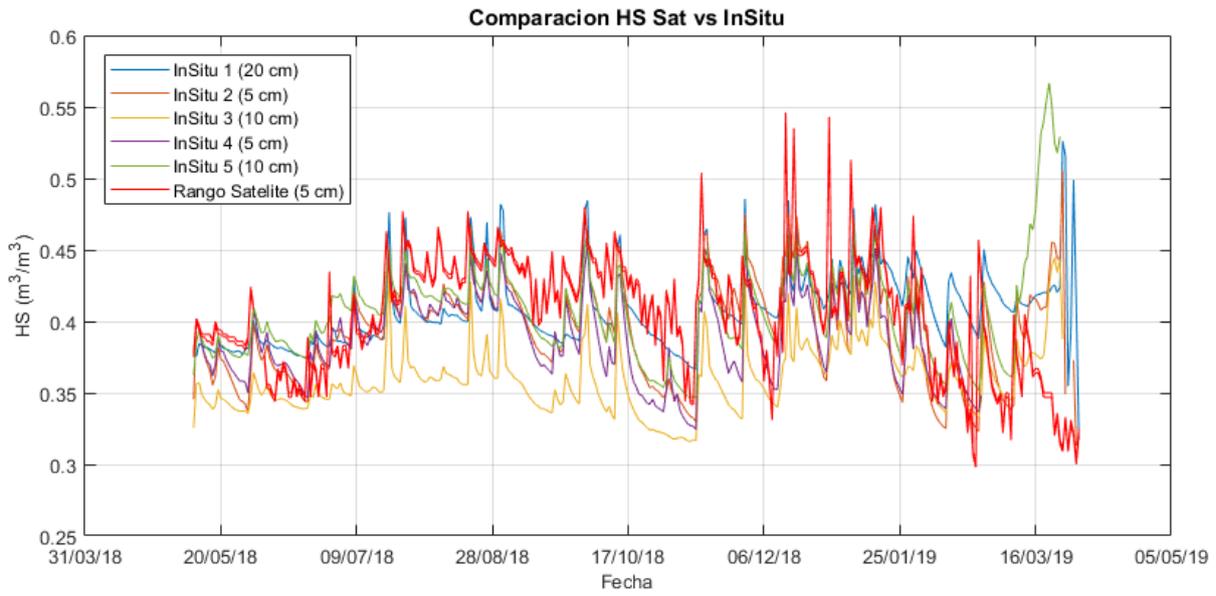


Figura 4-1: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en Sarandí Grande.

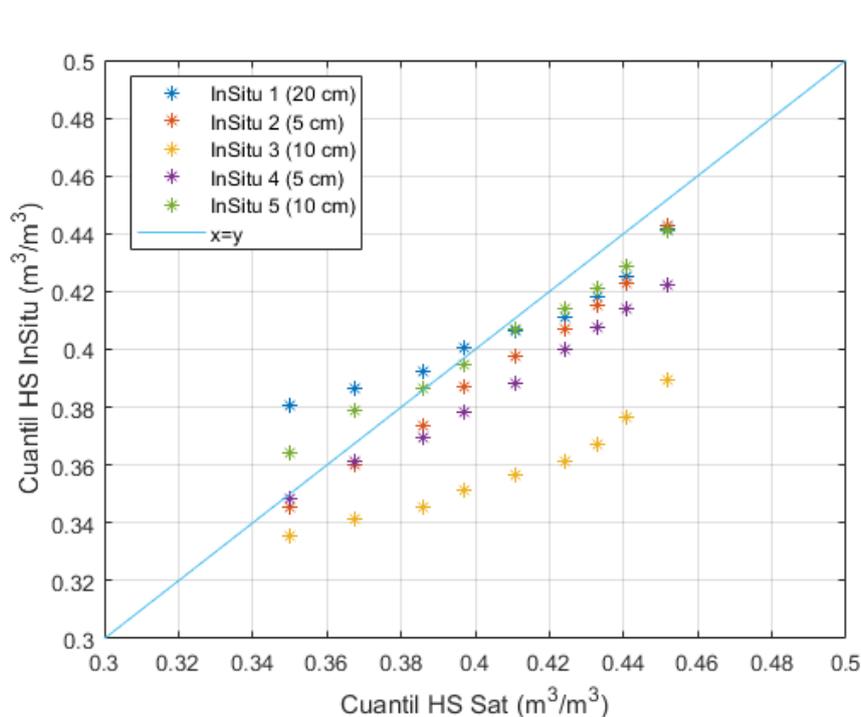


Figura 4-2: Cuantil-Cuantil *in situ* vs satelital para Sarandí Grande.

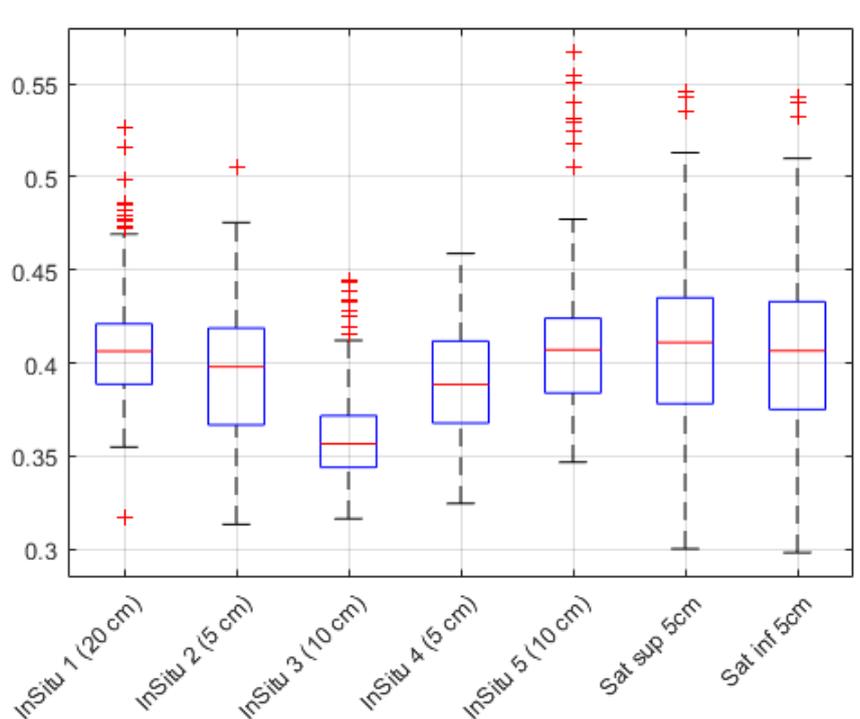


Figura 4-3: Box-plot de humedad de suelo *in situ* y satelital para Sarandi Grande.

En Figura 4-3, se observa que el dato satelital tiene un rango más amplio y que en ciertos casos sobreestima la medida *in situ*, esto se puede ver en el valor positivo del sesgo (Tabla 4-1). También se observa en el grafico cuantil-cuantil una pendiente muy similar para la medida *in situ* a 5 cm a la recta $x=y$, esto implicaría una misma tendencia para los cuantiles aunque se aprecia la sobreestimación del dato satelital mencionada anteriormente. Por otro lado, para el R^2 se tienen valores aceptables para profundidades de 5 cm.

Tabla 4-1: Indicadores comparación medida satelital vs *in situ* correspondiente a Sarandí del Yi.

Profundidad	Sesgo	RMSE	R^2
In situ 2 (5 cm)	0.02	0.03	0.65
In situ 4 (5 cm)	0.02	0.04	0.61
In situ 3 (10 cm)	0.06	0.07	0.51
In situ 5 (10 cm)	0.01	0.03	0.59
In situ 1 (20 cm)	0.01	0.03	0.60

Se presentan también los resultados para el segundo punto de medición de la cuenca del río Yi, ubicado en Cerro Chato. En este caso se tienen 6 meses de medición, se presenta la serie en Figura 4-4, en este caso las medidas satelitales siguen la tendencia pero no se acercan tanto como en el caso anterior, esto en parte se puede deber a que los sensores están ubicados a mayor profundidad. Luego en Figura 4-5 y Figura 4-6 se presentan los gráficos

cuantil-cuantil y box-plot para este punto. Finalmente en Tabla 4-2 se presentan los indicadores para este caso.

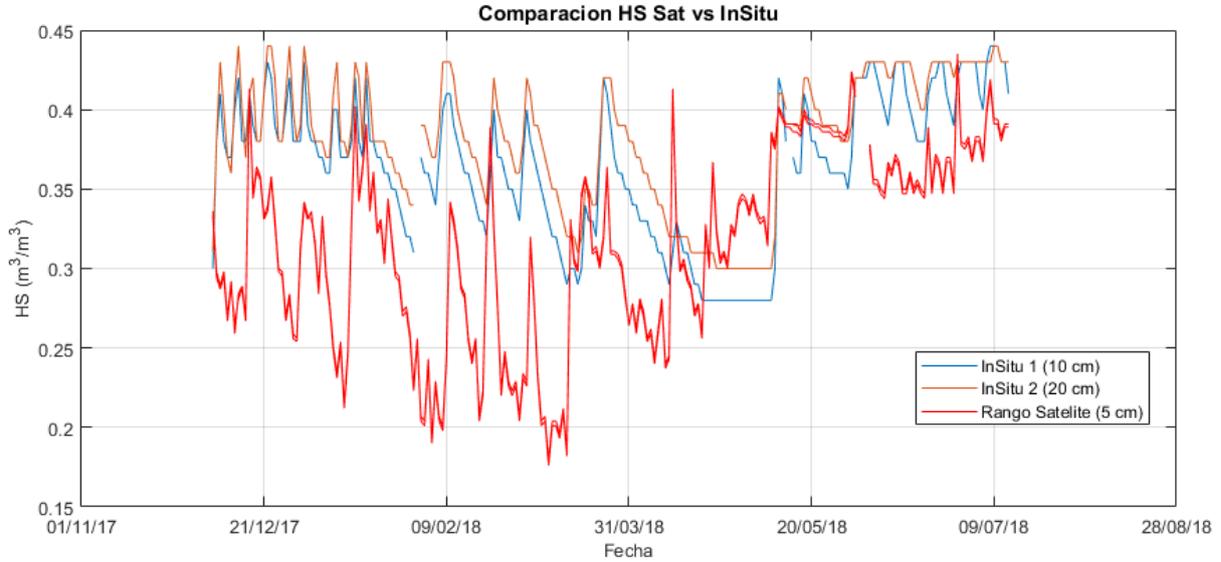


Figura 4-4: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en Cerro Colorado.

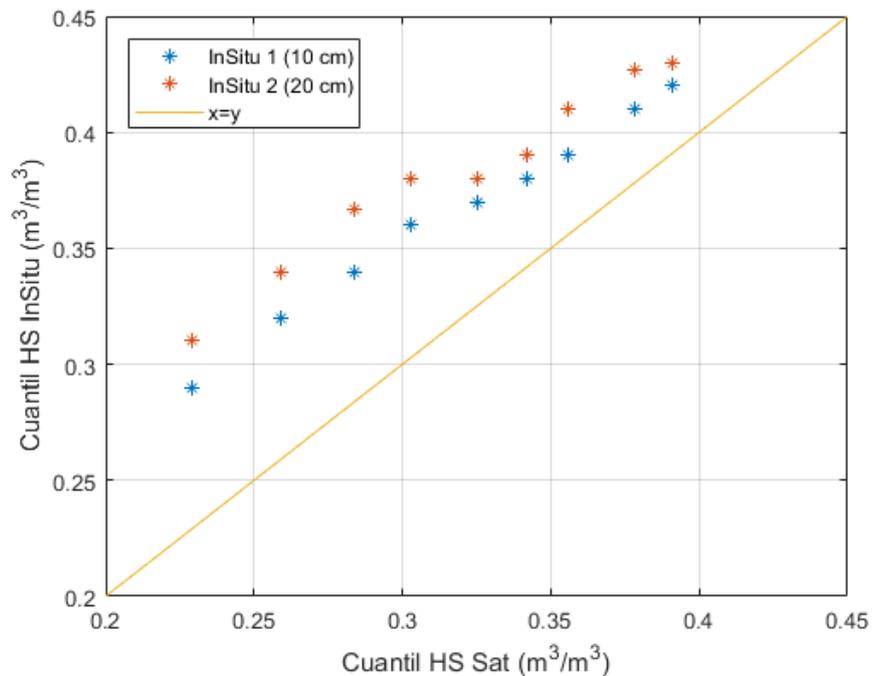


Figura 4-5: Cuantil-Cuantil *in situ* vs satelital para Cerro Colorado.

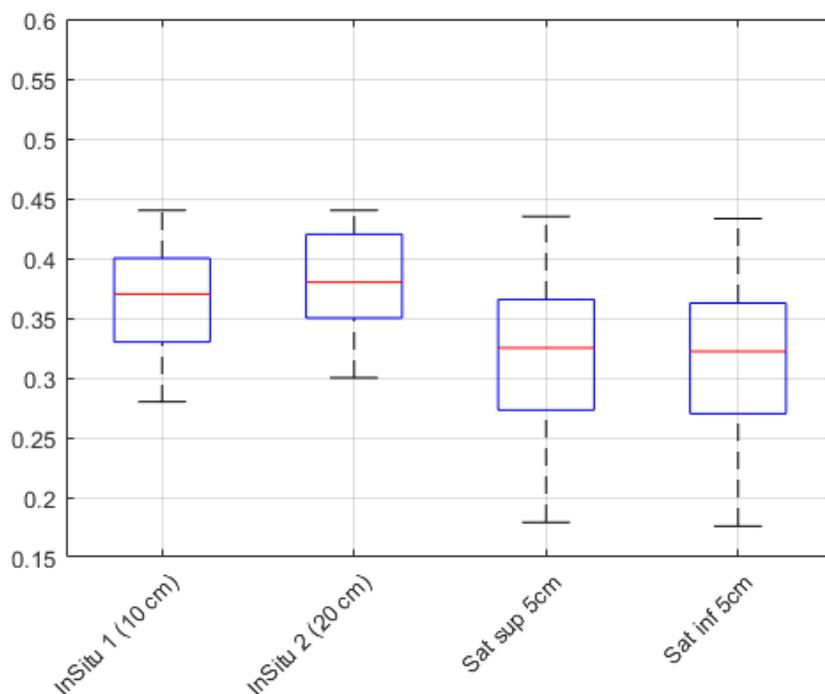


Figura 4-6: Box-plot de humedad de suelo *in situ* y satelital para Cerro Colorado.

Se desprende de Figura 4-5 que para este caso el satélite subestima los valores si se lo compara con la medida obtenida *in situ*, esto es consistente con los valores del sesgo de Tabla 4-2, donde también se aprecian valores de RMSE del mismo orden que el caso anterior pero valores menores si se observa el R^2 . Las diferencias pueden ser explicadas en parte por ser comparaciones de medidas a diferentes profundidades.

Tabla 4-2: Indicadores comparación medida satelital vs *in situ* correspondiente a Cerro Colorado.

Profundidad	Sesgo	RMSE	R^2
In situ 1 (10 cm)	-0.05	0.08	0.38
In situ 2 (20 cm)	-0.06	0.09	0.32

Se comparan también los datos satelitales para la zona de La Estanzuela con los datos medidos *in situ* (Figura 4-7). En la misma, se observa nuevamente que el satélite, salvo por algunas diferencias, sigue la tendencia de la medición en campo. Cabe destacar que, para este último caso, los datos corresponden al año 2015, en una zona alejada de la cuenca del río Yi. A su vez, en Figura 4-8 y Figura 4-9, se muestran los gráficos cuantil-cuantil al igual que en el caso anterior. En último lugar, se presentan en Tabla 4-3 los indicadores para el periodo de comparación.

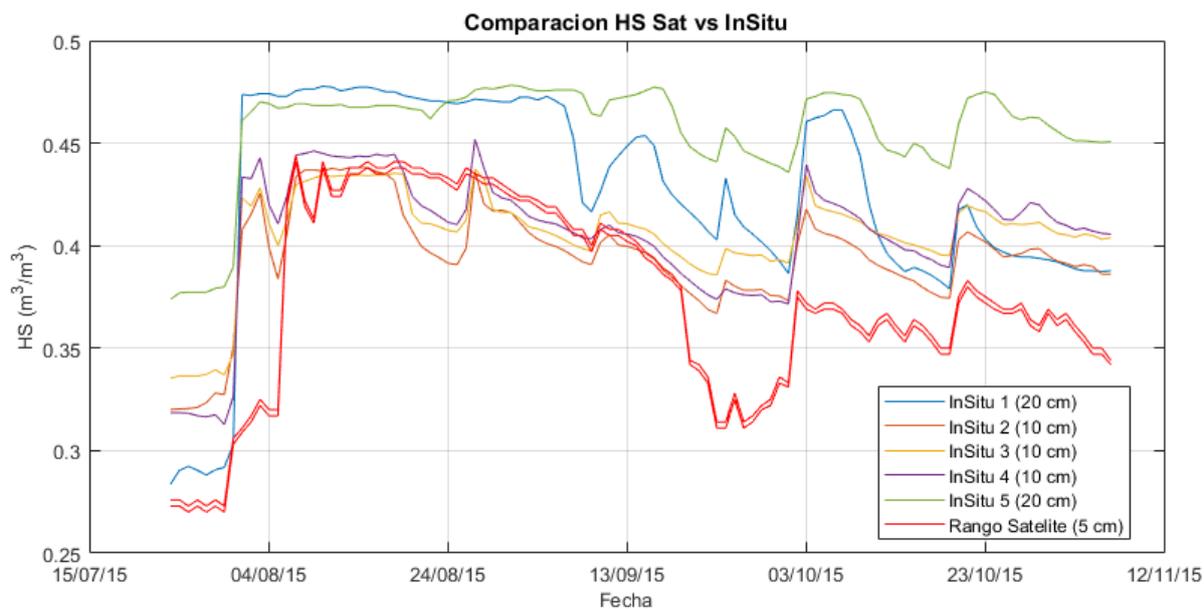


Figura 4-7: Comparación de datos medidos con sensores TDR a diferentes profundidades y datos obtenidos de SMAP para los primeros 5 centímetros de profundidad en La Estanzuela.

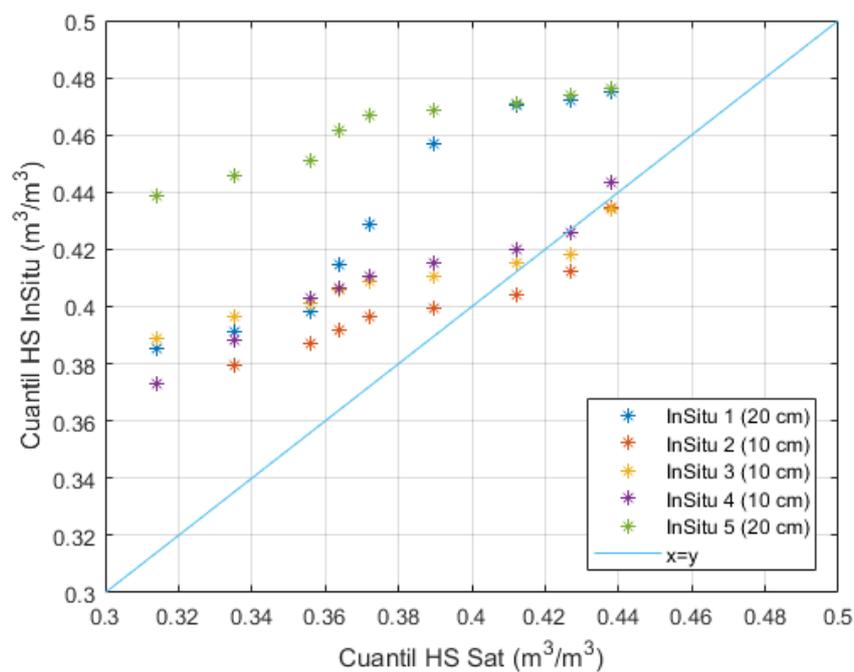


Figura 4-8: Cuantil-Cuantil *in situ* vs satelital para La Estanzuela.

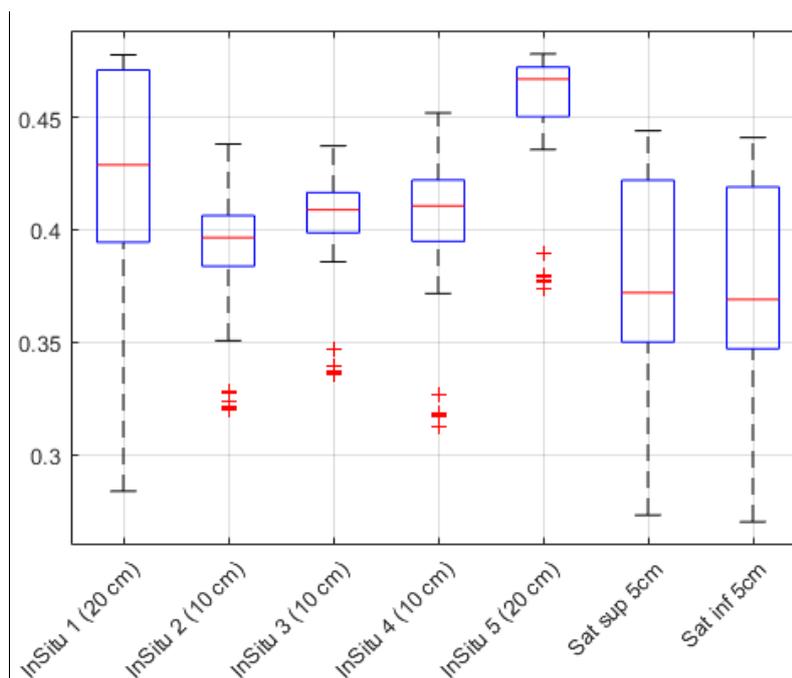


Figura 4-9: Box-plot de humedad de suelo *in situ* y satelital para La Estanzuela.

En este caso se observa una subestimación de la medida del satélite comparada con las medidas *in situ*, como se desprende de la gráfica cuantil-cuantil (Figura 4-8) y Tabla 4-3 al observarse el sesgo. Lo mismo se observa en los box-plots de Figura 4-9, donde además de verse un rango más amplio de valores para el dato satelital, se observa como la mediana es menor para los datos satelitales respecto a los medidos *in situ* en todos los casos. A su vez, se aprecian valores de RMSE del mismo orden que para el caso del punto de medición de Sarandí Grande. Finalmente, los valores de R^2 son más altos que para el caso antes mencionado, en este aspecto vale aclarar que el tiempo de comparación es menor debido a que se cuenta con un período de medición *in situ* más corto.

Tabla 4-3: Indicadores comparación medida satelital vs *in situ* correspondiente a La Estanzuela.

Profundidad	Sesgo	RMSE	R^2
In situ 1 (20 cm)	-0.05	0.06	0.78
In situ 2 (10 cm)	-0.02	0.04	0.80
In situ 3 (10 cm)	-0.03	0.04	0.76
In situ 4 (10 cm)	-0.03	0.04	0.77
In situ 5 (20 cm)	-0.08	0.09	0.76

4.2 Modelación de eventos

Se presentan los resultados de los 14 eventos registrados entre los años 2013 y 2020, donde se alcanzaron niveles de alerta en la ciudad de Durazno. Para estos eventos, se comparan los limnigramas medidos correspondientes a la estación limnométrica Durazno, con los simulados mediante las diferentes variantes para el modelo del NC. De esta forma, se tienen los eventos modelados con el método del NC en todas sus variantes utilizadas en este trabajo de tesis. A continuación, en Figura 4-10 y Figura 4-11, se presentan los resultados de las simulaciones y los niveles medidos.

Se desprende de Figura 4-10 y Figura 4-11, ciertos aspectos comunes en cuanto a la modelación para todas las variantes del modelo del NC utilizadas en este trabajo. En primer lugar, se observa como en líneas generales los valores de los niveles máximos son similares en todos los modelos y ajustan de manera aceptable, al menos visualmente, a los medidos. Por otra parte, se pueden identificar ciertos problemas en cuanto a la representación de las ramas ascendentes de los limnigramas, ya que en varios eventos sucede que la crecida modelada tiene una pendiente menos pronunciada que la medida. Esto repercute en el tiempo pico, donde se observan algunas diferencias entre los eventos medidos y simulados.

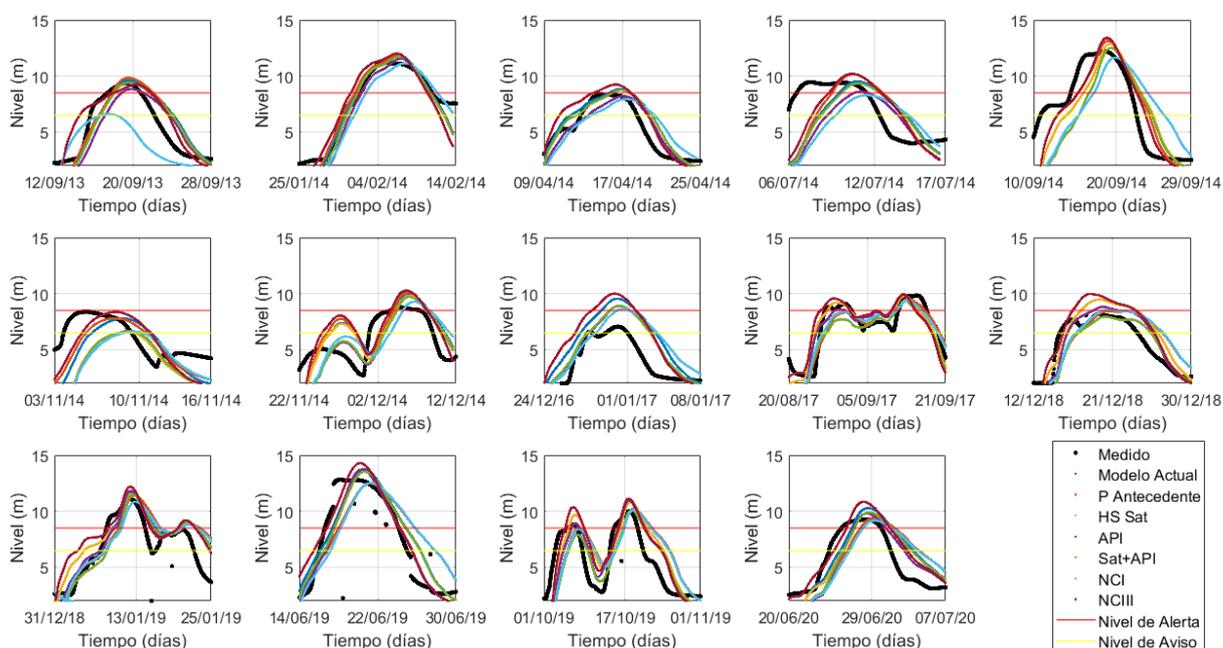


Figura 4-10: Eventos simulados en base a la formulación del NRCS con humedad de suelo correspondiente a ASCAT.

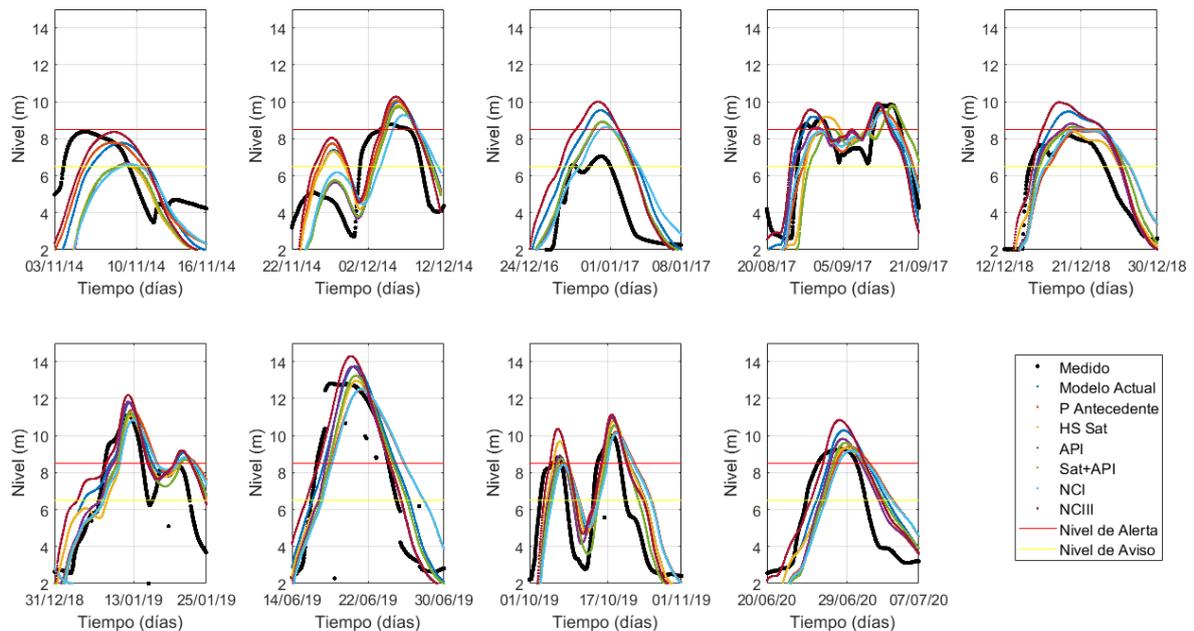


Figura 4-11: Eventos simulados en base a la formulación del NRCS con humedad de suelo correspondiente a SMOS.

4.3 Modelación continua

En cuanto a la modelación continua, se presentan los resultados de la re-calibración para cada modelo y luego los resultados teniendo en cuenta la forma en la cual se le incorpora la HS. De esta forma, se tienen series continuas de caudales desde 2013 hasta 2020 para cada variante de la modelación. Cabe destacar que para los resultados se tienen en cuenta los valores de nivel mayores a 3 m respecto al cero local debido a que al tratarse de la modelación de eventos extremos, es de interés simular correctamente los eventos que impliquen el desborde del cauce y la posterior inundación. Esto implica que los niveles correspondientes a estiaje o a valores medios de caudal no sean tenidos en cuenta y por lo tanto no tengan peso en la evaluación de la simulación.

4.3.1 Modelo Geetha

4.3.1.1 Resultados de la re-calibración

Se presentan los resultados para la re-calibración para extremos realizada con el modelo Geetha. La misma consta de encontrar el paquete de parámetros del modelo que maximicen el NS para el período 2013-2020. La re-calibración se realiza mediante un procedimiento de validación cruzada donde se particiona la serie dejando un año afuera en cada partición, el cual se utilizará como validación (*k-fold*, con $k=7$). De esta manera, cuando se completan

todos los años, se selecciona el paquete de parámetros con mejor NS. Vale aclarar que, en todos los casos, se realiza el procedimiento para los niveles mayores a 3 m, debido a que son los niveles que se busca simular correctamente al ser los correspondientes al desborde del cauce, como ya se mencionó.

La evaluación visual presenta un comportamiento satisfactorio analizando los diferentes limnigramas observados, correspondientes a la estación limnimétrica Durazno, en Figura 4-12. Luego, en Tabla 4-4, se presentan los indicadores de la re-calibración para eventos realizada con validación cruzada en el período correspondiente. Se observan buenos resultados, acorde a lo determinado en Moriasi et al. 2007 donde se presentan umbrales para indicadores en modelación hidrológica, para los valores de R^2 (mayores a 0.80) y NS (mayores a 0.65).

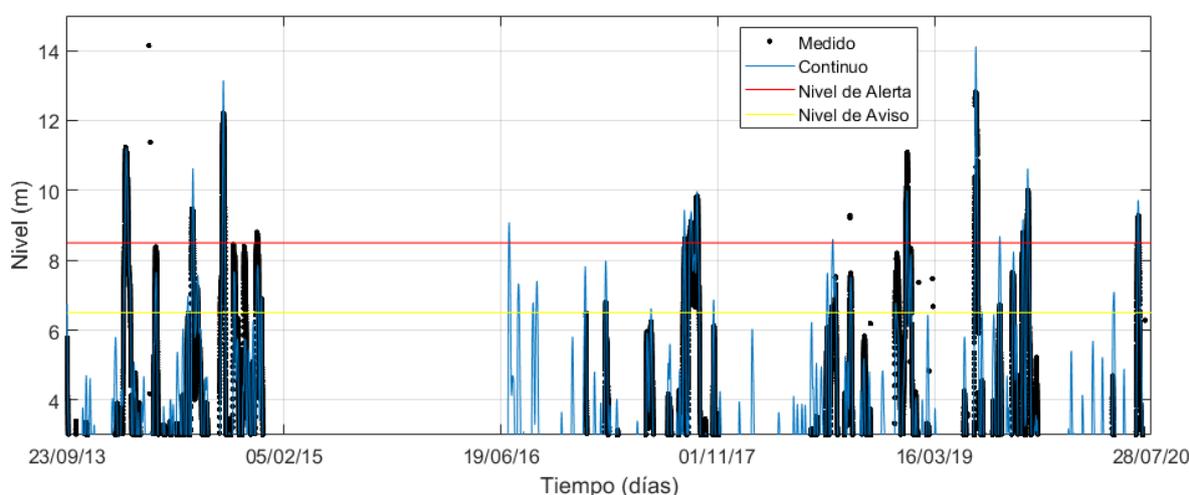


Figura 4-12: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha.

Tabla 4-4: Indicadores para la re-calibración.

Año Validación	R^2	NS
2013	0.83	0.67
2014	0.82	0.65
2015	0.84	0.67
2016	0.84	0.68
2017	0.85	0.69
2018	0.84	0.68
2019	0.82	0.65
2020	0.84	0.67

4.3.1.2 Filtro SWI

Se presentan los resultados correspondientes a la modelación del periodo 2013-2020 realizada con el modelo Geetha incorporando la HS con el filtro SWI. En Figura 4-13 y Figura 4-14, se observa que para la serie no se mejoran los resultados, teniendo un comportamiento similar en el conjunto de los eventos al observado en el caso de la re-calibración. A su vez, al analizar los resultados de los indicadores presentados en Tabla 4-5, se nota un descenso en los valores de los indicadores en comparación con los obtenidos en la re-calibración. Los indicadores se calculan para toda la serie simulada (2013-2020) para los niveles mayores a 3 m.

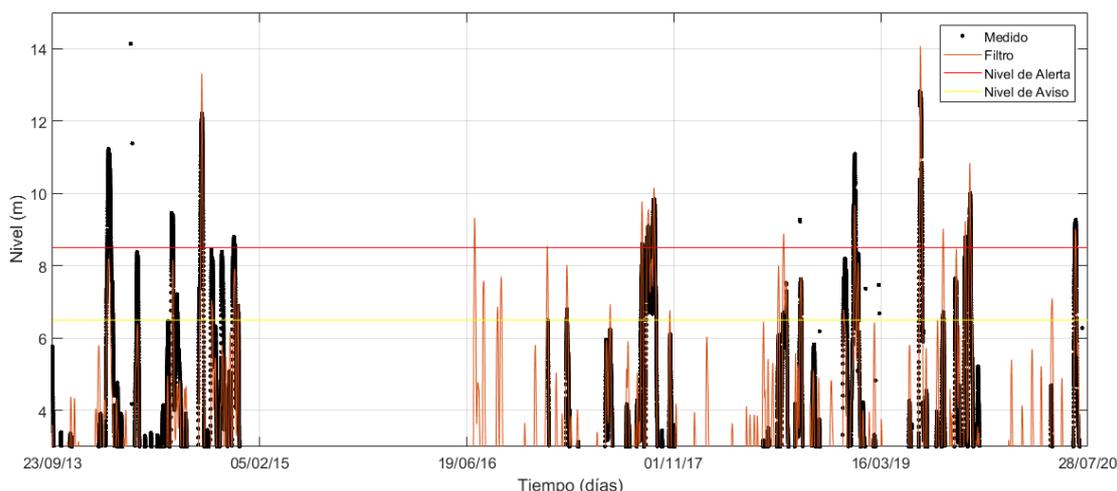


Figura 4-13: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.

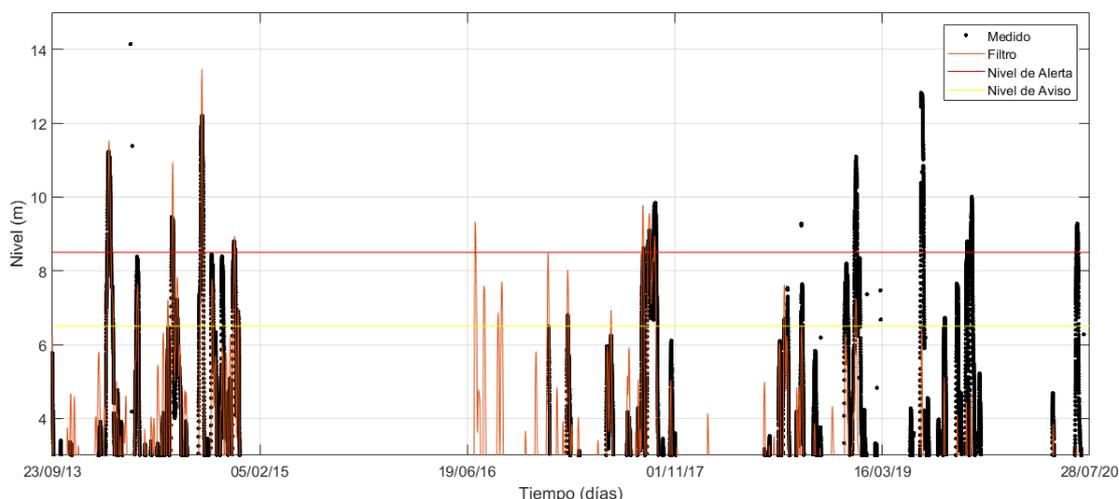


Figura 4-14: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

Tabla 4-5: Indicadores correspondiente a Geetha re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

Producto satelital	R ²	NS
ASCAT	0.82	0.47
SMOS	0.78	0.30

4.3.1.3 Simplificación de Richards

En este caso, se presenta la serie obtenida para la simplificación de la ecuación de Richards (Figura 4-15 Figura 4-16). Se observan mejores resultados que para el caso anterior cuando se incorpora la información de ASCAT, no así con SMOS. Esto se ve reflejado también en los indicadores de performance del modelo (Tabla 4-6), donde puede apreciarse en particular que los resultados para SMOS son insatisfactorios. Vale recalcar que los indicadores se calculan para toda la serie simulada (2013-2020) para los niveles mayores a 3 m.

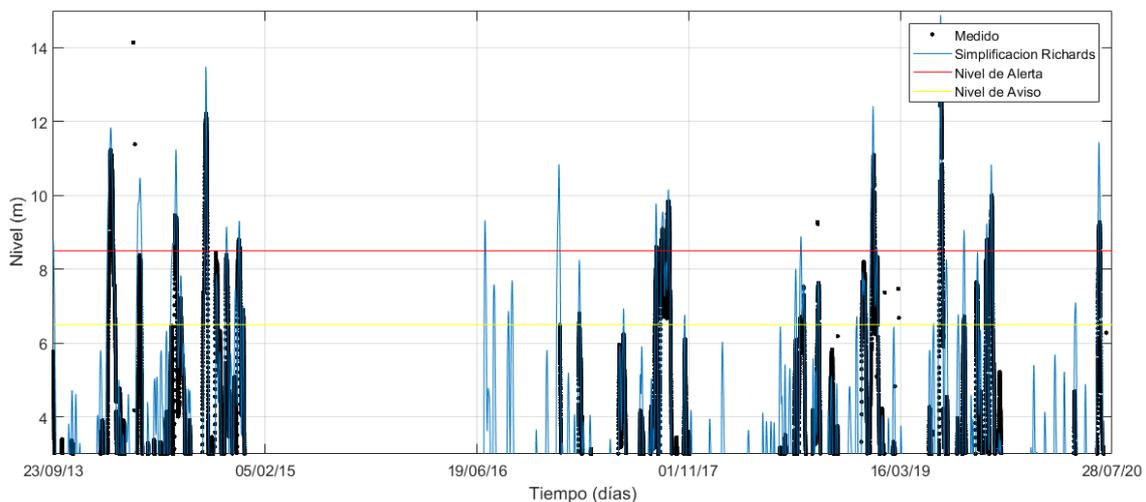


Figura 4-15: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo ASCAT según la simplificación de la ecuación de Richards.

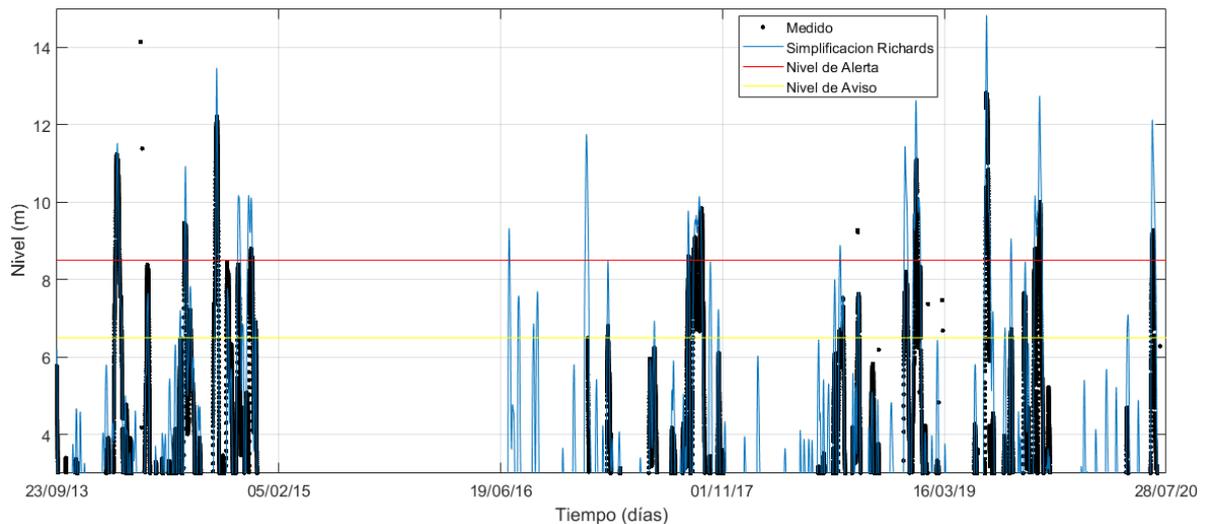


Figura 4-16: Serie temporal de niveles correspondiente a Geetha con incorporación de humedad de suelo SMOS según la simplificación de la ecuación de Richards.

Tabla 4-6: Indicadores para correspondiente a Geetha re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con simplificación de Richards.

Producto satelital	R ²	NS
Geetha ASCAT	0.79	0.60
Geetha SMOS	0.62	0.00

4.3.2 Modelo GR4J

A continuación, se presentan los resultados para la re-calibración del modelo GR4J, que se realiza de la misma forma que en el caso del modelo Geetha, y luego los resultados correspondientes a las propuestas de incorporación de HS. Nuevamente, se evalúa la performance del modelo en función de los indicadores propuestos y en base a la observación de las series de nivel para valores mayores a 3 m.

4.3.2.1 Resultados de la re-calibración

Se realiza la re-calibración para eventos que superen los 3 m de nivel. En Figura 4-17, se observan buenos resultados en los limnigramas correspondientes. En Tabla 4-7, se presentan los valores de los indicadores de la re-calibración.

Al igual que el caso de la re-calibración del modelo Geetha, para GR4J se obtienen resultados aceptables para la función objetivo, variando desde satisfactorios (NS=0.5), hasta buenos (NS=0.65), según los expresado en Moriasi et al. 2007. Para el caso del R² se observan resultados siempre por encima de 0.75 (muy bueno).

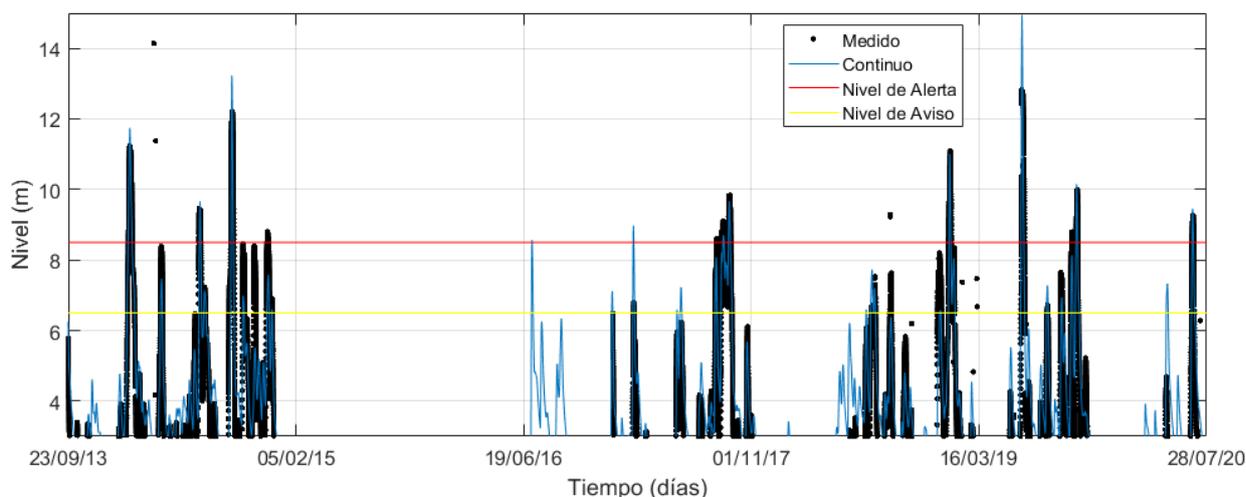


Figura 4-17: Resultados de la re-calibración del modelo GR4J.

Tabla 4-7: Indicadores para la re-calibración.

Año Validación	R ²	NS
2013	0.83	0.61
2014	0.81	0.56
2015	0.83	0.61
2016	0.83	0.61
2017	0.85	0.66
2018	0.83	0.62
2019	0.79	0.54
2020	0.82	0.61

4.3.2.2 Filtro

En el caso de la incorporación con filtro de humedad (SWI), se obtienen los resultados mostrados en Figura 4-18 y Figura 4-19, donde puede apreciarse el comportamiento del modelo frente a los niveles medidos. Al igual que para Geetha, en este caso para GR4J, los resultados no son del todo satisfactorios teniendo en cuenta los obtenidos en la re-calibración, ya que se observa una merma en la performance (Tabla 4-8). Nuevamente cabe recordar que los indicadores se calculan para toda la serie simulada (2013-2020) para los niveles mayores a 3 metros.

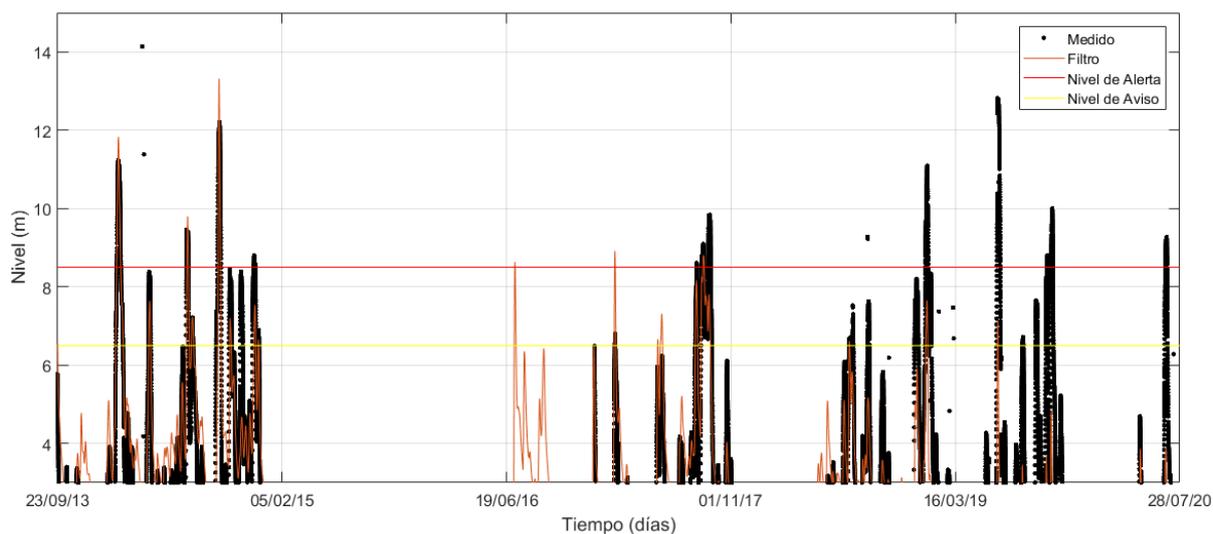


Figura 4-18: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

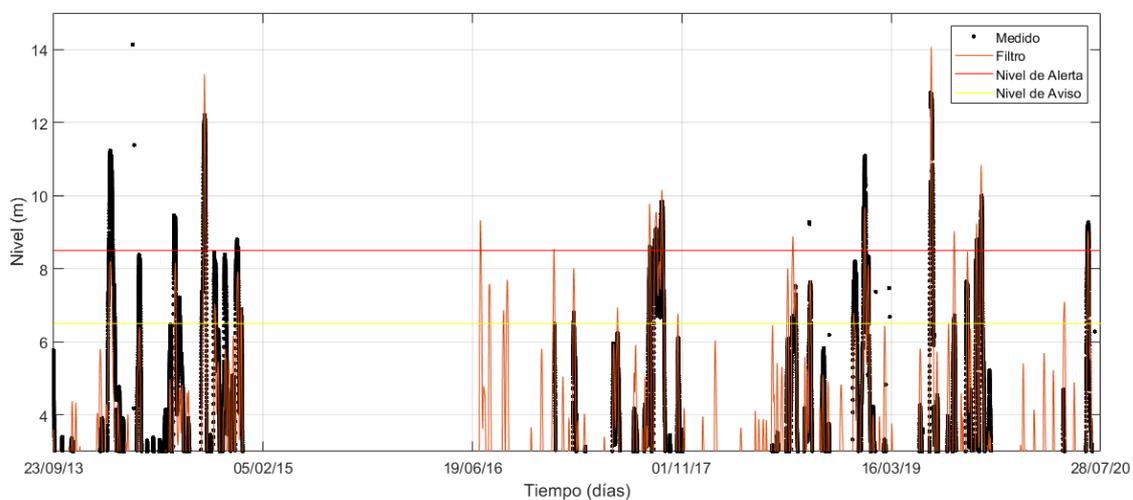


Figura 4-19: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT con filtro.

Tabla 4-8: Indicadores para correspondiente a GR4J re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

Producto satelital	R ²	NS
GR4J ASCAT	0.82	0.47
GR4J SMOS	0.73	0.50

4.3.2.3 Simplificación de Richards

Para la simplificación de la ecuación de Richards, se obtienen los resultados presentados en Figura 4-20 y Figura 4-21 para las series de nivel mayor a 3 metros. Nuevamente, se observan diferencias considerables en la aplicación de los distintos productos satelitales (Tabla 4-9), siendo el producto de ASCAT el que obtiene mejores resultados. En este caso, para el NS se obtienen resultados satisfactorios para el modelo con la incorporación del producto ASCAT, pero insatisfactorios para la incorporación de HS de SMOS.

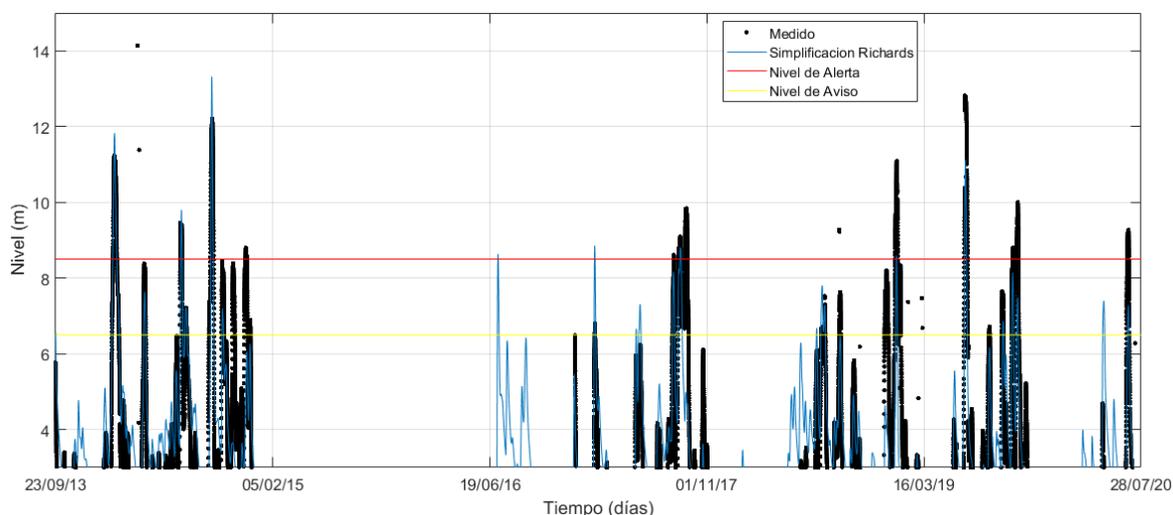


Figura 4-20: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo SMOS según la simplificación de la ecuación de Richards.

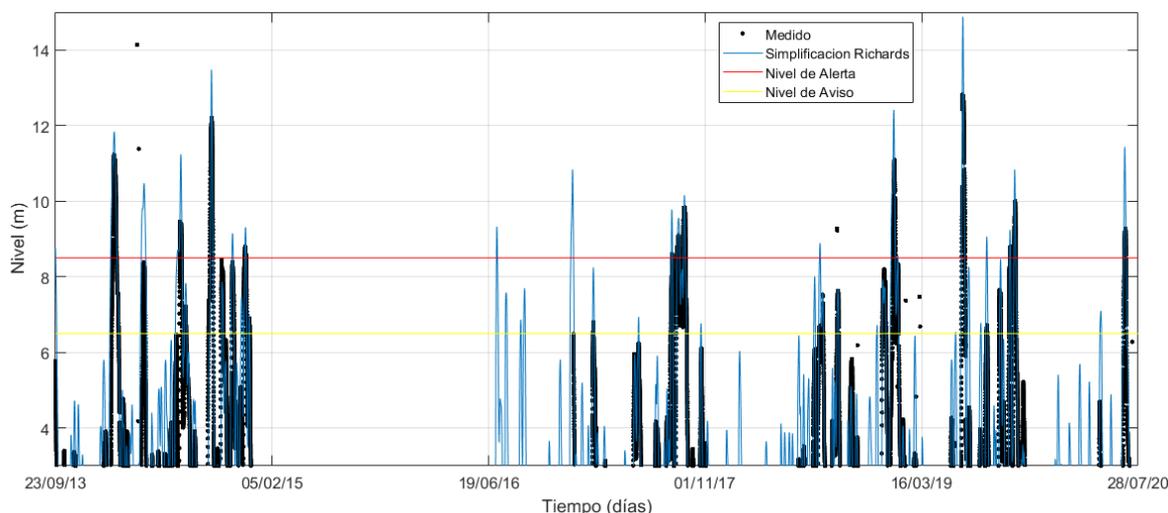


Figura 4-21: Serie temporal de niveles correspondiente a GR4J con incorporación de humedad de suelo ASCAT según la simplificación de la ecuación de Richards.

Tabla 4-9: Indicadores para correspondiente a GR4J re-calibrado, con incorporación de humedad de suelo SMOS con filtro.

Producto satelital	R ²	NS
GR4J ASCAT	0.79	0.60
GR4J SMOS	0.60	0.12

4.4 Comparación de resultados

En esta sección, se analizan los resultados de manera conjunta para poder comparar lo obtenido con todas las formulaciones de los modelos. Para la comparación de resultados, se utilizan dos variables de interés para la performance de los modelos que son el valor del nivel pico y el tiempo al pico. En ambos casos, los análisis se realizan en función del nivel y tiempo medidos por lo que el interés radica en las diferencias entre medido y simulado.

4.4.1 Nivel Pico

En primer lugar, en Figura 4-22 y en Tabla 4-10 se muestran los indicadores para nivel pico. Como se mencionó anteriormente se evaluaron los resultados tomando en cuenta el error medio cuadrático (RMSE), el coeficiente de correlación (R²) y el valor absoluto de la diferencia de nivel medido y simulado (DifAbs).

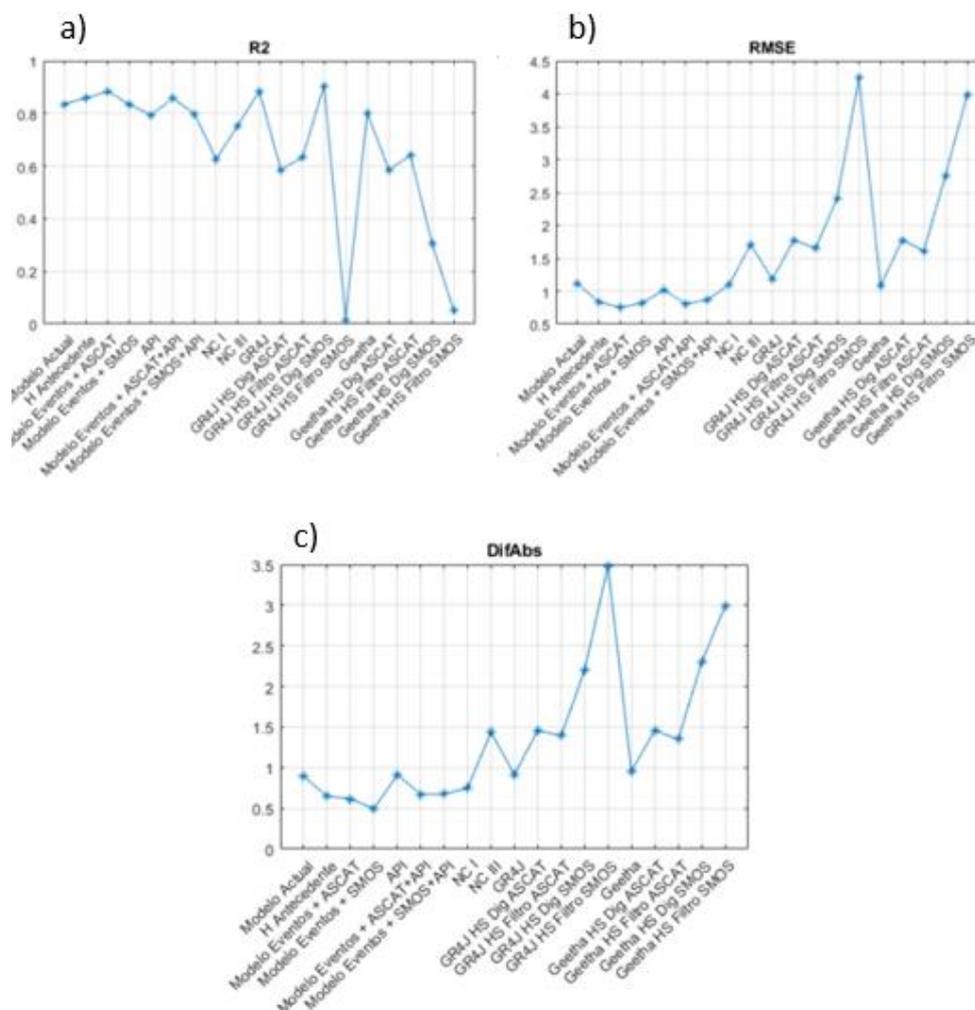


Figura 4-22: Indicadores para el nivel pico.

Con el resultado de los indicadores calculados, se pasa a comparar los mismos. En todos los casos, se aprecia un marcado descenso de la performance de los modelos continuos respecto a los de eventos. También se desprende de estos resultados la mejora de la incorporación de HS en los modelos de eventos, no observándose lo mismo en el caso de los modelos continuos. Tanto para el R^2 como para el RMSE, el mejor resultado se logra con la incorporación del dato de HS de ASCAT al modelo de eventos. En el caso de la diferencia absoluta de nivel, la mejor performance se tiene con el mismo modelo, pero incorporando la HS de SMOS.

Tabla 4-10: Indicadores para el nivel pico.

Modelo	RMSE	R²	DifAbs
Modelo actual	1.11	0.91	0.89
H Antecedente	0.83	0.93	0.65
Modelo Eventos + ASCAT	0.75	0.94	0.62
Modelo Eventos + SMOS	0.82	0.91	0.50
API	1.02	0.89	0.91
Modelo Eventos + ASCAT+API	0.81	0.93	0.67
Modelo Eventos + SMOS+API	0.87	0.89	0.68
NC I	1.10	0.79	0.75
NC III	1.71	0.87	1.44
GR4J	1.18	0.94	0.92
GR4J HS Dig ASCAT	1.78	0.77	1.46
GR4J HS Filtro ASCAT	1.65	0.80	1.39
GR4J HS Dig SMOS	2.42	0.95	2.20
GR4J HS Filtro SMOS	4.24	0.13	3.48
Geetha	1.08	0.90	0.96
Geetha HS Dig ASCAT	1.78	0.77	1.46
Geetha HS Filtro ASCAT	1.61	0.80	1.35
Geetha HS Dig SMOS	2.76	0.55	2.30
Geetha HS Filtro SMOS	3.98	-0.23	2.99

Una vez analizados los resultados de los indicadores, es de interés visualizar los resultados correspondientes a grupos de modelos. De Figura 4-23 a Figura 4-24, se presentan los resultados de modelos agrupados de manera diferente en formato box-plot. El análisis se realiza por indicador para la diferencia en valor absoluto (DifAbs), el R² y el RMSE.

En primer lugar, en Figura 4-23, se observa el agrupamiento por tipo de modelo, continuo y de eventos, mientras que se los modelos continuos se separan también por modelo. De esta forma se aprecia cómo, para el caso de esta división, se tiene que los mejores resultados se obtienen claramente con los modelos de eventos, donde se aprecia una menor variabilidad a la vez que se da el resultado de menor diferencia en valor absoluto.

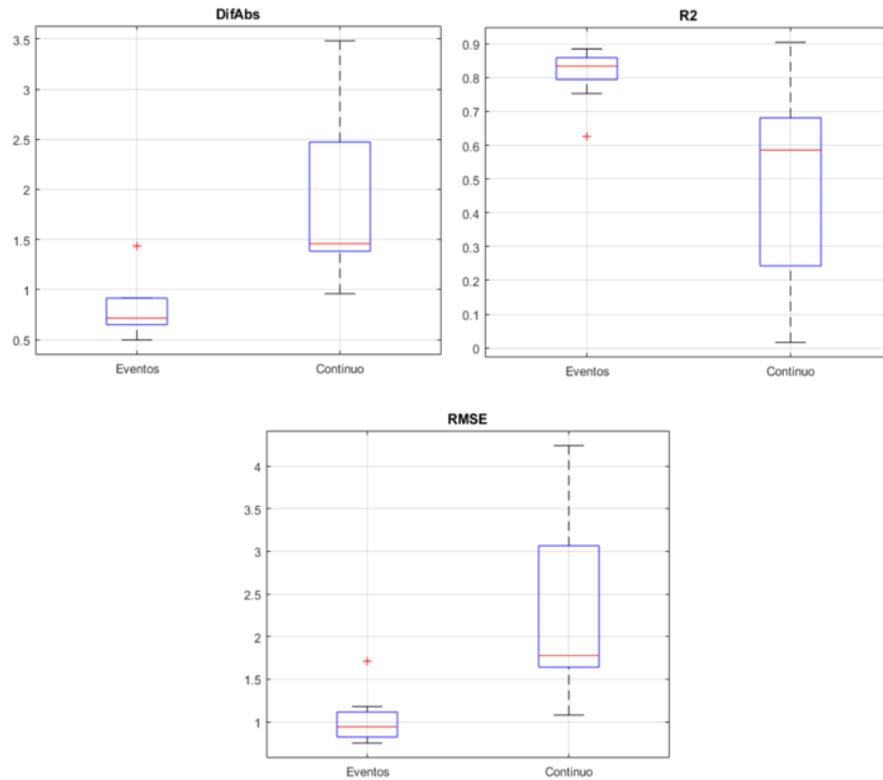


Figura 4-23: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.

Por otro lado, en Figura 4-24, se comparan los valores para las proposiciones con y sin HS, de esta manera se observa como los modelos con HS tienen mayor variabilidad en cuanto a la diferencia en valor absoluto, pero a la vez se da el valor de menor diferencia absoluta. Si se tiene en cuenta la separación por tipo de modelos y HS, se observa que la variabilidad se debe a los modelos continuos con humedad agregada. En este caso, se observa como para los modelos de eventos con HS se obtienen los mejores resultados. También se aprecia como estos últimos se ubican por debajo del modelo actual en cuanto a los valores de diferencia absoluta de nivel pico esto implica una mejoría en este aspecto.

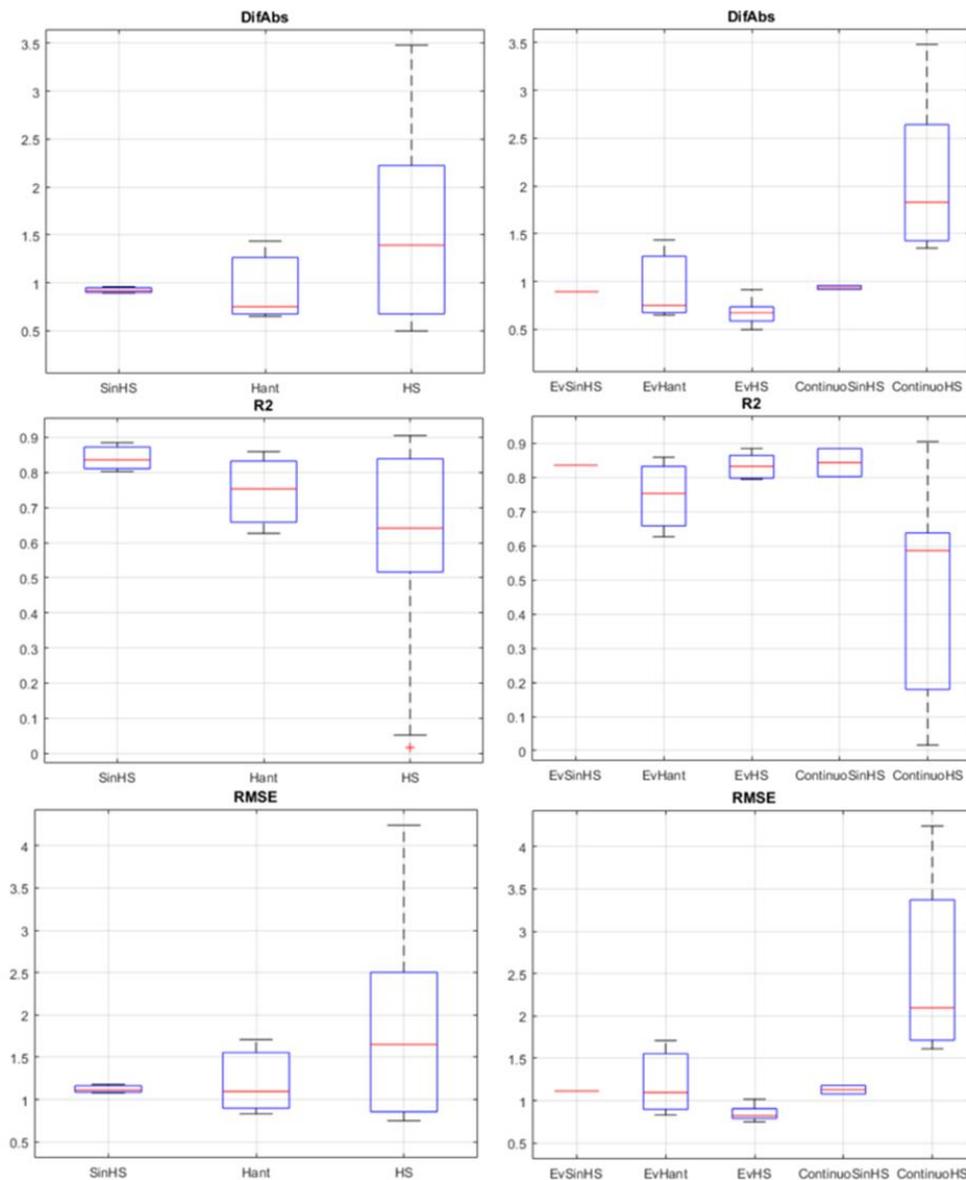


Figura 4-24: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.

Se realiza el mismo análisis para el R^2 , donde se observan resultados similares. Si se agrupan por tipos de modelos, Figura 4-23, se observa que los mejores resultados se dan para los modelos de eventos. Sin embargo, el mayor valor del indicador se da para el modelo GR4J por lo que dentro de los modelos se da el mejor resultado para este indicador. También se desprende de los diagramas que la mayor variabilidad del indicador se da con los modelos continuos.

Para el agrupamiento basado en la incorporación de HS, Figura 4-24, se observa nuevamente una gran variabilidad en los valores del indicador para los modelos con HS, donde se da el

mejor y el peor valor. Esta variabilidad se explica en que los mejores valores del indicador se dan para los modelos de eventos con HS y los peores para los continuos con HS como se aprecia en Figura 4-24 .

Una vez analizados la diferencia absoluta y el R^2 se pasa al RMSE, donde se observa un comportamiento con la misma tendencia que para los anteriores. El conjunto de modelos de eventos es claramente el que obtiene los mejores resultados con menores RMSE mientras que los modelos continuos presentan mayor rango, como se aprecia en Figura 4-23.

Agrupando los modelos por incorporación de humedad, Figura 4-24, se nota una clara ventaja del modelo de eventos con humedad de suelo sobre los demás, en particular se aprecia que en todas sus versiones obtiene menor RMSE que para el modelo actual. También se aprecia una pobre performance de los modelos continuos, siendo los de mayores RMSE.

4.4.2 Tiempo Pico

Se realiza el mismo procedimiento para el tiempo al pico, pero se presentan para esta variable, los resultados de los indicadores diferencia absoluta y RMSE (Figura 4-25 y Tabla 4-11), en este caso las diferencias se expresan en días. A diferencia del caso anterior del nivel pico, se toman solo los indicadores que se expresan en función de la unidad de medida.

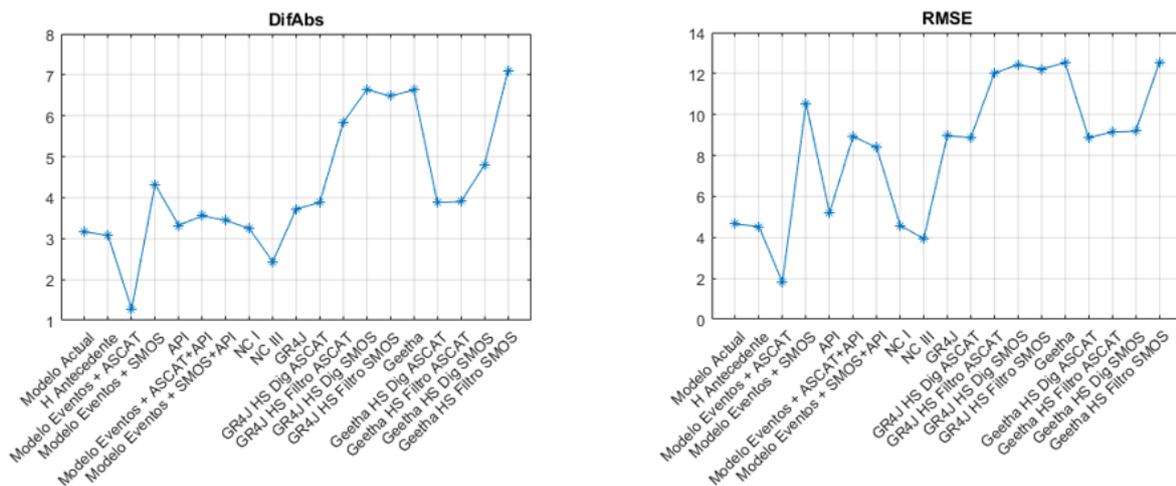


Figura 4-25: Indicadores para tiempo al pico.

Se aprecia que la menor diferencia al tiempo al pico se da para el modelo de eventos con la incorporación de HS de ASCAT. Nuevamente, para los modelos continuos se notan diferencias mayores con el medido como para el tiempo al pico.

Una vez obtenidos los indicadores se repite el análisis por agrupamientos, de Figura 4-26 a Figura 4-27 se presentan los resultados.

Tabla 4-11: Indicadores para el tiempo pico.

Modelo	RMSE	DifAbs
Modelo actual	4.65	3.16
H Antecedente	4.53	3.07
Modelo Eventos + ASCAT	1.81	1.27
Modelo Eventos + SMOS	10.55	4.32
API	5.21	3.32
Modelo Eventos + ASCAT+API	8.93	3.55
Modelo Eventos + SMOS+API	8.38	3.44
NC I	4.58	3.24
NC III	3.93	2.43
GR4J	8.96	3.72
GR4J HS Dig ASCAT	8.87	3.88
GR4J HS Filtro ASCAT	12.02	5.84
GR4J HS Dig SMOS	12.43	6.64
GR4J HS Filtro SMOS	12.22	6.48
Geetha	12.52	6.63
Geetha HS Dig ASCAT	8.87	3.88
Geetha HS Filtro ASCAT	9.14	3.90
Geetha HS Dig SMOS	9.18	4.79
Geetha HS Filtro SMOS	12.52	7.10

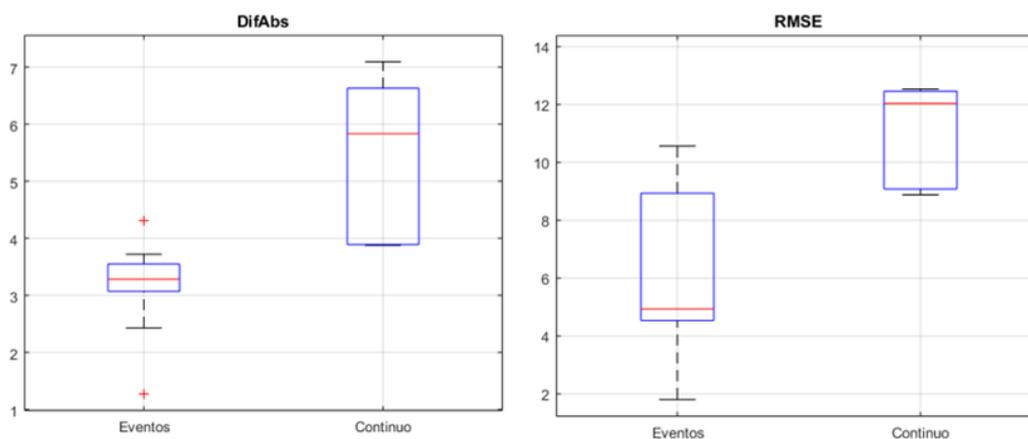


Figura 4-26: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.

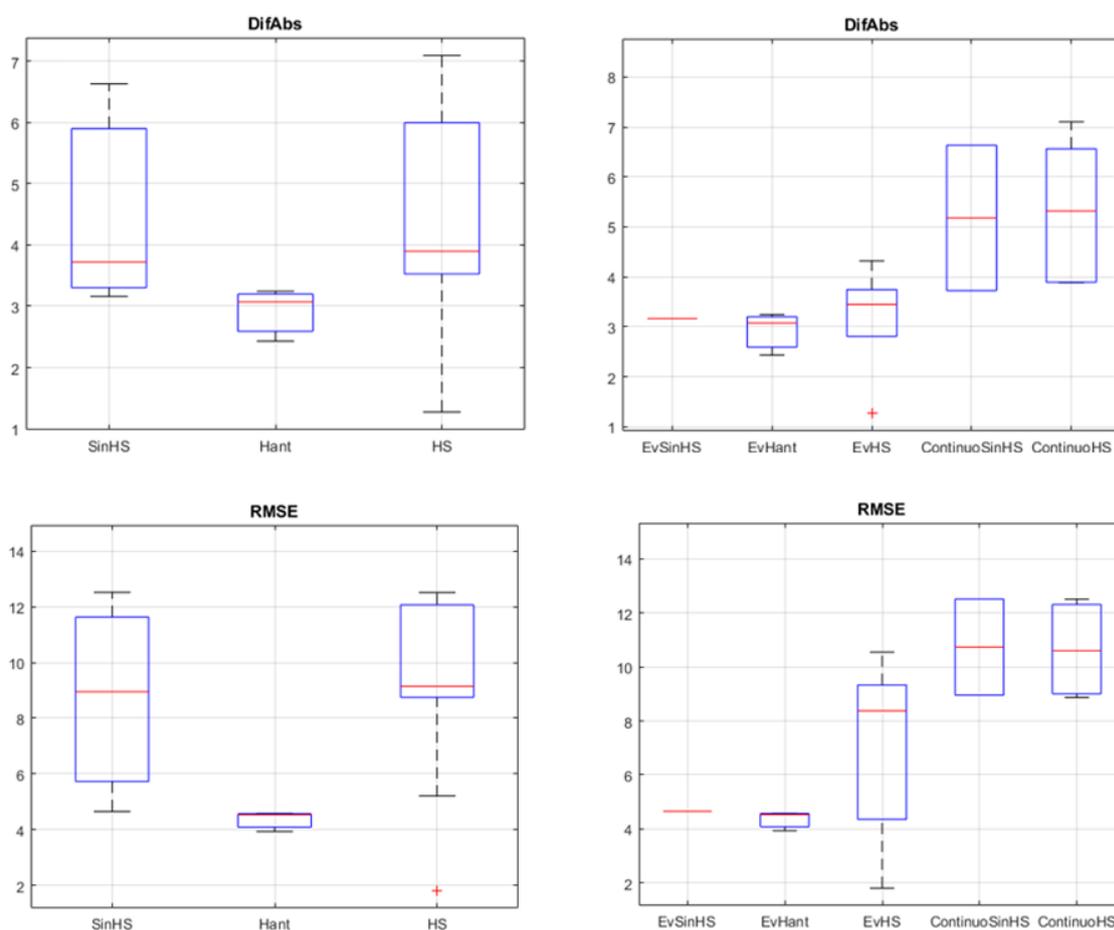


Figura 4-27: Variabilidad de los indicadores según agrupamientos.

Para la diferencia absoluta se aprecia que los mejores resultados se dan para los modelos de eventos (Figura 4-26), en particular, para los modelos de eventos con humedad antecedente (Figura 4-27), aunque el mejor resultado se da para modelo de eventos más humedad satelital.

En el caso del RMSE, se obtienen resultados en la misma línea que los anteriores. Las mejores performances las obtienen los modelos de eventos (Figura 4-26), en particular los que tienen en cuenta la humedad antecedente (Figura 4-27).

4.4.3 Análisis de agrupamiento de los resultados

Con el fin de evaluar que modelos y que propuestas de incorporación de humedad de suelo son las que obtienen resultados más acercados a los medidos se realiza un análisis de agrupamiento de los resultados obtenidos. De esta manera, por un lado, se utiliza la técnica t-SNE no-lineal y por otro un agrupamiento de clústers jerárquicos tradicional. De esta forma,

se analiza de qué manera se agrupan los resultados con la primer técnica, que es capaz de detectar información de los procesos no lineales presentes en el conjunto de datos de resultados y por otro, lado se estudia si existe algún tipo de agrupamiento según la segunda técnica evaluando las distancias euclidianas de los resultados.

Para poder aplicar estas técnicas de agrupamiento en las variables de interés, que son los resultados para el tiempo pico y el nivel pico con todos los eventos para cada modelo, se genera una matriz de resultados. La misma es una matriz $m \times n$ siendo m el número de modelos, tomando los modelos como individuos (*objects*) y n es el número de eventos, que se toman como características de los individuos (*features*). De esta manera se tiene que cada evento (individuo) queda constituido o descrito por un conjunto de características (nivel o tiempo al pico) y así se puede estudiar la similaridad entre los resultados de eventos modelados y los registrados.

Finalmente, se realiza un análisis de estacionalidad tomando en cuenta los resultados para los modelos y medidos, separando en dos estaciones, invierno-verano, tomando como primera estación los meses correspondientes de abril hasta setiembre y la segunda el resto de los meses. De esta forma, se busca evaluar la posible afectación de los resultados dependiendo de la época en la que se registraron los mismos.

4.4.3.1 t-SNE

Se realiza el análisis para el nivel pico y para el tiempo pico. En este caso se tiene una matriz de $m=19$ modelos y $n=9$ eventos, debido a que se toman todos los modelos. En primer lugar, se analiza el resultado obtenido para nivel pico (Figura 4-28). Se observan al menos tres grupos marcados, donde por un lado se agrupan los modelos de eventos y el medido y por otro quedan dos grupos de modelos continuos separados.

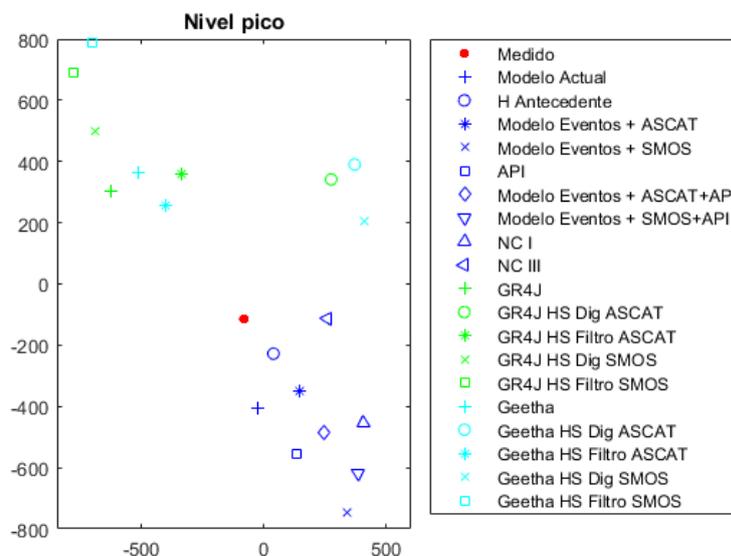


Figura 4-28: t-SNE para el nivel pico.

Los resultados de este agrupamiento tienen coherencia con lo visto anteriormente con los indicadores, es decir, se aprecia como las variantes de los modelos de eventos se agrupan con el medido en el conjunto de eventos. Esto refleja lo visto anteriormente con mejores indicadores para los modelos de eventos.

Realizando lo mismo para el tiempo al pico, en Figura 4-29, se aprecia un agrupamiento más marcado, donde al igual que el caso anterior, es el modelo de eventos el que se agrupa con el punto correspondiente a los datos medidos. Luego se agrupan los modelos continuos, donde en este caso quedan claramente agrupados.

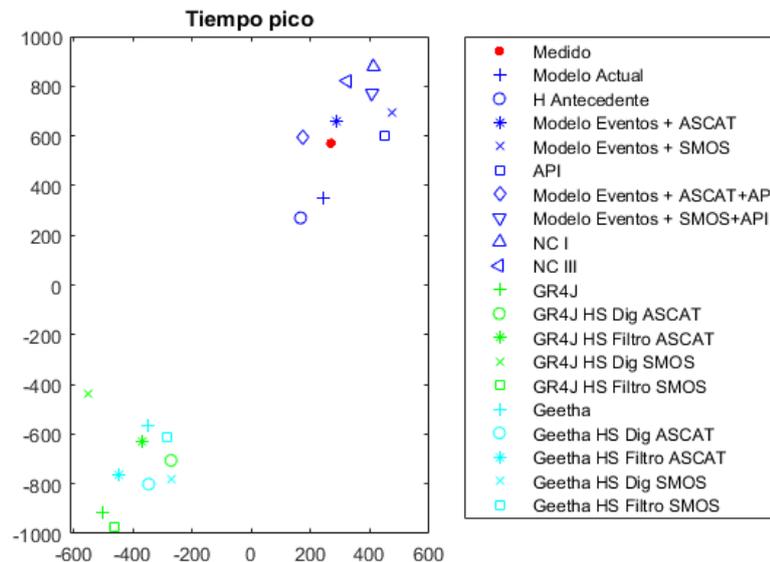


Figura 4-29: t-SNE para el tiempo pico.

Por otra parte, se realiza el mismo análisis, pero dejando fuera la incorporación de las propuestas con incorporación de HS de SMOS para captar una mayor cantidad de eventos. De esta forma se tiene una matriz de $m=13$ modelos y $n=14$ eventos debido a que se toman todos los eventos. En Figura 4-30, se observa que para el caso de los 14 eventos evaluados el comportamiento es similar para el agrupamiento de los modelos donde los modelos de eventos son los más cercanos al medido.

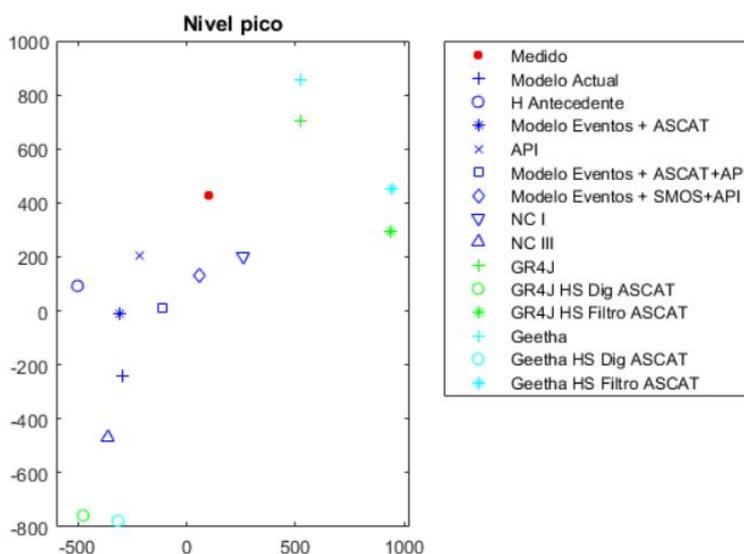


Figura 4-30: t-SNE para el nivel pico.

Vale remarcar que para el caso del nivel pico (Figura 4-30) se llegan a un número mayor de grupos mientras que en caso del tiempo al pico es claro que se tienen dos agrupamientos. De todas formas, se aprecia el mismo comportamiento que tomando los eventos coincidentes con SMOS.

Para el caso del tiempo al pico (Figura 4-31) el agrupamiento no tiene grandes diferencias con el encontrado para los eventos que tienen datos de SMOS. Lo cual indica que el número de eventos acotado del primer análisis no tiene gran incidencia en la definición de los agrupamientos.

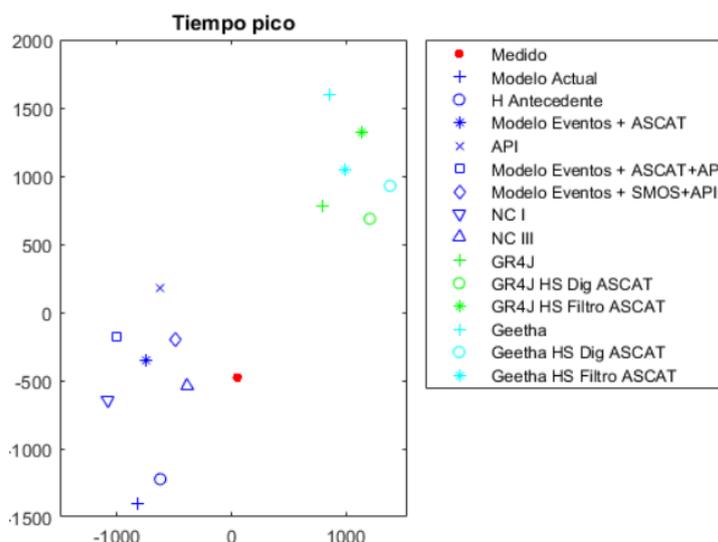


Figura 4-31: t-SNE para el tiempo pico.

Finalmente, se presenta el orden de los resultados según qué tan próximos se situaron a los medidos. Se realiza el cálculo para el tiempo pico y para el nivel pico, se presenta en Tabla 4-12 el orden para los modelos, donde se observa que para el nivel pico el modelo del NRCS con la variación del NC en función de la precipitación antecedente es el que queda en primer lugar. Mientras que para el tiempo al pico el mejor ubicado es el modelo de eventos con la incorporación de HS ASCAT. Cabe destacar que este último modelo queda ubicado en tercer lugar si se toma en cuenta los resultados en nivel pico.

Tabla 4-12: Ordenamiento de los modelos en función de los valores registrados.

Nivel Pico	Tiempo Pico
H_{ant}	Modelo Eventos + ASCAT
Modelo actual	Modelo Eventos + ASCAT+API
Modelo Eventos + ASCAT	API
NC III	Modelo actual
Geetha HS Filtro ASCAT	Modelo Eventos + SMOS
API	Modelo Eventos + SMOS+API
Modelo Eventos + ASCAT+API	NC III
GR4J HS Filtro ASCAT	H Antecedente
GR4J HS Dig ASCAT	NC I
Geetha HS Dig SMOS	Geetha 7
NC I	GR4J HS Dig SMOS
Geetha 7	Geetha HS Filtro SMOS
Geetha HS Dig ASCAT	GR4J HS Filtro ASCAT
GR4J 3	GR4J HS Dig ASCAT
Modelo Eventos + SMOS+API	Geetha HS Dig SMOS
Modelo Eventos + SMOS	Geetha HS Dig ASCAT
GR4J HS Dig SMOS	Geetha HS Filtro ASCAT
GR4J HS Filtro SMOS	GR4J 3
Geetha HS Filtro SMOS	GR4J HS Filtro SMOS

4.4.3.2 Clúster jerárquico

Paralelamente se realiza el análisis de clúster jerárquico, para de esta manera evaluar otra forma de agrupar los resultados de los modelos y contrastar con los resultados obtenidos con t-SNE. Esto resulta de interés ya que se pueden comparar los resultados obtenidos mediante dos técnicas diferentes donde una (t-SNE) es capaz de captar efectos no lineales en los datos y la otra es una técnica tradicional de clustering. Estos dos enfoques ayudan a validar los resultados obtenidos.

En primer lugar, en el caso del nivel pico (Figura 4-32), se observa que el agrupamiento primario para el medido se da con varios de los modelos de eventos dentro de los cuales están los que incorporan humedad satelital, en particular ASCAT, quedando por fuera de este

primer agrupamiento con el nivel pico medido el modelo actual. Por otro lado, se muestran los resultados para tiempo al pico (Figura 4-33) donde se aprecia un agrupamiento muy similar al obtenido con t-SNE donde los modelos de eventos se agrupan con el medido en todos los casos. En particular, para el tiempo pico se encuentra que el medido se agrupa inicialmente con el modelo de eventos más satélite ASCAT.

De esta manera se tiene la comparación de los dos métodos t-SNE y clúster jerárquico donde se llegan a resultados similares en cuanto al agrupamiento de los modelos y las variables medidas. Para obtener mayores certezas sobre los motivos de los agrupamientos se decide evaluar si hay algún efecto causado por la estacionalidad de los eventos, es decir si los agrupamientos se dan por la estación en la que ocurren o si se dan agrupamientos diferentes dependiendo de la época en el año en la que sucedan.

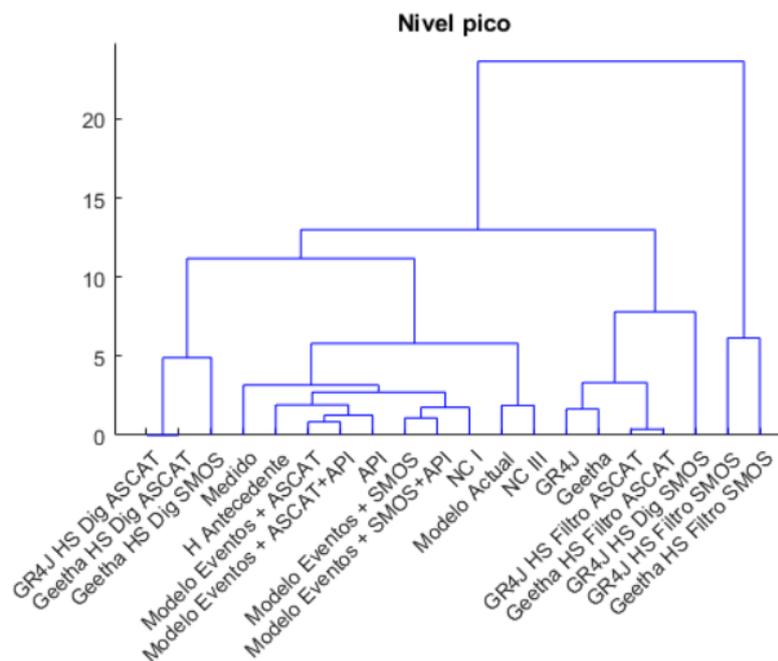


Figura 4-32: Clúster jerárquico para el nivel pico.

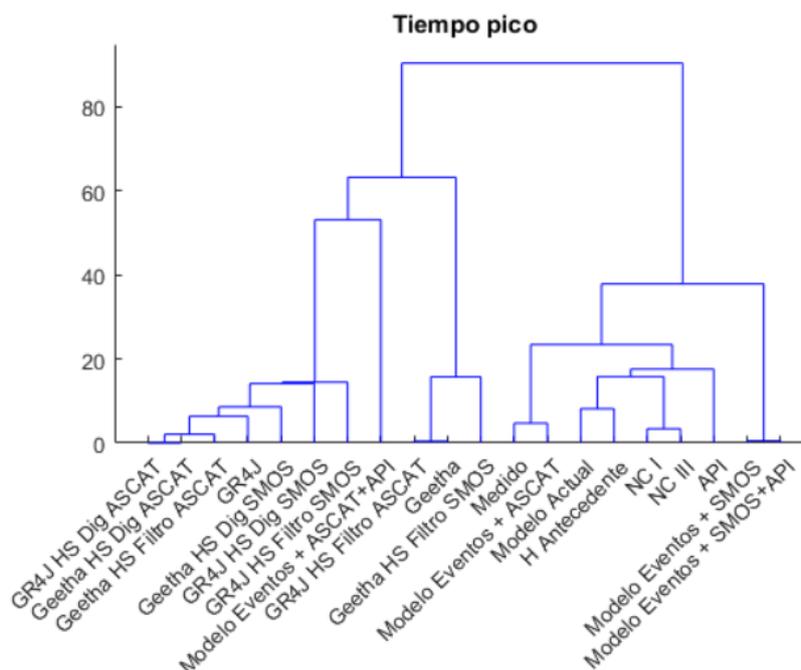


Figura 4-33: Clúster jerárquico para el tiempo pico.

4.4.3.3 Comparación invierno-verano

Se realiza una discretización entre invierno (de abril hasta setiembre) y verano (de octubre hasta marzo) para los eventos de manera de poder vislumbrar si hay efectos de estacionalidad en el agrupamiento de los resultados de los diferentes modelos. En primer lugar, se toman todos los modelos como las variables y los eventos como los individuos obteniendo una matriz resultados de 19×14 , de esta manera se evalúa si los eventos que pertenecen a una época en el año se agrupan en un clúster. Esto se realiza para el nivel pico (Figura 4-34) y para el tiempo al pico (Figura 4-35).

Observando los resultados obtenidos para las dos variables, es claro que para esta selección de estaciones no se forman clúster que coincidan con la misma, sin embargo, en el caso del tiempo al pico, se observa un agrupamiento de los eventos. Es por eso que se evalúa si la elección de la división en el año afecta el agrupamiento. De Figura 4-34 a Figura 4-36, se observa como hay meses de estaciones diferentes que no son los que definen el límite que se agrupan por lo que no se aprecia que el agrupamiento se deba a una estacionalidad. De todas formas, para evaluar posibles afectaciones en los agrupamientos debido a los procesos que pesan para cada estación en la modelación se repiten los análisis de clúster y t-SNE separando en dos estaciones.

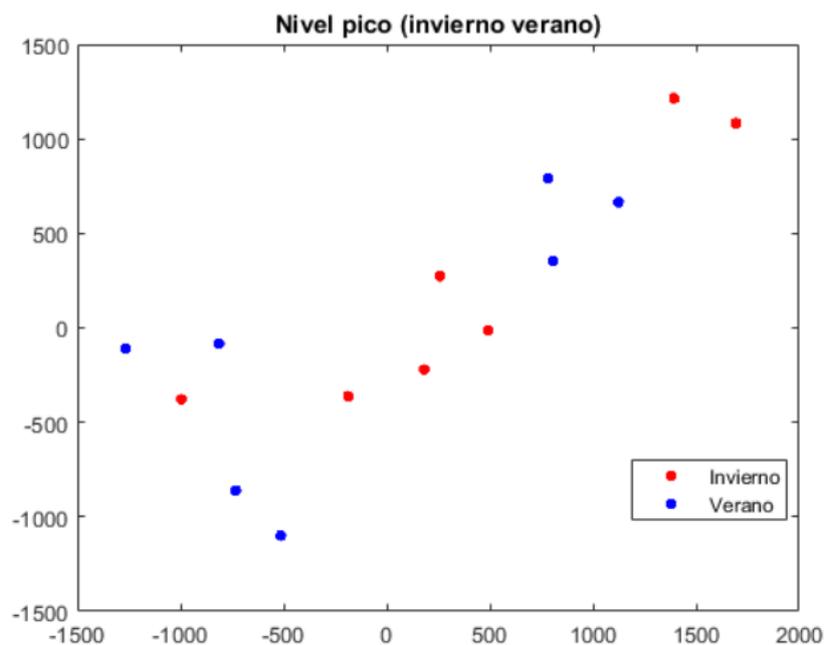


Figura 4-34: t-SNE para separación de eventos por estación para el nivel pico.

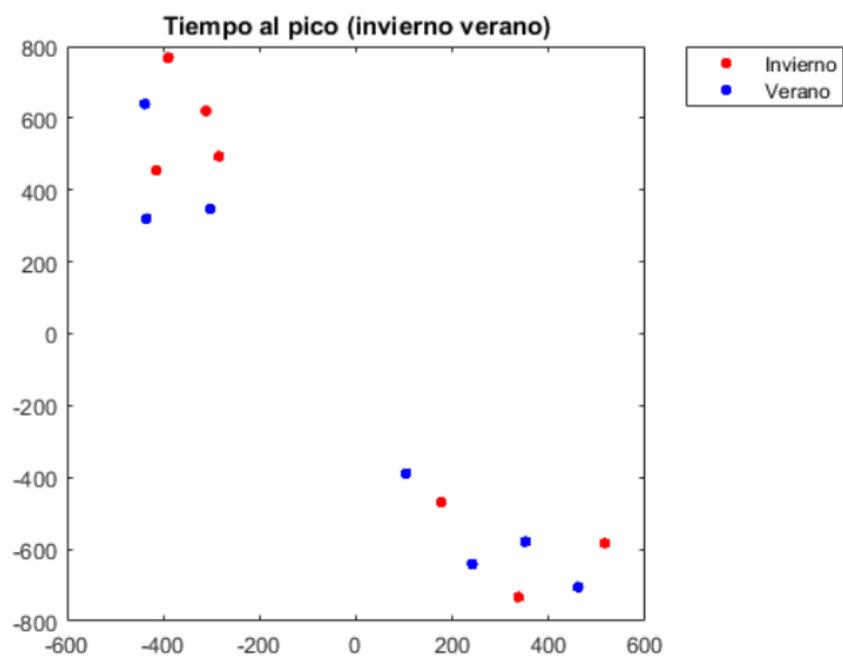


Figura 4-35: t-SNE para separación de eventos por estación para el tiempo pico.

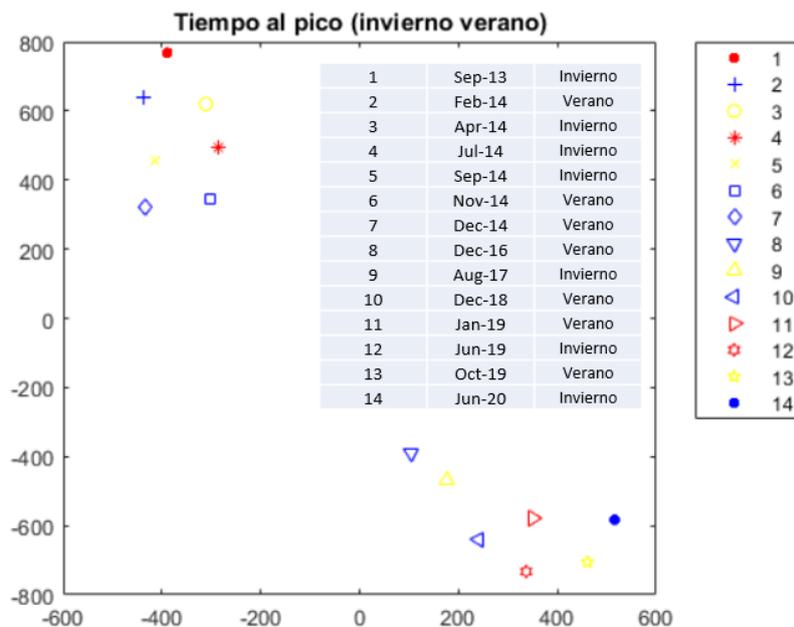


Figura 4-36: t-SNE para separación de eventos por estación evaluando evento a evento.

Al pasar al agrupamiento por estaciones, se observa un comportamiento similar al que se da tomando todos los eventos para el nivel pico (Figura 4-37 y Figura 4-38). En cambio, para el tiempo al pico (Figura 4-37 y Figura 4-38), se observa como para los eventos de invierno (Figura 4-38) la agrupación es diferente (se agrupa el medido con los modelos continuos) y para el caso de invierno la agrupación es más marcada que tomando todos los eventos.

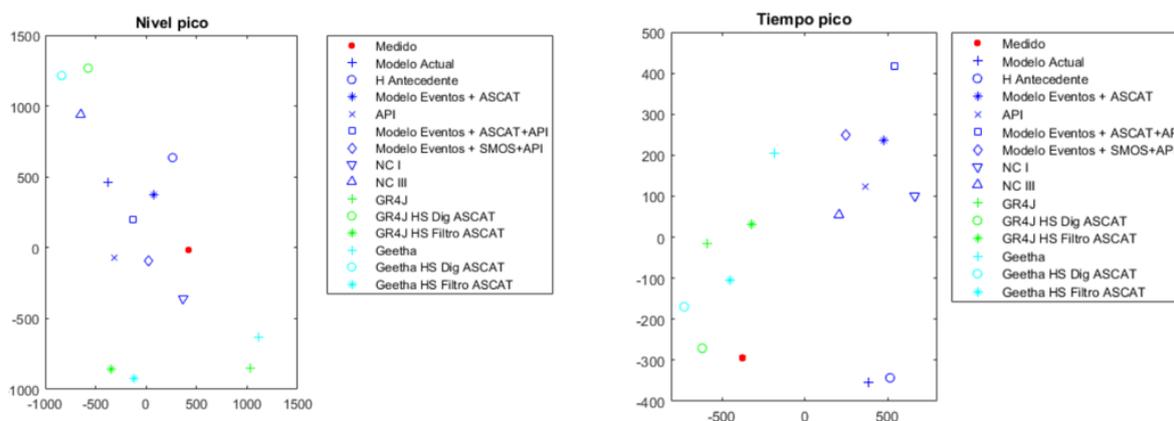


Figura 4-37: t-SNE para eventos correspondientes a verano.

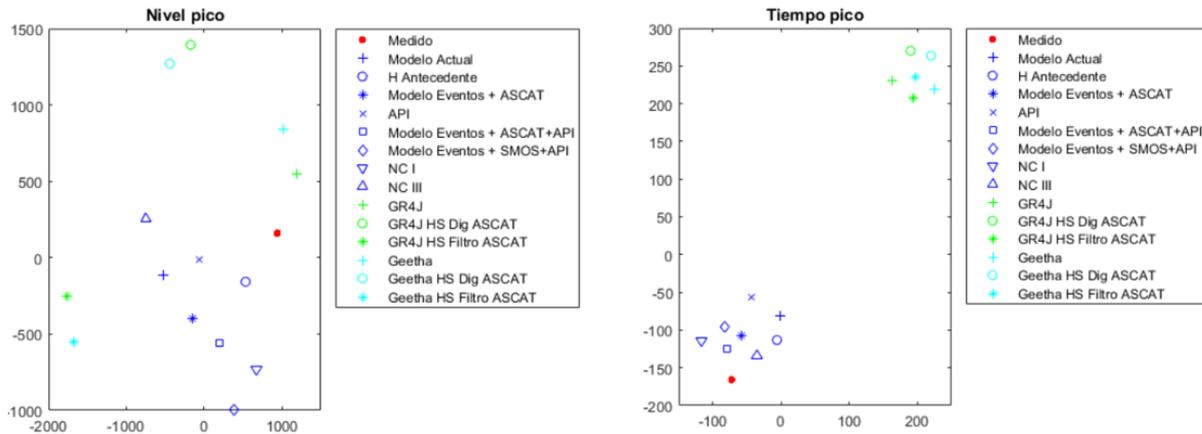


Figura 4-38: t-SNE para eventos correspondientes a invierno.

Si se toma el clúster jerárquico para realizar un análisis similar se observan (Figura 4-39 y Figura 4-40) los mismos resultados que los obtenidos a partir de t-SNE. Para el caso del tiempo al pico, los niveles medidos se agrupan con algunos de los modelos continuos. Para el nivel pico se observa un comportamiento similar a tomar todos los eventos.

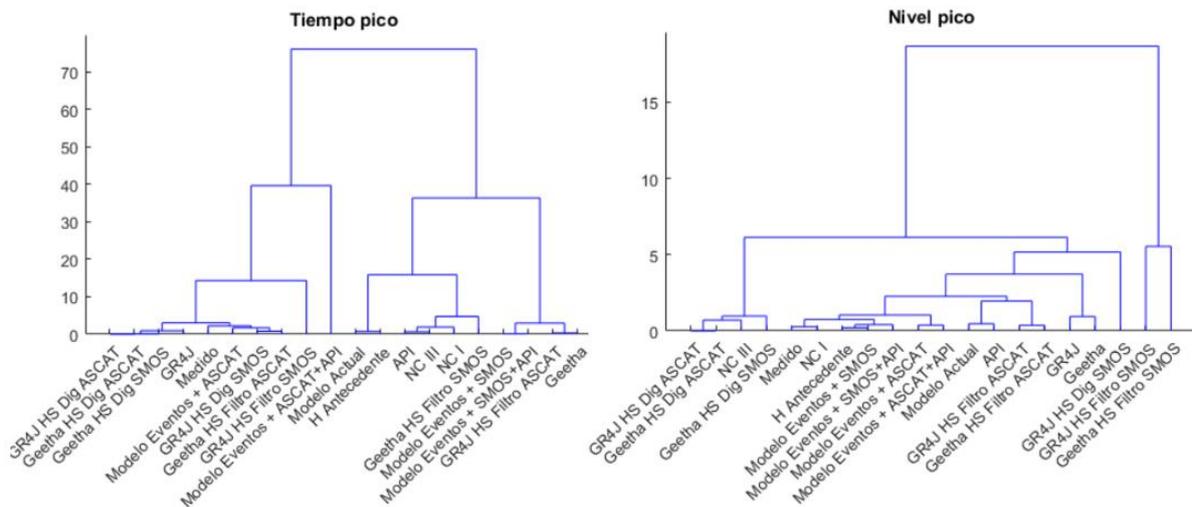


Figura 4-39: Clúster jerárquico para eventos de verano.

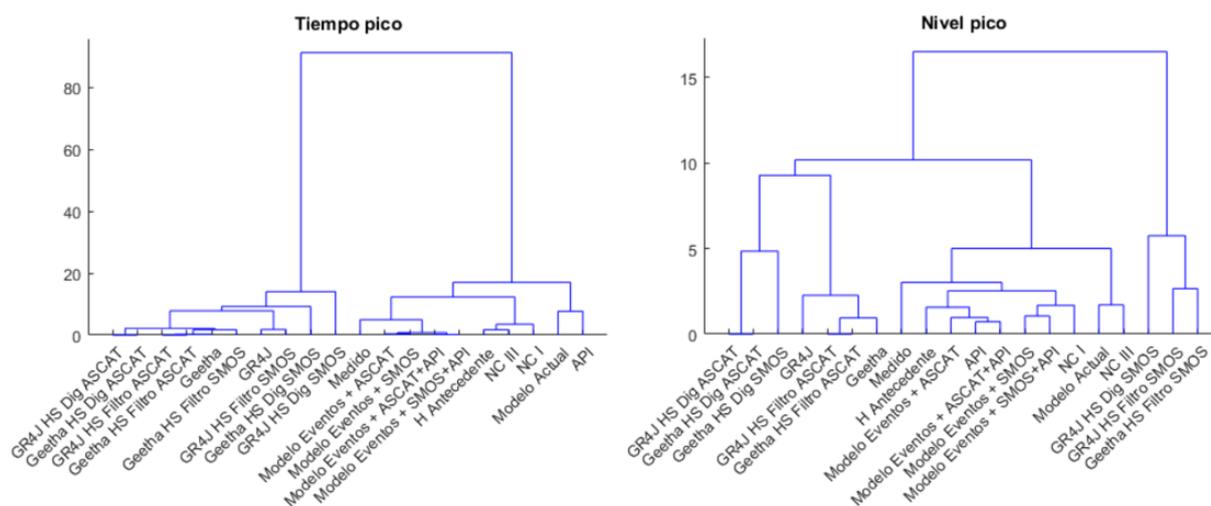


Figura 4-40: Clúster jerárquico para eventos de invierno.

Por otro lado, se vuelven a calcular los indicadores separando entre invierno y verano, para evaluar si estos cambios de agrupamiento traen aparejado un cambio en los valores de los indicadores. En Figura 4-41 y Figura 4-42, se presentan los resultados obtenidos para los eventos correspondientes a verano y a invierno respectivamente. Se observa que para los meses de invierno la performance de los modelos es mejor. Se aprecia también un buen comportamiento de los modelos continuos para los eventos de invierno. En este punto se debe aclarar que para los eventos con datos de humedad de satélite SMOS solamente se cuenta con tres eventos. Para el resto de las propuestas de modelos evaluadas se tienen 7 eventos por estación.

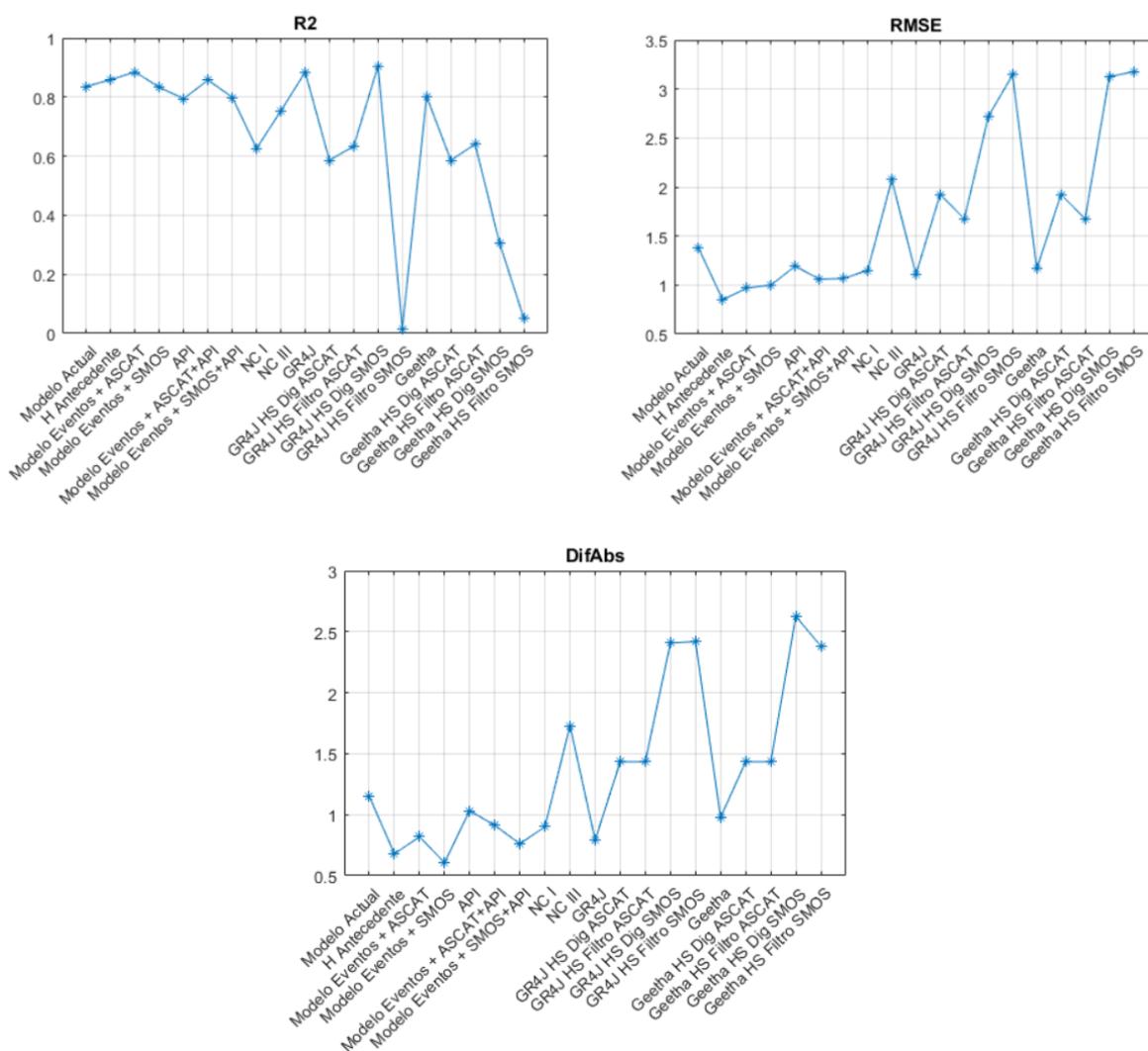


Figura 4-41: Indicadores correspondientes a verano.

Como se mencionó anteriormente, se observa que para los eventos de invierno el valor de los indicadores es levemente mejor que para el caso de verano. También se observa que para todos los indicadores los mejores resultados se obtienen para el caso de los modelos de eventos, siendo los modelos que incorporan HS medida con satélite y la incorporación de la AMC según la propuesta del NRCS los de mayor mejora entre estos.

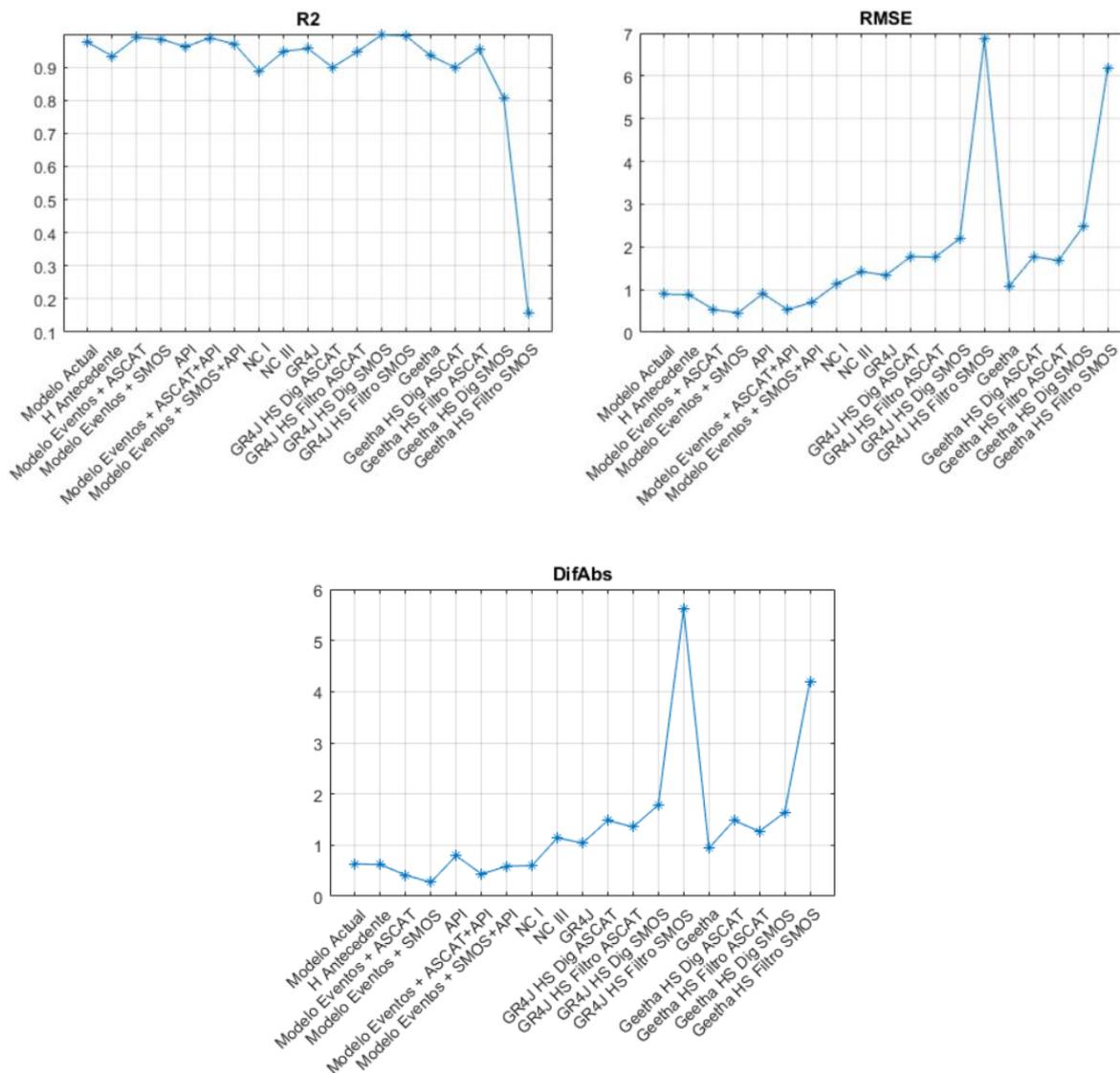


Figura 4-42: Indicadores correspondientes a invierno.

De esta forma, en cuanto a la comparación de resultados, puede remarcarse que a partir del análisis realizado en esta última sección y en las anteriores, se aprecia una tendencia a la mejora en los indicadores y en la performance del modelo de eventos cuando se utilizan productos de HS satelital, en particular de ASCAT, o cuando se incorpora la AMC como propone el método del número de curva. A partir de esto y para la siguiente sección es que se adopta el modelo de eventos con incorporación de HS ASCAT, como la de mejor performance. Esta decisión se retoma más adelante en la sección Discusión (4.6).

4.5 Análisis costo-beneficio

La presente sección muestra los resultados obtenidos del análisis costo-beneficio, que se describió en sección 3.9. Para esto, en primer lugar, se observan los beneficios relativos en cada evento obteniendo la diferencia entre el modelo actual y los resultados de la propuesta de incorporación de HS con mejor performance.

En este caso, la propuesta seleccionada fue la correspondiente al modelo de eventos con HS de ASCAT, por lo que se toman los resultados de la misma. Una vez seleccionada, como ya se mencionó en sección 3.9, se calcula la diferencia entre los costos asociados a los pronósticos y los costos de los datos medidos y, a partir de esta diferencia, se cuantifica la pérdida ocasionada por un pronóstico no acertado. Comparando estas pérdidas entre modelo actual y modelo de eventos con HS ASCAT, se puede cuantificar el ahorro como se puede ver en Figura 4-43.



Figura 4-43: Ahorro por mejoras.

A su vez, se cuantifican los costos asociados a implementar la incorporación de HS en el modelo para comparar con los beneficios de una mejora en el pronóstico. Esto se determina en base a la identificación y cuantificación de los costos de actividades y materiales asociados a la operativa del sistema que se identificaron en la descripción metodológica del análisis (sección 3.9). Estos costos se obtienen de valores actualizados de mercado. A su vez, para poder determinar la relación beneficio-costos, se toman dos alternativas, una tomando como beneficio el promedio de ahorro de todos los eventos evaluados, la otra en función de una mejora en el pronóstico igual a la diferencia entre el indicador DifAbs correspondiente al modelo actual y modelo de eventos más ASCAT para los niveles de afectación menor y afectación sensible (amarillo y rojo). Este indicador, en el caso del modelo de eventos con HS ASCAT y el modelo actual, toma un valor de 0.62 m y 0.89 m respectivamente, lo cual

constituye una diferencia (o mejora) de 0.27 m en promedio para todos los eventos. A efectos prácticos para la comparación se traduce esta diferencia como una mejora en 25 cm respecto al modelo actual. De esta forma se obtienen tres valores para el ratio costo-beneficio que se presentan en Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Ratio beneficio-costo para el nivel pico.

Beneficio	Ratio Beneficio-Costo
25 cm alerta amarilla	3.41
25 cm alerta roja	12.63
Promedio en los eventos	15.05

Por otro lado, se cuantifica el beneficio asociado a la mejora en el tiempo pico. Para esto, como se menciona en la descripción de la metodología, se toma el valor del beneficio económico en el nivel y se lo pondera por el tiempo de diferencia entre los modelos seleccionados. De esta forma se obtienen nuevos valores para el ahorro y la relación beneficio-costos (Figura 4-44).

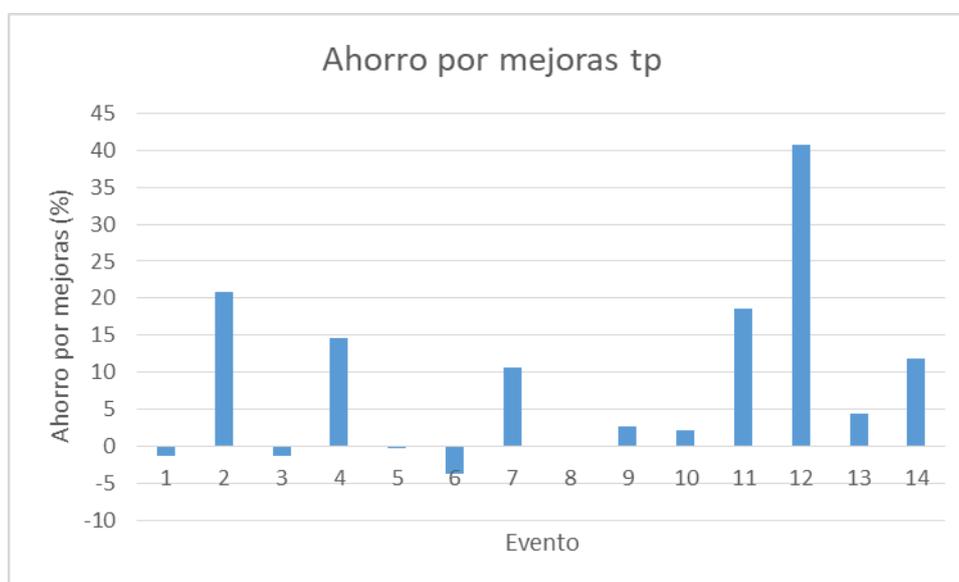


Figura 4-44: Ahorro por mejoras para el tiempo pico.

A su vez, en Tabla 4-14, se presentan los resultados para los ratios calculados anteriormente, pero en el caso de la inclusión de la mejora en el tiempo pico.

Tabla 4-14: Ratio beneficio-costos para el tiempo pico.

Beneficio	Ratio Beneficio-Costo
25 cm alerta amarilla	5.11
25 cm alerta roja	18.95
Promedio en los eventos	22.57

4.6 Discusión

En esta sección se busca comentar y presentar una breve discusión acerca de lo mostrado en el presente capítulo de manera de englobar todos los resultados expuestos. Es por esto que se comenta, en primer lugar, lo mostrado en los resultados de la comparación de la HS medida *in situ* vs satelital, luego los principales resultados de los modelos continuos y lo de eventos, posteriormente se discuten ciertos resultados obtenidos en la comparación de modelos y finalmente se analizan otros enfoques para el análisis costo beneficio.

4.6.1 Comparación HS medida *in situ* vs satelital

En primer lugar, en lo referente a lo expuesto en sección 4.1, como se puede observar a partir de Figura 4-1 y Tabla 4-1 los resultados de los puntos medidos *in situ*, tienen comportamiento similar a los obtenidos con satélite. Esto es de destacar ya que la principal importancia de estos productos es que capten el comportamiento de la variable. Si bien en este aspecto los resultados son buenos, vale aclarar que los valores que toma la variable obtenida con los diferentes métodos pueden no ser tan exacta. También es de recaudo el hecho que para las medidas *in situ*, se cuenta con datos puntuales correspondientes al sitio de medición, mientras que para el caso del satélite se pondera la variable en un área correspondiente al píxel o celda. En este aspecto lo ideal sería contar con redes de monitoreo de HS como se tiene en otras partes del mundo (Estados Unidos y Europa), pero no se cuenta con redes de ese tipo en Uruguay.

4.6.2 Modelos de eventos

En cuanto a la modelación de eventos, en primer lugar, se debe aclarar, como ya se menciona en el documento, que la calibración y validación del modelo se realizó en trabajos anteriores (Silveira et al. 2017), De todas formas, en este trabajo, se actualiza la cantidad de eventos en los que se evalúa el modelo para poder compararlo con los modelos con propuestas de incorporación de HS. Esto hace que los indicadores y errores medios del modelo no sean los mismos que en trabajos publicados anteriormente (Chreties et al. 2016). A su vez, vale remarcar que además de trabajar con el modelo incorporando HS también se utilizaron variantes del modelo del NRCS propuestas por el mismo método, encontrándose resultados que mejoran la performance del modelo actual para el tiempo pico. Por otro lado, en cuanto a la incorporación de HS en el modelo, no se descarta que haya otras formulaciones válidas para la incorporación. De las posibles formulaciones, se eligió la que presentaba mayores fortalezas desde el punto de vista conceptual, lo cual se vio reflejado en la mejora en performance. Un aspecto a tener en cuenta es que las limitantes propias del modelo del NRCS, como puede ser las dificultades en acertar al tiempo pico y al comportamiento de la rama ascendente del hidrograma, no pueden ser salvadas por la incorporación del estado antecedente de HS con el dato satelital como puede apreciarse en lo presentado en Figura 4-10 y Figura 4-11.

4.6.3 Modelos continuos

Dentro de la modelación hidrológica continua, se obtuvieron resultados aceptables para ambos modelos para la re-calibración para eventos extremos. Si bien los resultados fueron buenos, la calibración resultó ser sensible al umbral elegido, esto hace que los parámetros de los modelos sean útiles para eventos extremos de determinada magnitud, i.e. eventos que generen un nivel mayor a 3 metros en la ciudad de Durazno. También vale aclarar que la calibración de ambos modelos se realizó con ambos acoplados al modelo hidrodinámico, esto se debe a que la estación hidrométrica se encuentra en dicho punto y además era el sitio donde se deseaba simular los niveles. La opción de calibrar los modelos hidrológicos por subcuencas se descartó debido a la falta de estaciones de medición en los puntos de cierre. Finalmente, en este punto, cabe aclarar que los métodos utilizados para la incorporación de HS en los modelos hidrológicos continuos, si bien son de los más utilizados en la actualidad, existen otras formas de calcular la variable para representar su valor en diferentes capas del suelo o para introducirla en un modelo hidrológico, el alcance de este trabajo no permitió abarcar todas las técnicas existentes.

4.6.4 Comparación de resultados

En lo referente al análisis de resultados, en primer lugar, se debe aclarar que las variables seleccionadas para la comparación (nivel pico y tiempo pico) son las dos variables más importantes en cuanto a la alerta temprana ante inundaciones, es por esto que, si bien la elección de tiempo pico y nivel pico puede ser arbitraria, no presentan mayor discusión. Por otro lado, es claro que además de estas dos variables se podrían haber elegido otras u otra forma de evaluar y comparar los resultados, como podría ser la descomposición de los distintos tipos de flujo (superficial, subsuperficial y subterráneo), pero esto genera problemas a la hora de comparar los resultados de los modelos continuos con el de eventos, debido a la diferente base física y formulación de los diferentes tipos de modelos. A su vez, como puede observarse en Tabla 4-10, los resultados correspondientes a los modelos de eventos son notoriamente mejor que los modelos continuos, esto se debe principalmente a que, a pesar que los modelos continuos se recalibraron para niveles altos, los modelos de eventos se formulan expresamente para eventos de magnitud alta por lo que es de esperar que su desempeño sea mejor para eventos extremos que la performance de los modelos continuos que en su base física tiene que tener la capacidad de representar caudales bajos y altos. No hay que dejar de tener en cuenta que el método del NRCS es de amplio reconocimiento a nivel mundial y a nivel local.

Por otra parte, en la comparación de los resultados separando en estación activa e inactiva (invierno-verano), se observa que la performance de los modelos cambia, esto podría estar explicado por una estacionalidad en el régimen de caudales, que permita que los modelos simulen mejor una estación que otra. Sin embargo, esto no es así, a la hora de evaluar los eventos, la separación no se marcó por estaciones, si no que eventos de la misma estación pertenecían a un grupo. Para verificar esto, se varió la elección de los meses de separación

de estaciones, observando si la agrupación de los eventos no dependía de la elección de los mismos, a su vez dentro de los grupos formados quedaban mezclados eventos que distaban temporalmente de los meses de separación. Esto marca que las diferencias no se deben a una estacionalidad en los eventos, sino que podría estar explicado más por la forma de representar de los propios modelos, por su estructura en sí o por el tipo de evento que se está modelando en cada caso, que no necesariamente puede estar explicado por una estacionalidad climática o en los eventos. Finalmente es este aspecto cabe destacar que se observa un agrupamiento más marcado en ciertos casos dependiendo de la estación, en particular para el tiempo pico se observa que para los meses de invierno esta agrupación es notoria, esto podría ser explicado en parte porque en el invierno la humedad de suelo tiene más peso en los procesos y los modelos continuos, que en general no tienen tan buenos resultados en los casos anteriores, se acercan más a los modelos de eventos en este caso.

4.6.5 Análisis costo-beneficio

Finalmente, en cuanto al análisis costo-beneficio, cabe realizar ciertas aclaraciones, por un lado, no pretende ser un análisis exhaustivo de todos los beneficios y costos, pero se cuantifican los principales para de esta forma poder evaluar si las mejoras propuestas aportan al SATI o no. Esta cuantificación, realizada desde el punto de vista económico, es la evaluación de si vale la pena realizar una inversión en equipamiento y tecnología en función del beneficio que puede traer aparejado. Esto hace que, si bien los resultados obtenidos en este punto son rotundos y muestran un marcado beneficio, los mismos pueden tener algún cambio en el enfoque que redunde en algún cambio en los resultados. Esto no va en detrimento de lo realizado, sino que simplemente pretende aclarar que a partir de hipótesis diferentes se podría llegar a algún resultado distinto, pero sin afectar la conclusión final. A su vez, es de valor visualizar que las mejoras que se pueden realizar a medida que avance la tecnología, aumentando la precisión en la medida y conllevando de esta forma una mejora en el modelo, esta mejora no es infinita, tiene un límite. Este límite es el ajuste perfecto del modelo, es decir que generaría pronóstico exacto y a partir de ahí no habría mejoras posibles.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El presente capítulo busca resumir los principales resultados obtenidos en el trabajo de tesis y verificar el cumplimiento de los principales objetivos marcados, así como responder explícitamente a las interrogantes marcadas en la Sección 5.1, al inicio del trabajo. A su vez, se mencionan las líneas futuras y posibles caminos abiertos a seguir a partir de los resultados aquí expuestos (Sección 5.2).

5.1 Resumen de los resultados principales

En primer lugar, como se marcaba en los objetivos del trabajo de tesis, se logró analizar e implementar metodologías para mejorar la performance de los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones en base a la incorporación de datos satelitales de HS. Esto se realizó para diferentes modelos hidrológicos y productos satelitales con diferentes formulaciones, obteniendo resultados muy diferentes en cada caso. En este sentido, como se marca en la primera parte del trabajo, en particular en el capítulo 2, se identificaron diferentes misiones satelitales, capaces de cuantificar de manera correcta la humedad de suelo en los primeros centímetros. Esto se logra a través de estimar con éxito las propiedades dieléctricas de la superficie del suelo, en base a la emisividad del mismo, y a partir de estas propiedades inferir el contenido de humedad del suelo. Con estos datos, las diferentes misiones obtienen diversos productos de humedad de suelo, como se describe en el capítulo 2, los cuales fueron utilizados en variados estudios hidrológicos con buenos resultados a nivel mundial. Si bien en Uruguay no hay antecedentes de la utilización de estos productos en modelación hidrológica, en este trabajo se identificaron tres productos de humedad de suelo, correspondientes a las misiones ASCAT, SMOS y SMAP, que están disponibles para Uruguay y tienen grandes potencialidades para su utilización en modelación hidrológica. Los dos primeros se incorporan en este trabajo en los modelos hidrológicos del SATI Durazno.

En segundo lugar, cabe destacar que se aplicaron tres modelos hidrológicos diferentes acoplados con el modelo hidrodinámico, dos de ellos se modificaron en base a lo realizado en trabajos anteriores y el restante fue implementado específicamente para este trabajo. Todos los modelos y sus modificaciones fueron acoplados con éxito al modelo hidrodinámico, generando nuevas variantes para el funcionamiento del SATI Durazno. Esto implica que, si bien los resultados indican que hay modelos con mejor performance que otros, se pueden evaluar pronósticos con diferentes modelos para poder evaluar la incertidumbre asociada a los modelos en los pronósticos.

Para el caso de los modelos continuo, se logró calibrar ambos con éxito para eventos extremos, pero la performance de ambos no aumentó al agregarle los productos satelitales. Esto pone de manifiesto que, para los modelos utilizados en el trabajo, la forma de incorporación de HS y los productos utilizados no son beneficiosos en cuanto a la performance en el caso de eventos extremos del modelo hidrológico-hidrodinámico utilizado en el SATI Durazno.

Pasando al caso del modelo de eventos, que es con el que se trabaja en el SATI, se obtuvieron mejoras tanto para los valores pico como para el tiempo al pico al agregarle HS satelital al modelo. Esto sucede para ambos productos utilizados en este trabajo, pero a su vez también sucede al incorporar la propuesta de variación del AMC propia del método. Cabe destacar que, dentro de los productos satelitales, el producto de ASCAT es el que obtuvo los mejores resultados siendo la propuesta que en conjunto obtenía la mejor performance.

Finalmente, dentro de las conclusiones, se propone responder las preguntas planteadas en el capítulo de introducción, que se reformulan a continuación.

- *¿Qué información satelital de estimación de HS se dispone para cuencas en Uruguay?*
 - Como se detalla en capítulo 3, existen actualmente operativas tres misiones satelitales que tienen datos de HS satelital presentada en diferentes productos disponibles para todo el mundo, en particular para Uruguay.
- *¿Qué tan precisa es la medida del satélite comparado con medidas in situ?*
 - Según lo expuesto en el capítulo 4 “Resultados”, la tendencia que muestra la variable satelital es muy similar a la medida *in situ*, de todas formas, la información satelital de HS no obtiene los mismos valores que medidas puntuales realizadas en diferentes zonas de Uruguay.
- *¿Cuál es la performance del modelo actual de predicción de crecidas en la ciudad de Durazno, actualizado con los eventos extremos hasta la fecha, luego de su puesta en operación?*
 - Si bien los resultados del modelo operativo se evaluaron en trabajos anteriores, para los eventos de 2015 en adelante no había evaluación. Para estos eventos, se encontró que la diferencia en valor absoluto entre simulado y medido es de 0.92 metros.
- *¿Los resultados obtenidos con el modelo actual de predicción de crecidas en Durazno pueden enriquecerse con la incorporación de productos satelitales de HS?*
 - Se mostró que la performance del modelo actual puede mejorarse con la incorporación de HS satelital. En estos casos, se obtiene una diferencia promedio de 0.44 y 0.62 metros para ASCAT y SMOS respectivamente. A su vez se observaron mejoras en algunos indicadores para otras variantes de incorporación de humedad de suelo, como API y las combinaciones de API con satélite por lo que se podría seguir mejorando en este aspecto.
- *¿Se puede cuantificar esta mejora en el modelo?*
 - Como se muestra en el capítulo 4 “Resultados”, las mejoras en diferentes indicadores son claras para el caso del modelo actual con la incorporación del producto de ASCAT, estos indicadores son adecuados para mostrar las diferencias entre los modelos y propuestas utilizadas. Además, algunos de estos indicadores

son utilizados en el análisis costo-beneficio donde se cuantifica económicamente el beneficio de las mejoras obtenidas a partir de la modelación hidrológica para el SATI.

- *¿Cómo varían los resultados si se utiliza un modelo hidrológico continuo en lugar del modelo de eventos actualmente implementado?*
 - Si se utilizan los modelos continuos sin HS satelital, los resultados son buenos según los indicadores utilizados, pero el modelo de eventos suele tener una mejor performance, en el conjunto de todos los eventos. No se descarta que los resultados de la modelación continua puedan mejorarse si se trabaja con otros modelos o si se busca una adaptación a los modelos continuos utilizando variando la estructura de los mismos.
- *¿Es posible identificar y cuantificar una mejora en la performance de los modelos continuos al agregar productos satelitales de HS?*
 - Acorde a los resultados presentados en este trabajo, para los modelos utilizados y las propuestas de incorporación de HS, no se obtienen mejoras para los modelos continuos. No se descarta que con lo mencionado en el punto anterior se obtengan resultados satisfactorios.
- *Si se identifica una mejora en alguno de los puntos anteriores, ¿Vale la pena el esfuerzo de la implementación de la misma en el modelo actual?*
 - Como se muestra en el Análisis Costo-Beneficio (sección 4.6), el valor ratio Beneficio-Costo es mayor a uno (variando entre 3 y 22 según tablas 4-11 y 4-12) en todos los casos analizados, lo cual muestra que incorporar HS satelital al modelo actual, para las condiciones planteadas en la sección 4.6, redundaría en un beneficio para el SATI.

Finalmente, cabe aclarar, que si bien el modelo actual puede mejorar su performance con la utilización de HS obtenida a partir de productos satelitales, es claro que el SATI Durazno tiene una performance más que satisfactoria actualmente. Esto deja en claro que todas las mejoras propuestas deberían ser tenidas en cuenta como una línea más de pronóstico, i.e. que se utilice el modelo de eventos con la propuesta de incorporación de HS de ASCAT (o SMOS) además del pronóstico del modelo actual.

5.2 Líneas futuras

Todo lo enumerado anteriormente deja en claro que, si bien se arribó a resultados concluyentes en ciertos aspectos, también se generan ciertos puntos que deben continuar explorándose. En primer lugar, se identifica la oportunidad de continuar generando datos de HS medida *in situ* para comparar el comportamiento de los productos de HS satelitales. A su vez, a partir de datos de instrumentos instalados en otras zonas de Uruguay, además de los tres puntos utilizados en este trabajo, se podría generar una red de puntos de medición y de esta forma validar los productos satelitales para diferentes coberturas de suelo en el Uruguay.

Por otro lado, es claro que ciertos aspectos en la modelación hidrológica pueden mejorarse, sobre todo teniendo en cuenta los modelos continuos, los cuales muestran tener buena performance cuando se utilizan con sus formulaciones originales, pero empeoran al incorporarle datos de HS satelital. En este aspecto, desde el punto de vista de la modelación exclusivamente, hay dos caminos que se pueden recorrer. Uno modificando la estructura de los modelos utilizados, un ejemplo claro de esto puede ser lo realizado en Ajmal et al. (2016) donde se combina el modelo GR4J con el método del Número de Curva. La otra opción sería implementar nuevos modelos y evaluar su performance, esto claro está, previa calibración y validación. En este aspecto, se valora la posibilidad de implementar modelos distribuidos que permitan a su vez la comparación de HS a escalas similares al dato satelital. Esto permitiría además una posible calibración de los modelos con HS satelital.

A su vez, siguiendo con los modelos continuos pero con enfoque en HS satelital, es claro que aún queda por resolver la incorporación de HS para los correspondientes reservorios de los modelos. Esto genera la posibilidad de explorar otras formas de incorporar el dato de HS en los modelos para de esta forma generar pronósticos más acertados. En este sentido, también se identifica la chance de poder trabajar con modelos continuos a escala de cuenca sin el acople del modelo hidrodinámico en cuencas donde sea adecuada la implementación de los modelos hidrológicos y se cuente con puntos de medición de caudal, esto permitiría la comparación de escurrimientos pero además la descomposición de los mismos para evaluar el comportamiento del flujo subsuperficial y conocer el estado de los reservorios de los modelos para compararlos y calibrarlos con los datos de HS. Esto también puede ser acompañado de una mayor distribución de sensores *in situ* en la zona de estudio que permita combinar el uso de datos de HS *in situ* y satelital.

Por otro lado, en relación al SATI Durazno en particular, se plantea la oportunidad de aumentar la versatilidad del sistema agregando asimilación de datos. En este sentido y relacionado al presente trabajo, la asimilación de datos de HS satelital en tiempo real es una línea de investigación muy promisoría. En este aspecto se destacan que tanto para ASCAT como para SMOS existen actualmente programas para la obtención de datos en tiempo real (*Near Real Time*), donde se puede disponer de algunos productos poco tiempo después de ser medidos (alrededor de 3 horas dependiendo la misión). A su vez, además

de la asimilación de datos de HS, también se plantea la posibilidad de asimilar datos de nivel a partir de las mediciones telemétricas existentes aguas arriba de la ciudad de Durazno, lo que deja abierta una clara línea en la cual se puede mejorar el sistema.

Es esperable también que, con el paso de los años, el aumento de la tecnología y el desarrollo de las técnicas de medición, la confiabilidad y precisión será cada vez mayor. Por lo que es conveniente acompañar este desarrollo ya que podrían generar mejoras en la estimación de variables como la HS que puede redundar en mejoras en la modelación hidrológica. A su vez, a medida que avance la precisión y la confiabilidad de las medidas satelitales, pasa a ser una variable medida más a escala de cuenca, esto plantea la posibilidad de a partir del conjunto de datos medidos en una cuenca, como pueden ser además la precipitación y la ETP, incorporar técnicas de aprendizaje automático o *machine learning* basadas en datos para complementar la modelación basada en hipótesis físicas.

Finalmente, teniendo en cuenta lo antes expresado y en cuanto a las líneas futuras de trabajo en la temática, se destaca que se está trabajando en un proyecto de Investigación CSIC-INI "Incorporación de datos de humedad de suelo en base a información satelital en el Sistema de Alerta Temprana ante Inundaciones de la ciudad de Artigas". Donde se busca aplicar parte de lo adquirido en esta tesis para el estudio de otra cuenca con una metodología similar, buscando realizar las sugerencias finales y posibles mejoras identificadas en el presente trabajo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Ajmal, M., Khan, T. A., & Kim, T. W. 2016. A CN-based ensembled hydrological model for enhanced watershed runoff prediction. *Water (Switzerland)*, 8 (1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w8010020>
- Albergel, C., Rudiger C., Carrer D., Calvet J.C., Fritz N., Naeimi V., et al. 2009. An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with in-situ observations in southwestern France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13:115–124. doi:10.5194/hess-13-115-2009
- Albergel, C., Rüdiger C., Pellarin T., Calvet J. C., Fritz N., Froissard F., Suquia D., Petitpa A., Pignat B., and Martin E. 2008. “From Near-Surface to Root-Zone Soil Moisture Using an Exponential Filter: An Assessment of the Method Based on in-Situ Observations and Model Simulations.” *Hydrology and Earth System Sciences* 12 (6): 1323–37. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1323-2008>
- Bianchi, J. 2014. Asimilación de datos de humedad del suelo de sensores remotos a un modelo hidrológico de la cuenca del río Gualeguay. 2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras
- Bindlish, R., Jackson T., Cosh M., Zhao T., and O'Neill P. 2015. Global soil moisture from the Aquarius/SAC-D satellite: Description and initial assessment. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 12:923–927. doi:10.1109/LGRS.2014.2364151
- Bittelli, M. 2011. Measuring soil water content: A review. *Horttechnology*, 21, 293e300.
- Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, W. Wagner, V. Naeimi, Z. Bartalis, and S. Hasenauer. 2010. Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14:1881–1893. doi:10.5194/hess-14-1881-2010
- Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., Wagner, W., Hasenauer, S., & Hahn, S. 2012. Assimilation of surface- and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfall-runoff modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7 PART 1), 2542–2555. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2177468>
- Brooks, R. H., Corey, A. T., & Colorado State University. 1964. Hydraulic properties of porous media. Fort Collins: Colorado State University, Hydrology and Water Resources Program.
- Calvache Ulloa, A. 2013. Aplicaciones de las sondas electromagnéticas y de neutrones en la Ingeniería Agrícola.
- Calvet, J.-C., Wigneron J.P., Walker J., Karbou F., Chanzy A., and Albergel C.. 2011. Sensitivity of passive microwave observations to soil moisture and vegetation water content: L-band to W-band. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49:1190–1199. doi:10.1109/TGRS.2010.2050488

- Campbell, G. 1974. A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity From Moisture Retention Data. *Soil Science*. 117. 10.1097/00010694-197406000-00001.
- CEPAL 2014. Manual para la evaluación de desastres. CEPAL https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/35894/S2013806_es.pdf
- Chan, S., Bindlish R., O'Neill P., Njoku E., Jackson T.J., Colliander A., et al. 2016. Assessment of the SMAP Level 2 passive soil moisture product. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54:4994–5007. doi:10.1109/TGRS.2016.2561938
- Chreties, C; Crisci, M; Narbondo, S; Schenzer, D; Pienika, R. 2017. “Mejora en la estimación de caudales fluviales en Uruguay y su aplicación para evaluar el potencial de generación hidrocínético”. Informe final proyecto ANII-FSE_1_2014_1_102258, 2017, Uruguay.
- Chreties, C; De Vera, A; Crisci, M; Alonso, J; Silveira, L. 2016. “Sistema de Alerta Temprana para la previsión de avenidas en la ciudad de Durazno: Evaluación de su desempeño y extensión a otras ciudades de Uruguay”, Memorias del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR LAD , Lima, Perú , 2016.
- Chung, W. H., Wang, I. T., & Wang, R. Y. 2010. Theory-Based SCS-CN Method and Its Applications. December, 1045–1058.
- Clapp, Roger B, and George M Hornberger. 1978. “Empirical Equation for Some Soil Hydraulic Properties” 14 (4)
- Das, N.N., and Mohanty B.P. 2006. Root zone soil moisture assessment using remote sensing and vadose zone modeling. *Vadose Zone J.* 5:296–307. doi:10.2136/vzj2005.0033
- Das, N.N., Mohanty B.P., and Njoku E.G. 2010. Profile soil moisture across spatial scales under different hydroclimatic conditions. *Soil Sci.* 175:315–319. doi:10.1097/SS.0b013e3181e83dd3
- De Lannoy, G.J.M., and Reichle R.H. 2016. Global assimilation of multiangle and multipolarization SMOS brightness temperature observations into the GEOS-5 catchment land surface model for soil moisture estimation. *J. Hydrometeorol.* 17:669–691. doi:10.1175/JHM-D-15-0037.1
- Dingman, S. L. 2002. *Physical Hydrology*. Illinois: Waveland Press, Inc.
- Ducharne, A., Koster, R., Suarez, M., Stieglitz, M., & Kumar, P. 2000. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 2. Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.* 105. 24823-24838. 10.1029/2000JD900328.
- Dumedah, G., Walker J.P., and Merlin O. 2015. Root-zone soil moisture estimation from assimilation of downscaled soil moisture and ocean salinity data. *Adv. Water Resour.* 84:14–22. doi:10.1016/j.advwatres.2015.07.021

- Durán A. 1996 “Clasificación en grupos hidrológicos de los suelos del Uruguay”, Publicación de la Facultad de Agronomía. Área de Suelos y Aguas, Cátedra de Edafología.
- Entekhabi, D., Njoku E.G., O’Neill P.E., Kellogg K., Crow W.T., Edelstein J., et al. 2010. The Soil Moisture Active/Passive Mission (SMAP). Proc. IEEE 98:704–716. doi:10.1109/JPROC.2010.2043918
- Entekhabi, D., S. Yueh, O’Neill P.E., Kellogg K., Allen A., Bindlish R., et al. 2014. SMAP handbook: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space. Publ. JPL 400-1567. NASA, Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA.
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K., & Pandey, R. P. 2008. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. Water resources management, 22(2), 165-190.
- Goniadzi, D., Thibeault, M., Lozza, H., Uriburu Quirno, M. y Dadamia, D., 2011. SAC-D/Aquarius Announcement of Opportunity. Assimilation of Soil Moisture Estimates into Flow-Forecasting Hydrologic Models. Instituto Nacional del Agua. Ezeiza, Argentina.
- González-Zamora, A., Sánchez N., Martínez-Fernández J., and Wagner W. 2016. Root-zone plant available water estimation using the SMOS-derived soil water index. Adv. Water Resour. 96:339–353. doi:10.1016/j.advwatres.2016.08.001
- Hinton G.E., and Roweis S.T., 2002. Stochastic Neighbor Embedding. In Advances in Neural Information Processing Systems, volume 15, pages 833–840, Cambridge, MA, USA, 2002. The MIT Press.
- Hong Y., Zhang Y., and Khan S. I. 2016. Hydrologic Remote Sensing: Capacity Building for Sustainability and Resilience (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA.
- INE 2011. <https://www.ine.gub.uy/censos-2011>
- Jackson, T.J., R. Bindlish, M.H. Cosh, T. Zhao, P.J. Starks, D.D. Bosch, et al. 2012. Validation of Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the U.S. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 50:1530–1543. doi:10.1109/TGRS.2011.2168533
- Jackson, T.J., M.H. Cosh, R. Bindlish, P.J. Starks, D.D. Bosch, M.S. Seyfried, et al. 2010. Validation of Advanced Microwave Scanning Radiometer soil moisture products. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 48:4256–4272. doi:10.1109/TGRS.2010.2051035
- Jiang, D., & Wang, K. 2019. The role of satellite-based remote sensing in improving simulated streamflow: A review. Water (Switzerland), 11(8), 10–14. <https://doi.org/10.3390/w11081615>
- Kerr, Y. J. 2013. CATDS SMOS L3 soil moisture retrieval processor, Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD).
- Kohler M. A. and Linsley R. K., 1951. “Predicting Runoff from Storm Rainfall,” Research Paper 34, US Weather Bureau, Washington DC, 1951.

- Koster, R. D., Suarez, M. J., Ducharne, A., Stieglitz, M., & Kumar, P. 2000. A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 1. Model structure. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D20), 24809–24822. <https://doi.org/10.1029/2000JD900327>
- Lacava, T., Cuomo, V., Di Leo, E. V., Pergola, N., Romano, F., and Tramutoli, V. 2005. Improving soil wetness variations monitoring from passive microwave satellite data: the case of April 2000 Hungary flood, *Rem. Sens. Environ.*
- Leach, J. M., Kornelsen, K. C., & Coulibaly, P. 2018. Assimilation of near-real time data products into models of an urban basin. *Journal of Hydrology*, 563(April), 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.064>
- Le Vine, D.M., Dinnat, E., Lagerloef, G.S.E., de Matthaeis, P., Abraham, S., Utku, C. & Kao, H. 2014. Aquarius: Status and Recent Results. *Radio Science*. 49. 10.1002/2014RS005505.
- Liang, S., & Wang, J. 2019. *Advanced Remote Sensing*. Academic Press.
- Lievens, H., Tomer, S. K., Al Bitar, A., De Lannoy, G. J. M., Drusch, M., Dumedah, G., ... & Roundy, J. K. 2015. SMOS soil moisture assimilation for improved hydrologic simulation in the Murray Darling Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 168, 146-162.
- Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., & Moramarco, T. 2015. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoff modelling: A complex recipe? In *Remote Sensing* (Vol. 7, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/rs70911403>
- Matgen, P., Fenicia, F., Heitz, S., Plaza, D., de Keyser, R., Pauwels, V. R. N., Wagner, W., & Savenije, H. 2012. Can ASCAT-derived soil wetness indices reduce predictive uncertainty in well-gauged areas? A comparison with in situ observed soil moisture in an assimilation application. *Advances in Water Resources*, 44, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.022>
- Mecklenburg, S., M. Drusch, L. Kaleschke, N. Rodriguez-Fernandez, N. Reul, Y. Kerr, et al. 2016. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity mission: From science to operational applications. *Remote Sens. Environ.* 180:3–18. doi:10.1016/j.rse.2015.12.025
- MGAP 2001. Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay a escala 1/1000.000. División Suelos y Aguas, Dirección de Recursos Naturales, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay
- Mishra, S. K., Sahu, R. K., Eldho, T. I., & Jain, M. K. 2006. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resources Management*, 20(5), 643–660. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-9000-4>
- Mohanty, B.P. 2013. Soil hydraulic property estimation using remote sensing: A review. *Vadose Zone J.* 12(4). doi:10.2136/vzj2013.06.0100

- Mohanty, B., Cosh, M., Lakshmi, V. & Montzka, C. 2017. Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science. *Vadose Zone Journal*. 16. 10.2136/vzj2016.10.0105.
- Molfino J.H. y Califra A. 2001. "Agua Disponible de las Tierras del Uruguay". División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.
- Montero, R. A., Schwanenberg, D., Krahe, P., Lisniak, D., Sensoy, A., Sorman, A. A., & Akkol, B. 2016. Moving horizon estimation for assimilating H-SAF remote sensing data into the HBV hydrological model. *Advances in Water Resources*, 92(June), 248–257. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.04.011>
- Moriasi et al. 2007. Moriasi, D., & Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R.D. & Veith, T. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 50. 10.13031/2013.23153.
- Muñoz-Sabater, J. 2015. Incorporation of passive microwave brightness temperatures in the ECMWF soil moisture analysis. *Remote Sens*. 7:5758–5784. doi:10.3390/rs70505758
- MVOTMA 2020. Monitoreo de Calidad de Agua de la Cuenca del Río Yí. Informe de datos de calidad de agua superficial – 2019. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Informe-Monitoreo-Rio-Yi.pdf>
- NASA 2012. What are passive and active sensors? https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html
- Narbondo, S., Gorgoglione, A., Crisci, M. & Chreties, C. 2020. Enhancing Physical Similarity Approach to Predict Runoff in Ungauged Watersheds in Sub-Tropical Regions. *Water*. 12. 528. 10.3390/w12020528.
- Panciera, R., J.P. Walker, J.D. Kalma, E.J. Kim, K. Saleh, and J.P. Wigneron. 2009. Evaluation of the SMOS L-MEB passive microwave soil moisture retrieval algorithm. *Remote Sens. Environ*. 113:435–444. doi:10.1016/j.rse.2008.10.010
- Patil, A., & Ramsankaran, R. A. A. J. 2017. Improving streamflow simulations and forecasting performance of SWAT model by assimilating remotely sensed soil moisture observations. *Journal of Hydrology*, 555, 683–696. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.058>
- Patil, A., & Ramsankaran, R. A. A. J. 2018. Improved streamflow simulations by coupling soil moisture analytical relationship in EnKF based hydrological data assimilation framework. *Advances in Water Resources*, 121, 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.08.010>
- Pauwels, V. R. N., Hoeben, R., Verhoest, N. E. C., & De Troch, F. P. 2001. The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation. *Journal of Hydrology*, 251(1–2), 88–102. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00440-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00440-1)

- Perrín, C., Michel, C., Andreassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* p 279, 275-289
- Petropoulos, George P., Griffiths, Hywel & Dorigo, Wouter & Xaver, Angelika & Gruber, Alexander. 2013. Surface Soil Moisture Estimation: Significance, Controls and Conventional Measurement Techniques. 10.1201/b15610-4.
- Reichle, R., G. De Lannoy, R. D. Koster, W. T. Crow, J. S. Kimball, and Q. Liu. 2018. *SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/60HB8VIP2T8W>.
- Ridler, M.E., H. Madsen, S. Stisen, S. Bircher, and R. Fensholt. 2014. Assimilation of SMOS-derived soil moisture in a fully integrated hydrological and soil–vegetation–atmosphere transfer model in western Denmark. *Water Resour. Res.* 50:8962–8981. doi:10.1002/2014WR015392
- Shaxson, F, and R Barber. 2008. Optimización De La Humedad Del Suelo Para La Producción Vegetal-El Significado De La Porosidad Del Suelo. *Boletines de Suelos de La Fao*. FAO. <https://books.google.com.uy/books?id=K-JwJZw1hMwC>.
- Silveira, L., Usera, G., Cazes, G., Chreties, C., Alonso, J., Crisci, M., ... Narbondo, S. 2017. SATI-UY: Sistema de Alerta Temprana para precisión y gestión de Inundaciones. Montevideo.
- Silveira, Luis, Christian Chreties, Magdalena Crisci, Gabriel Usera, and Jimena Alonso. 2015. "Sistema de Alerta Temprana Para Previsión de Avenidas En La Ciudad de Durazno." *Innotec* 0 (10): 56–63. <https://doi.org/10.26461/innotec.v0i10>
- Silveira, L., López G., Chreties C., y Crisci, M., 2012. Steps towards an early warning model for flood forecasting in Durazno city in Uruguay. *Journal of Flood Risk Management*, 5(3), pp.270-280.
- Silveira L., Charbonnier F. & Genta J. L. 2000. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure, *Hydrological Sciences Journal*, 45:1, 3-12, DOI: 10.1080/02626660009492302
- SINAE, 2019. Información general sobre Inundaciones. <https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/politicas-gestion/inundaciones>
- SNRCC, 2019. Ficha Técnica 73 SAT. <http://monitorcdn.mvotma.gub.uy/images/medidas-cdn/73-FT-SAT.pdf>
- Srivastava, P.K., Petropoulos, G.P. & Kerr, Y. 2016. Satellite Soil Moisture Retrieval: Techniques and Applications.
- Thibeault, M., Caceres, J., Dadamia, D., Soldano, A., Uriburu Quirno, M., Guerrieri, J., Edrosa, R., Palomeque, M., Romaldi, L., Pucheta, Julian & Mogadouro, J. & Luca, E. & Bustos, S. & Agüero, S., Pascual, I. & Mariotti, M. 2015. Spatial and temporal analysis of the Monte Buey SAOCOM and SMAP core site. 969-971. 10.1109/IGARSS.2015.7325929.

- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16(3), 574– 582, doi:[10.1029/WR016i003p00574](https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574).
- Ulaby, F.T., Moore, M.K. and Fung, A.K., 1986. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, Vol. 3. Artech House, Norwood, MA.
- Uriburu Quirno, M. 2019. “Asimilación de Estimaciones Remotas de Humedad de Suelo a Modelos Hidrológicos de Pronóstico”. Congreso Argentino de Tecnología Espacial, CATE 2019 (Buenos Aires, abril 2019).
- US Army Corps of Engineers, 2011. HEC-RAS 4.1 Hydraulics Manual. Washington: US Army.
- USDA 2010. Part 630 Hydrology -National Engineering Handbook (NEH). Natural Resources Conservation Service , U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Van der Maaten, Laurens. 2009. Learning a Parametric Embedding by Preserving Local Structure. *Journal of Machine Learning Research - Proceedings Track*. 5. 384-391.
- Van der Maaten, Laurens & Hinton, Geoffrey. 2008. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*. 9. 2579-2605.
- Van Genuchten, Martinus. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. *Soil Science Society of America Journal*. 44. 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Vereecken, H., J. A. Huisman, H. Bogaen, J. Vanderborght, J. A. Vrugt, and J. W. Hopmans. 2008. “On the Value of Soil Moisture Measurements in Vadose Zone Hydrology: A Review.” *Water Resources Research* 46 (4): 1–21. <https://doi.org/10.1029/2008WR006829>.
- Verma, S., Verma, R. K., Mishra, S. K., Singh, A., & Jayaraj, G. K. 2017. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 62(12), 1891–1930. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1334166>
- Wagner, W., G. Lemoine, and H. Rott. 1999. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sens. Environ.* 70:191–207. doi:10.1016/S0034-4257(99)00036-X
- Wanders, N., Karssenbergh, D., De Roo, A., De Jong, S. M., & Bierkens, M. F. P. 2014. The suitability of remotely sensed soil moisture for improving operational flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2343–2357. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2343-2014>
- Wang, J. R., & Schmugge, T. J. 1980. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 18, 288e295.

Werner, M., J. Schellekens, P. Gijbers, M. van Dijk, O. van den Akker, and K. Heynert. 2013. "The Delft-FEWS Flow Forecasting System." *Environmental Modelling and Software* 40: 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.010>.

Wilks, D.S. 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd Edition, Academic Press, Oxford.