



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Evaluación del uso de predicciones meteorológicas
subestacionales como apoyo a la gestión del agua en la
cuenca del río Júcar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Romero Duque, Sergio Andres

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

Cotutor/a: Francés García, Félix Ramón

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

EVALUACIÓN DEL USO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS SUBESTACIONALES COMO APOYO A LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

Intensificación: *Análisis de Sistemas de Recurso Hídricos*

Autor:

SERGIO ANDRÉS ROMERO DUQUE

Tutor:

DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ

Cotutor/es:

DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES

DR. FÉLIX FRANCÉS GARCIA

FEBRERO, 2023



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Evaluación del uso de predicciones meteorológicas subestacionales como apoyo a la gestión del agua en la cuenca del río Júcar.

Título del TFM en inglés: Evaluation of the use of subseasonal weather forecasts to support water management in the Júcar river basin.

Título del TFM en Valenciano: Avaluació de l'ús de prediccions meteorològiques subestacionals com a suport a la gestió de l'aigua a la conca del riu Xúquer.

Alumno: Sergio Andrés Romero Duque.

Tutor: DR. Manuel Pulido Velázquez

Cotutor/es: DR. Héctor Macián Sorribes

Cotutor/es: DR. Félix Francés Garcia

Fecha de Lectura: febrero de 2023

Resumen

La utilización de predicciones meteorológicas es una de las herramientas que mayor importancia está tomando actualmente para hacer frente a los impactos que generan eventos extremos como sequías, olas de calor o crecidas, en la gestión del agua.

Históricamente y de manera general se han diferenciado dos tipos de predicciones en función del tiempo de anticipación: las predicciones a corto plazo (inferiores a dos semanas) y las predicciones estacionales (mayores a 60 u 80 días). Sin embargo, entre estos dos periodos se ha venido estudiando desde hace algunos años los pronósticos de carácter subestacional, los cuales tienen un periodo demasiado largo como para conservar la influencia de fenómenos sinópticos (condiciones iniciales

de la atmósfera), y a su vez demasiado corto como para que los cambios en las condiciones de contorno de la atmósfera y su relación con la temperatura del mar sean los conductores.

Dentro de este contexto se desarrolla la presente investigación, enfocada en el estudio de la viabilidad de incorporar predicciones meteorológicas subestacionales en la gestión de la cuenca del río Júcar. En primer lugar, se lleva a cabo la corrección del sesgo y evaluación de calidad de las predicciones obtenidas del modelo ECMWF del proyecto de investigación Subseasonal to Seasonal Prediction Project (S2S) para las variables de temperatura máxima, mínima y media, junto con la precipitación, para el periodo comprendido entre 2016–2021, utilizando como referencia los valores de reanálisis de ERA5–Land.

La corrección de sesgo se realiza por medio de la técnica de mapeo de cuantiles agregando las predicciones por mes de lanzamiento en primer lugar, y por mes de lanzamiento y periodo de anticipación de los pronósticos, utilizando métricas estadísticas como el CRPSS para evaluar su calidad.

Posteriormente se realiza el acople con el modelo hidrológico TETIS para la zona de estudio de la cuenca del río Júcar, con el fin de obtener predicciones hidrológicas para diferentes puntos de interés, evaluando a su vez la calidad las predicciones y su utilidad en la gestión del agua.

Palabras clave: predicciones meteorológicas, predicciones subestacionales, cuenca del Júcar, gestión del agua

Resum

La utilització de prediccions meteorològiques és una de les eines que més importància està prenent actualment per fer front als impactes que generen esdeveniments extrems com ara sequeres, onades de calor o crescudes, en la gestió de l'aigua.

Històricament i de manera general s'han diferenciat dos tipus de prediccions segons el temps d'anticipació: les prediccions a curt termini (inferiors a dues setmanes) i les prediccions estacionals (majors a 60 o 80

dies). No obstant això, entre aquests dos períodes s'han estudiat des de fa alguns anys els pronòstics de caràcter subestacional, els quals tenen un període massa llarg per conservar la influència de fenòmens sinòptics (condicions inicials de l'atmosfera), i alhora massa curt perquè els canvis en les condicions de contorn de l'atmosfera i la seva relació amb la temperatura del mar siguin els conductors.

Dins aquest context es desenvolupa aquesta investigació, enfocada a l'estudi de la viabilitat d'incorporar prediccions meteorològiques subestacionals en la gestió de la conca del riu Xúquer. En primer lloc, es duu a terme la correcció del biaix i avaluació de qualitat de les prediccions obtingudes del model ECMWF del projecte de recerca Subseasonal to Seasonal Prediction Project S2S per a les variables de temperatura màxima, mínima i mitjana, juntament amb la precipitació, per al període comprès entre 2016–2021, utilitzant com a referència els valors de reanàlisi d'ERA5–Land.

La correcció de biaix es realitza per mitjà de la tècnica de mapeig de quantils afegint les prediccions per–mes de llançament en primer lloc, i per–mes de llançament i període d'anticipació dels pronòstics, utilitzant mètriques estadístiques com el CRPSS per avaluar–ne el qualitat.

Posteriorment es realitza l'acoblament amb el model hidrològic TETIS per a la zona d'estudi de la conca del riu Xúquer, per tal d'obtenir prediccions hidrològiques per a diferents punts d'interès, avaluant alhora la qualitat les prediccions i la seva utilitat a la gestió de l'aigua.

Paraules clau: prediccions meteorològiques, prediccions subestacionals, conca del Xúquer, gestió de l'aigua

Summary

The use of meteorological predictions is one of the tools currently taking on the most significant importance to face the impacts of extreme events, such as droughts, heat waves, or floods, in water management.

Historically and generally, two types of predictions have been differentiated based on the time of prediction: short-term predictions (less than



two weeks) and seasonal predictions (greater than 60 or 80 days). However, between these two periods, sub-seasonal forecasts have been studied for some years, which have a period that is too long to preserve the influence of synoptic phenomena (initial conditions of the atmosphere), and in turn, too long for changes in the boundary conditions of the atmosphere and its relation to sea temperature to be the drivers.

Within this context, the present investigation is developed, focused on the study of the feasibility of incorporating sub-seasonal meteorological predictions in the management of the Júcar river basin. First, the bias correction and quality evaluation of the predictions obtained from the ECMWF model of the Subseasonal to Seasonal Prediction Project S2S research project is carried out for the variables of maximum, minimum, and average temperature, together with precipitation, for the period between 2016–2021, using the ERA5–Land reanalysis values as a reference.

The bias correction is performed through the quantile mapping technique by aggregating the forecasts by month of release in the first place and by month of release and period of anticipation of the forecasts, using statistical metrics such as the CRPSS to assess their quality.

Subsequently, the coupling is carried out with the TETIS hydrological model for the study area of the Júcar river basin to obtain hydrological predictions for different points of interest, evaluating, in turn, the quality of the predictions and their usefulness in Water management.

Key Words: weather forecasts, subseasonal forecasts, Júcar basin, water management



Contenido

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	13
1 MARCO DE REFERENCIA	16
1.1 VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	16
1.2 PREDICCIÓN METEOROLÓGICA	19
1.3 USO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS EN LA GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	21
1.4 GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA	23
1.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	24
2 CASO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN	28
2.1 CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR	28
2.1.1 Demarcación Hidrográfica del Júcar	28
2.1.2 Sistema de explotación Júcar	31
2.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA	33
2.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA HISTÓRICA	33
2.4 PREDICCIONES METEOROLÓGICAS	34
2.5 MODELO HIDROLÓGICO TETIS	34
2.6 POST PROCESAMIENTO PREDICCIONES METEOROLÓGICAS	38
2.6.1 Quantile Mapping (QM)	40
2.7 ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS PREDICCIONES	41
2.7.1 Calidad (Skill)	41
3 METODOLOGÍA	43
3.1 OBTENCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	45
3.2 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO TETIS A LA CUENCA DEL JÚCAR	46
3.2.1 Modelo Digital de Elevación y derivados	46
3.2.2 Parámetros hidrológicos	47
3.2.3 Áreas umbrales: Onda Cinemática Geomorfológica	51
3.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN MODELO TETIS	52
3.4 POSTPROCESAMIENTO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR	53
3.5 ANÁLISIS DE CALIDAD DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR	54
3.6 OBTENCIÓN DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS	55
3.7 ANÁLISIS DE CALIDAD DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS	56
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57



4.1	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	57
4.2	ANÁLISIS DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR	61
4.2.1	Precipitación	61
4.2.2	Temperatura Media	73
4.2.3	Temperatura Mínima	85
4.2.4	Temperatura Máxima	95
4.3	ANÁLISIS DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS	105
4.3.1	Alarcón	105
4.3.2	Bellús	107
4.3.3	Contreras	109
4.3.4	Forata	110
4.3.5	Tous	112
5	CONCLUSIONES	114
5.1	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	115
	BIBLIOGRAFÍA	117
	ANEXOS	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Escalas temporal y horizontal de variabilidad climática, y fenómenos conductores. Fuente: (Gascón, 2021).	17
Figura 1-2 Escala temporal de la modelación hidrológica para determinados fines. Fuente: Tomado de (IDEAM, 2018).	26
Figura 1-3 Modelos de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C). Fuente: Tomado de (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016).	26
Figura 2-1 Área de estudio.	29
Figura 2-2 Sistemas de explotación parciales considerados en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Fuente: Tomado de (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a)	30
Figura 2-3 Embalses del sistema de explotación del Júcar. Fuente: Tomado de (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a).	32
Figura 2-4 Esquema conceptual de tanques del modelo TETIS. Fuente: Tomado de (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).	35
Figura 2-5 Esquema de propagación del flujo propuesto en TETIS. Fuente: Tomado de (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).	36
Figura 2-6 Funcionamiento de un postprocesador estadístico para pronósticos conjuntos. Fuente: Tomado de (Li et al., 2017).	39
Figura 2-7 Proceso de ajuste por quantile mapping. Fuente:(Gupta et al., 2019)	41
Figura 3-1 Esquema general de desarrollo.	44
Figura 3-2 Mapas de MDE y derivados correspondientes a la cuenca de estudio.	46
Figura 3-3. Mapas de parámetros hidrológicos utilizados en la cuenca de estudio.	50
Figura 4-1 Hidrograma obtenido para el periodo 2014-2015 en la estación de Pajaroncillo.	58

Figura 4-2 Hidrograma obtenido para el periodo 2016-2021 en la estación de Pajaroncillo.	59
Figura 4-3 Hidrograma obtenido para el periodo 2014-2015 en la estación de El Castellar.	60
Figura 4-4 Hidrograma obtenido para el periodo 2016-2021 en la estación de El Castellar.	60
Figura 4-5 Predicciones de precipitación brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.	62
Figura 4-6 Diagrama de violín de predicciones precipitación brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	63
Figura 4-7 Porcentaje de predicciones de precipitación brutas con calidad.	64
Figura 4-8 Predicciones de precipitación corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.	65
Figura 4-9 Diagrama de violín de predicciones de precipitación corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	66
Figura 4-10 Porcentaje de predicciones de precipitación corregidas por mes con calidad.	68
Figura 4-11 Predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.	70
Figura 4-12 Diagrama de violín de predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	70
Figura 4-13 Porcentaje de predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.	72
Figura 4-14 Predicciones de temperatura media brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.	74
Figura 4-15 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	75
Figura 4-16 Porcentaje de predicciones de temperatura media brutas con calidad.	76

Figura 4-17 Predicciones de temperatura media corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.	77
Figura 4-18 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	78
Figura 4-19 Porcentaje de predicciones de temperatura media corregidas por mes con calidad.	80
Figura 4-20 Predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.	82
Figura 4-21 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	83
Figura 4-22 Porcentaje de predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.	84
Figura 4-23 Predicciones de temperatura mínima brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.	86
Figura 4-24 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	86
Figura 4-25 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes con calidad.	88
Figura 4-26 Predicciones de temperatura mínima corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.	89
Figura 4-27 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	90
Figura 4-28 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes con calidad.	91
Figura 4-29 Predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.	92

Figura 4–30 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	93
Figura 4–31 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.	94
Figura 4–32 Predicciones de temperatura máxima brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.	96
Figura 4–33 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	96
Figura 4–34 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima brutas con calidad.	98
Figura 4–35 Predicciones de temperatura máxima corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.	99
Figura 4–36 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	100
Figura 4–37 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes con calidad.	101
Figura 4–38 Predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.	102
Figura 4–39 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.	103
Figura 4–40 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.	104
Figura 4–41 Predicciones de entradas a Alarcón para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.	106
Figura 4–42 Porcentaje de predicciones de entradas a Alarcón con calidad.	107

Figura 4-43 Predicciones de entradas a Bellús para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.	108
Figura 4-44 Porcentaje de predicciones de entradas a Bellús con calidad.	108
Figura 4-45 Predicciones de entradas a Contreras para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.	109
Figura 4-46 Porcentaje de predicciones de entradas a Contreras con calidad.	110
Figura 4-47 Predicciones de entradas a Forata para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.	111
Figura 4-48 Porcentaje de predicciones de entradas a Forata con calidad.	111
Figura 4-49 Predicciones de entradas a Tous para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.	112
Figura 4-50 Porcentaje de predicciones de entradas a Tous con calidad.	113



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de los principales embalses del sistema de explotación Júcar. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a).	31
Tabla 2-2 Parámetros calibrables en el modelo hidrológico TETIS.	37
Tabla 3-1 Capacidad de percolación del sustrato según el tipo de roca y su permeabilidad cualitativa.	47
Tabla 3-2. Almacenamiento en charcos según el uso del suelo.	49
Tabla 3-3. Profundidad de raíces según el uso del suelo.	50
Tabla 3-4 Coeficientes y exponentes utilizados para la OCG	51
Tabla 4-1 Valores de los factores correctores calibrados	57
Tabla 4-2 Índices de bondad de ajuste obtenidos para la calibración.	58
Tabla 4-3 Valores de los índices de bondad obtenidos durante la validación espacio - temporal.	59

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La variabilidad e intensidad de los eventos meteorológicos, en particular los eventos extremos, generan diversos impactos en el desarrollo de las actividades socioeconómicas humanas. En el ámbito de los recursos hídricos son de especial interés dichas afecciones debido a eventos como sequías, precipitaciones torrenciales, olas de calor o temperaturas extremas, que modifican el ciclo hidrológico normal, además de incrementar las presiones a las que se someten los sistemas de explotación.

En España, debido a la característica irregularidad y variabilidad del régimen hidrológico, en donde las sequías y las inundaciones son eventos comunes, la construcción de infraestructuras hidráulicas ha resultado necesaria para garantizar la disponibilidad de agua y reducir los daños asociados. Ahora bien, el incremento de los fenómenos extremos en intensidad y frecuencia genera presiones y riesgos adicionales sobre dichas infraestructuras, acarreado nuevos problemas que se deben resolver por medio de la planificación hidrológica y una gestión eficiente de los sistemas de recursos hídricos.

En España los fenómenos asociados a la temperatura tienen una gran relevancia (olas de calor más fuertes y extensas, aumento de la temperatura del mar y temperaturas diarias más altas) debido a su elevada recurrencia; sin embargo, en el área mediterránea del país, además de estos fenómenos, se están produciendo aumentos generalizados en la frecuencia de lluvias torrenciales con mayores intensidades y duraciones (Núñez Mora, 2021).

En sintonía con lo anterior, si bien en la actualidad existen diversas herramientas para contrarrestar los efectos de la variabilidad y los fenómenos extremos como pueden ser la construcción de infraestructuras hidráulicas, la restitución de cauces naturales o el uso de predicciones que sirvan de soporte a la toma de decisiones en la gestión de los sistemas de explotación; en el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se evalúa la posibilidad de hacer uso de predicciones meteorológicas del tipo subestacional como una herramienta de ayuda para la gestión del agua.

El estudio se ha aplicado a la cuenca del río Júcar a través de la obtención y análisis de predicciones del modelo generado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) dentro del proyecto de in-

investigación S2S ejecutado por parte del World Weather Research program (WWRP) y el World Climate Research program (WCRP). A partir de ello, se ha definido como periodo de estudio el comprendido entre 2016–2021 tanto para la corrección del sesgo como para la evaluación de la calidad de las predicciones brutas del modelo ECMWF y de las corregidas posteriormente; obteniendo predicciones hidrológicas para dicho periodo por medio de un modelo desarrollado previamente en TETIS para la cuenca del río Júcar por Lía Ramos (Ramos Fernández, 2013) durante el desarrollo de su Tesis Doctoral .

Ahora bien, para alcanzar el objetivo propuesto, se ha desarrollado el estudio a través de cinco capítulos; en los siguientes párrafos se brinda una breve descripción de la información que se encuentra consignada en cada uno.

En el capítulo 1 se presenta el marco de referencia de la investigación, enfocado en los conceptos de variabilidad climática a diferentes escalas y sus efectos en los recursos hídricos, a su vez, se detallan las maneras de enfrentarse a esta desde la gestión del agua, incluyendo el uso conjunto de predicciones meteorológicas y herramientas de modelación hidrológica.

En el capítulo 2 se define el área y periodo de estudio, específicamente el sistema de explotación Júcar para el cual se obtiene predicciones de aportación a régimen natural (son cinco embalses de interés), así como una descripción de la información meteorológica tanto histórica como de predicciones utilizada en la investigación; además se presenta el método a través del cual se corrige el sesgo y se evalúa posteriormente su calidad.

En el capítulo 3 se expone la metodología desarrollada para el presente Trabajo de Fin de Máster, incluyendo una descripción del método implementado para obtener la evapotranspiración potencial; consecuentemente, se expone el modelo hidrológico en TETIS utilizado y la manera como se obtienen y evalúan las predicciones tanto meteorológicas como de caudal.

En el capítulo 4 se encuentran los resultados de calidad de las predicciones para todas las variables meteorológicas evaluadas en toda la Demarcación Hidrográfica, y los resultados de la calidad de las predicciones de aportaciones a régimen natural para los cinco embalses de interés del sistema de explotación del Júcar.

En el capítulo 5 se estructuran finalmente las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la investigación, haciendo un análisis más específico de la



importancia que las predicciones de caudal pueden tener para cada embalse, así como la exposición de posibles líneas de investigación futuras que permitan complementar y ampliar el alcance del presente proyecto.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

El clima se puede definir como el estado promedio del conjunto de condiciones atmosféricas o variables físicas (como son la temperatura, la precipitación, la humedad y el viento entre otros) que caracterizan una región o zona durante un período de tiempo determinado (meses, años, décadas...), de manera clásica y de acuerdo con lo definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) este periodo se define como 30 años (Organización Meteorológica Mundial, s. f.).

Por otro lado, la variabilidad climática se refiere a las variaciones en el estado medio y estadísticos (máximos, desviaciones estándar) que se presentan en periodos más cortos de tiempo respecto al clima, respondiendo a las fluctuaciones que presenta el clima en diferentes escalas temporales y espaciales. Esta variabilidad se puede evidenciar como oscilaciones de las variables atmosféricas respecto a un valor normal definido por el clima, las cuales se miden como anomalías respecto a dicho valor medio (Ruiz-Ochoa et al., 2022).

La variabilidad se puede deber a diferentes procesos tanto de carácter interno de los sistemas climáticos, o debido a cambios externos producidos por factores antropogénicos. Estas anomalías se presentan en cuatro escalas temporales principales:

- Escala Subestacional: La escala subestacional se refiere a las perturbaciones que se presentan dentro de las estaciones y pueden determinar las condiciones de la atmósfera durante varios días, semanas o incluso llegando a un par de meses, destacando una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30–60 días. Dentro de esta escala se encuentran fenómenos como la Oscilación de Madden-Julian, el cual se caracteriza por ser una oscilación de los patrones de precipitación en la zona ecuatorial que tiene un periodo de 60–90 días, afectando la predictabilidad en su fase activa
- Escala Estacional: La escala estacional corresponde a la fluctuación del clima en tiempos correspondiente a meses e incluso un año, este ciclo

anual de las variables climáticas es una representativa en latitudes medias en donde se presenta la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño. En el caso de las latitudes tropicales y ecuatoriales, es más común la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas.

- Escala Interanual: Las variaciones que se presentan en la climatología de año a año corresponden a la escala interanual, suelen estar marcadas por fenómenos que afectan las condiciones de contorno de los sistemas climáticos, como pueden ser la Oscilación del Atlántico Norte –NAO– o las producidas por el Fenómeno del Niño/Niña –ENSO–, las cuales definen el clima de las regiones afectadas por meses e incluso un par de años.
- Escala Interdecadal: En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas, como son la variabilidad decadal o actualmente el cambio climático. (IDEAM, s. f.–a)

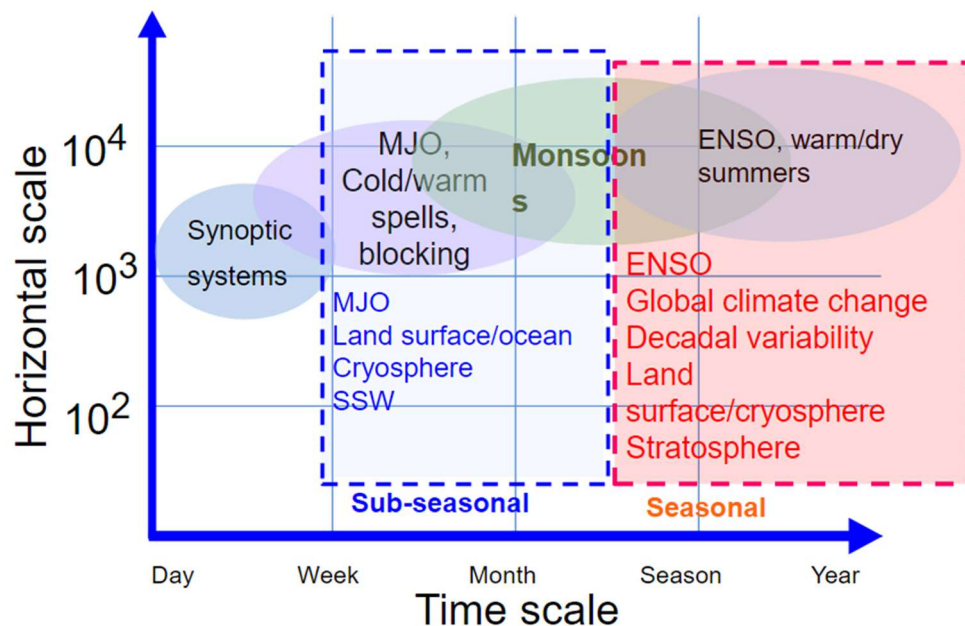


Figura 1-1 Escalas temporal y horizontal de variabilidad climática, y fenómenos conductores. Fuente: (Gascón, 2021).

Estas fluctuaciones pueden generar afecciones en la gestión del recurso hídrico, ya sea a la hora de su disponibilidad para suministro o generación hidroeléctrica en el caso de las sequías o por efectos de olas de calor, por temas de riesgo en el caso de precipitaciones extremas e inundaciones, o in-

cluso en afecciones a la demanda de agua de diferentes sectores agrícolas o urbanos entre otros.

Desde hace varios años se ha identificado y hablado sobre el efecto de la variabilidad del clima en el área de la gestión del agua y la necesidad del ser humano de adaptarse y utilizar estrategias de adaptación frente a ella. En el año 2003 se publicó el informe “Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper” por parte del DWC, en donde se recogen los resultados y recomendaciones del Seminario del Diálogo Internacional sobre el Agua y el Clima (International Dialogue on Water and Climate) celebrado en Países Bajos en noviembre de 2001, centrándose en dos temas principales: 1) Implicaciones de la variabilidad climática y el cambio climático en los recursos hídricos, y 2) Estrategias de actuación en la gestión del agua para adaptarse y mitigar la variabilidad climática y el cambio climático.

Las afecciones de la variabilidad climática sobre los recursos hídricos se ven reflejadas especialmente en la variación del ciclo hidrológico, lo que conlleva a un incremento tanto en la ocurrencia como la intensidad de eventos extremos, entre ellos los más comunes son las sequías, inundaciones, huracanes y tifones, los cuales generan a su vez problemas y presiones sobre la manera en la que se realiza la gestión del agua, especialmente en los llamados “hotspots” climáticos (áreas donde se presentan fuertes efectos de la variabilidad climática y el cambio climático junto con comunidades y población vulnerables) (Kabat et al., 2003).

La planificación hidrológica se entiende como el instrumento fundamental que tiene como objetivos generales “conseguir el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas, la satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medioambiente y los demás recursos naturales”, como lo define la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (Instrucción de Planificación Hidrológica, 2008), enfocada en la planeación estratégica a largo plazo por medio de acciones estructurales sobre usos, presiones y demandas existentes sobre los sistemas de explotación hídrica. Por el contrario, la gestión del agua se encarga de una planificación de tipo operativo y de explotación a una escala

temporal de corto y medio plazo, definiendo medidas de operación sobre los sistemas de recursos hídricos y sus efectos ambientales, de actuación en caso de emergencias como sequías e inundaciones por medio de los Planes Especiales de Sequía (PES) o los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), y de seguimiento y adaptación a cambios meteorológicos tomando como base la observación del estado actual meteorológico o hidrológico por medio del uso de índices de estado o de Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). Actualmente en España son pocas las normativas de explotación de presas y embalses que cuentan con el uso de predicciones para la gestión del agua y del riesgo.

Teniendo en mente reducir la afección de la variabilidad climática en la gestión de recursos hídricos, una herramienta útil es el poder conocer el estado futuro del tiempo y el clima, con el fin planificar acciones a tomar y definir su periodo de actuación, por lo que los pronósticos tienen como meta proveer información a los encargados de la gestión de los sistemas de recursos hídricos para poder planificar y preparar de manera activa medidas para enfrentarse a eventos meteorológicos, una herramienta que se está incorporando cada vez más como medida de apoyo en la planificación y gestión del recurso hídrico (*Pronósticos Climáticos / CIIFEN, s. f.*).

1.2 PREDICCIÓN METEOROLÓGICA

Las predicciones meteorológicas consisten en predecir el estado futuro de la atmosfera en una ubicación determinada, basándose en información sobre las variables atmosféricas de interés como son temperatura, precipitación o velocidad del viento, procesando esta información para determinar patrones atmosféricos futuros.

La predicción meteorológica es una actividad que se desarrolla desde hace miles de años a partir de la observación de patrones de los vientos o de las nubes, pronosticando de una manera muy primitiva. Es hasta el siglo XIX que surge la predicción basándose en el método científico, en una época en donde ya se desempeñaban tareas de medición de variables meteorológicas, gracias al trabajo de Urbain LeVerrier quien, durante la guerra de Crimea de 1853, a partir de un encargo de Napoleón III, investigó una fuerte tormenta que destruyó una flota anglo-francesa el 14 de noviembre de 1854, dedu-

ciendo a partir de información de diversos observatorios europeos que un sistema depresionario se fue desplazando por distintos países europeos antes de alcanzar la Península de Crimea, por lo que de haber podido conocer dicha información en tiempo real los daños se hubiesen minimizado. Con el uso de la telegrafía se compartieron datos de observatorios meteorológicos durante los siglos XIX y XX, por lo cual se pudieron desarrollar las primeras predicciones por parte de los meteorólogos (Rubio Viñas, 2013).

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos y matemáticos se desarrolló la predicción numérica del tiempo, con el trabajo práctico Lewis Fry Richardson (basado en el trabajo teórico de Vilhelm Bjerknes), desarrollando pronósticos a 6 horas para el día 20 de mayo de 1910 de manera insatisfactoria en gran parte por el gran número de cálculos que se debían realizar. Sin embargo no fue hasta la aparición de los computadores que se logró ejecutar el primer modelo numérico de predicción, antecesor de los modelos actuales, por parte de Jule G. Charney, Von Neumann y Ragnar Fjörtoft con un modelo barotrópico de la atmósfera (Rubio Viñas, 2013).

Gracias a los avances tecnológicos en la computación se han podido desarrollar modelos matemáticos de predicción con los cuales se pueden representar procesos atmosféricos por medio de ecuaciones matemáticas, aplicados a nodos de una malla imaginaria sobre la atmósfera, a varios niveles logrando una representación tridimensional sobre la cual evaluar el comportamiento de las variables de interés (Rubio Viñas, 2013).

La predicción de manera general se ha centrado en las escalas de corto y largo plazo, pero desde hace unos años con el incremento en intensidad y ocurrencia de climáticos eventos extremos, como inundaciones u olas de calor, el estudio de la escala subestacional (S2S) ha tomado mayor relevancia, enfocándose en cerrar la brecha en las escalas de estudio. En este contexto se ha desarrollado desde 2013 el proyecto de investigación S2S en conjunto por parte de World Weather Research program (WWRP) y el World Climate Research program (WCRP), cuyo objetivo es mejorar la habilidad de predicción y la comprensión de las fuentes de previsibilidad (Vitart & Robertson, 2018), dentro del proyecto se han elaborado 12 modelos por parte de diferentes centros de meteorología en el mundo, uno de los cuales es desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF).

El modelo desarrollado por el ECMWF consiste en un conjunto (ensemble) basado en 51 miembros, el cual simula incertidumbres iniciales usando vectores singulares y un conjunto de datos e incertidumbres del modelo por medio de un esquema estocástico. Este modelo se ejecuta dos días por semana con un periodo de anticipación de 46 días (Mladek, 2021). Este modelo cuenta con una resolución espacial de 0.25 grados para los primeros 15 días y de 0.5 para el resto de los días.

1.3 USO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS EN LA GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Con el aumento de la comprensión de fenómenos que tienen relación con la variabilidad del clima, se han venido incorporando predicciones meteorológicas e hidrológicas en la gestión y planificación en sistemas de recursos hídricos, principalmente a la escala estacional, debido a que como se presenta en la *Figura 1-1* para la escala estacional fenómenos como el ENSO o la NAO son los conductores mayores de los fenómenos.

Un ejemplo de la utilización de predicciones se presenta con el proyecto Europeo IMPREX desarrollado entre los años 2015 y 2019, el cual tenía como fin dar una herramienta a la sociedad que permitiera anticiparse y responder de una mejor manera a eventos hidrológicos extremos que afectan a sectores económicos relacionados con el agua como son la predicción de inundaciones, la evaluación del riesgo de sequías, el sector agrícola, el sector de la navegación fluvial, de generación hidroeléctrica e incluso en el suministro de agua (Lavers et al., 2020).

De casos prácticos es posible encontrar diversos ejemplos en la literatura, desde comienzos del siglo XXI ya se comenzaba con estudios de la posible utilización de predicciones en gestión de recurso hídrico, (Hamlet & Lettenmaier, 2000) en el año 2000 presentaban la incorporación de predicciones sobre el ENSO en la estimación de pronósticos hidrológicos para la región del Noreste Pacífico de Norteamérica, logrando obtener calidad en las predicciones de hasta 12 meses de anticipación. En casos más actuales (Ficchi et al., 2016) presentaron el desarrollo de un sistema de predicción tanto determinístico como probabilístico para optimizar la operación de un sistema de 4 embalses en la cuenca del río Sena en Francia, gestionados por medio de

curvas de operación, encontrando que la utilización de los sistemas con ayuda de las predicciones climáticas permitía una mejor operación respecto al uso simple de las curvas, (Rubio–Martin et al., 2021) presentaron que el uso de cinco modelos de predicciones estacionales del ECMWF, posterior a post–procesamiento, permitía definir con un considerable grado de acierto (skill), el tipo de año (húmedo, seco o normal) que se presentaría en el acuífero de Requena–Utiel para el periodo de estudio de 1995–2015, con por lo menos un mes de anticipación al comienzo de la temporada de riego definiendo de esta manera los límites de bombeo requeridos para dicho tipo de año, mostrando que para ciertos tipos de año es posible obtener con mayor anticipación que tipo de año esperar. En el año 2020 (Peñuela et al., 2020) estudiaron por medio de simulación el valor agregado que tiene el uso de predicciones estacionales del SEAS5 durante un periodo histórico de 10 años en la operación de un embalse en el Reino Unido, respecto a la estrategia de operación común, encontrando que para un escenario de priorización de disponibilidad de recursos sobre reducción de costos de energía se presenta un claro beneficio del uso de los pronósticos, claramente relacionada con su calidad.

En el caso de España, desde el año 2015 se ha desarrollado el Servicio Climático en apoyo a la gestión de los embalses gracias a una colaboración entre la Dirección General de Aguas (DGA) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), como una herramienta de información para el periodo de llenado de embalses, por medio de la cual es posible obtener tanto diagnósticos basados en información hidrológica y meteorológica histórica que relaciona el riesgo hidrológico con el valor del Índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), como pronósticos estacionales probabilísticos de variables hidrológicas y meteorológicas basados en el postprocesamiento de predicciones brutas del SEAS5 del ECMWF (Sánchez–García et al., 2022).

Como es posible observar, el uso de predicciones estacionales toma cada vez más importancia gracias a la mayor variabilidad climática que se está presentando debido a cambios globales del clima, sin embargo, desde hace algunos años se ha estudiado el intervalo subestacional en donde el interés global es lograr una mejor comprensión de los fenómenos meteorológicos y climáticos, y poder lograr la continuidad temporal al estudio de pronósticos de tiempo y clima, tratando de utilizar un único sistema de modelización con el

cual hacer predicciones que vayan desde las escalas meteorológicas hasta las estacionales o hasta escalas climáticas más extensas (Brunet et al., 2010; Vitart & Brown, 2019). El Programa Mundial de Investigaciones Meteorológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WWRP) junto con el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WRCP), presentaron el Proyecto de Predicción Subestacional a Estacional (S2S) en noviembre de 2013, el cual ha incrementado la capacidad de predicción gracias al auge de conocimiento de fenómenos como la Oscilación de Madden-Julian (MJO), o de calentamientos estratosféricos repentinos (Huang et al., 2022; Vitart & Brown, 2019).

La aplicación y utilidad de pronósticos S2S ha incrementado con su estudio, se han desarrollado aplicaciones para el sector agrícola (White et al., 2017, 2022), en la gestión de recursos hídricos (Merryfield et al., 2020; White et al., 2017, 2022), en el estudio de sequías (Pendergrass et al., 2020), predicción de inundaciones (White et al., 2015), e incluso en la operación de plantas de producción hidroeléctrica (Graham et al., 2022).

1.4 GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA

Desde la instauración de la IPH en el año 2008, la planificación de los sistemas de recursos hídricos se realiza a la escala de cuenca por medio de los Planes Hidrológicos (PH) que se realizan para las diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Los Planes Hidrológicos definen el estado actual de las masas de agua continentales superficiales y subterráneas, de transición y costeras, así como los objetivos a largo plazo y el programa de medidas para alcanzarlo.

La planificación hidrológica en la Demarcación Hidrográfica del Júcar se encuentra a cargo de la Confederación Hidrográfica del Júcar, entre sus funciones se destacan la elaboración del plan hidrológico de cuenca, así como su seguimiento y revisión, la administración y control del Dominio Público Hidráulico, la administración y el control de los aprovechamientos de interés general o que afecten a más de una comunidad autónoma, el proyecto, construcción y explotación de las obras realizadas con cargo a los fondos propios de Organismo y las que les sean encomendadas por el Estado, las que se deriven de los convenios con comunidades autónomas, corporaciones locales y

otras entidades públicas o privadas, o de los suscritos con las personas particulares. (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022b).

Adicionalmente, es obligatorio que cada embalse de los sistemas de explotación posea un documento de Normas de Explotación, definido en la Reglamentación Técnica Española de Presas, tanto para las presas privadas como a las grandes presas de titularidad pública, el cual de incluir como mínimo un programa normal de embalses, desembalses y resguardos, de actuaciones específicas en caso de avenidas, un programa de auscultación, inspecciones periódicas, mantenimiento, de sistemas de preaviso en desembalses normales y por último de sistemas de alarma y estrategias a seguir en situaciones extraordinarias (Grupo INCLAM, 2020; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021). Dentro de la misma reglamentación se menciona que la figura del Director de Explotación es el encargado de mantener en condiciones de servicio los dispositivos de control, órganos de desagüe, accesos y comunicaciones, que permitan el desarrollo normal y seguro de las actividades de explotación de la presa, durante las fases de explotación, operación, inspección, vigilancia, conservación y seguridad de las presas (Grupo INCLAM, 2020).

El Director de Explotación de cada presa es el encargado de la seguridad de la infraestructura, así como de la gestión tanto de los aportes de entrada de agua a la presa, como de los de caudales de vertido aguas abajo y de suministro, los desembalses en caso de avenidas y crecidas, así como de mantenimiento. Finalmente es importante mencionar que herramientas como modelos de predicción meteorológica son cada vez más utilizadas como ayuda para a gestión de embalses, permitiendo anticiparse a eventos atípicos que puedan afectarlo (Grupo INCLAM, 2020).

1.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

El conocimiento del comportamiento de los fenómenos naturales que se desarrollan dentro de las cuencas y sus diferentes dinámicas es de vital importancia para el desarrollo de las actividades socioeconómicas humanas. Una de las herramientas que ha permitido incrementar el entendimiento de las variables hidrológicas de estado como soporte a la toma de decisiones en

los diversos campos de las actividades humanas es la modelación matemática en hidrología.

Por medio de la modelación hidrológica es posible conocer estimaciones de caudal, el comportamiento de variables, el análisis de los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático, la caracterización de eventos de crecidas o sequías, además de conocer el efecto que producen cambios de cobertura en la cuenca o el impacto que generan infraestructuras en ella, entre otros. Es por ello por lo que la modelación hidrológica y la estimación confiable de las variables hidrológicas se establece como una herramienta que mejora el conocimiento de los sistemas hídricos permitiendo dar soporte a la toma de decisiones en el área de la gestión integral del recurso hídrico (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021; IDEAM, s. f.-b).

Un modelo matemático es una representación abstracta de la realidad, por medio de la cual se desea representar fenómenos naturales complejos por medio de ecuaciones y parámetros matemáticos, con variables e inputs que permitan establecer relaciones y conocer el comportamiento de un modelo. En el área de la modelación hidrológica los modelos pueden ser clasificados por su escala temporal en modelos de evento, en el que la duración puede ser de varias horas a pocos días enfocados principalmente a crecidas o diseño hidrológico de estructuras, o modelos continuos en el que la modelación está pensada para modelar periodos mayores enfocados en la gestión del recurso hídrico (IDEAM, 2018), en la Figura 1-2 se presentan las escalas temporales de modelación en función del fin que se desea lograr.



Figura 1-2 Escala temporal de la modelación hidrológica para determinados fines. Fuente: Tomado de (IDEAM, 2018).

Adicionalmente, en función de la agregación espacial tanto de los parámetros y variables del modelo, y de su información de entrada los modelos hidrológicos se pueden dividir en: modelos agregados cuando la parametrización se realiza en valores únicos para el conjunto de la cuenca sin tener en cuenta la variación espacial; distribuido cuando la parametrización intenta representar de una mejor manera la variabilidad espacial; y semidistribuido cuando se da una representación intermedia de dicha variabilidad, asumiendo zonas de un comportamiento teóricamente similar (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016), en la Figura 1-3 se presenta la división espacial de estos modelos.

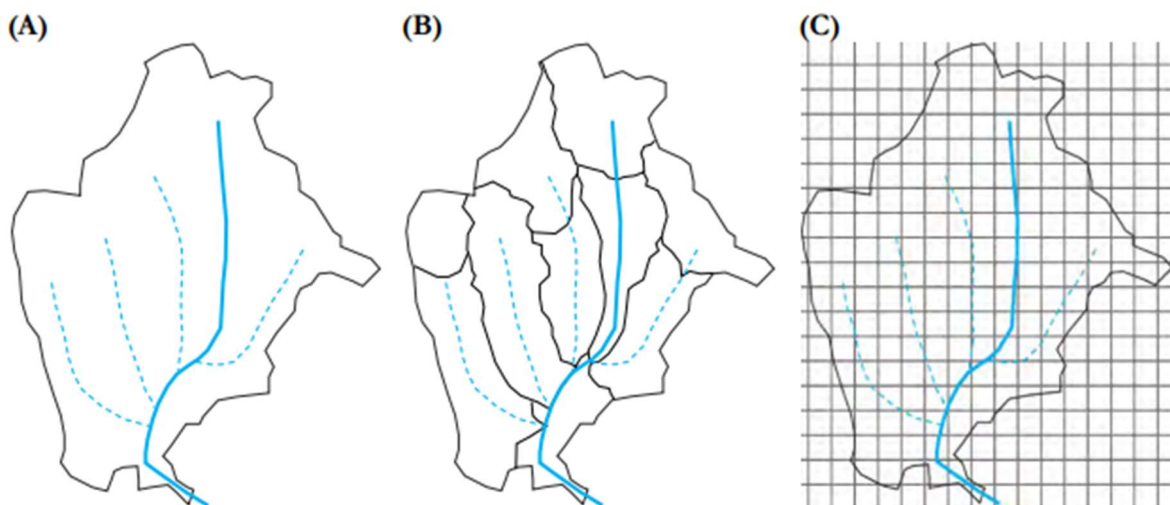


Figura 1-3 Modelos de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C). Fuente: Tomado de (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016).



En la actualidad existe una gran cantidad de modelos lluvia escorrentía desarrollados entre los que se encuentran TETIS, HYPE, TOPMODEL, DYNAMIC TOPMODEL, HBV, Temez, SAC-SMA, LISFLOOD, PCR-GLOBWB SWMM o SWAT.

2 CASO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN

El periodo de estudio se comprende entre 2016 y 2021, utilizando como variables climatológicas de interés la precipitación acumulada en 24 horas y las temperaturas media, mínima y máxima diaria.

Del proyecto S2S se ha seleccionado el modelo desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés), así mismo como referencia se han tomado los datos de la base de datos de ERA5-Land, enmarcado dentro del Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S) de la Comisión Europea, producido por el ECMWF.

2.1 CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR

2.1.1 Demarcación Hidrográfica del Júcar

El estudio se ha desarrollado para la cuenca del río Júcar, la cual hace parte de la delimitación de la Confederación Hidrográfica del Júcar, la cual está situada geográficamente en el extremo central este de la Península Ibérica, comprendiendo el territorio de las cuencas hidrográficas intracomunitarias entre la margen izquierda de la Gola del Segura en su desembocadura y la desembocadura del río Cenia, incluido su cuenca; y además la cuenca endorreica de Pozohondo y el endorreísmo natural formado por el sistema que constituyen los ríos Quejola, Jardín y Lezuza y la zona de Los Llanos, junto con las aguas de transición, lo que representa un área de 42 756 km². Administrativamente hablando, la cuenca del Júcar se reparte entre las Comunidades Autónomas de Aragón (12.57% del territorio y 1.08% de la población), Castilla-La Mancha (37.68% del territorio y 9.36% de la población), Cataluña (0.21% del territorio y 0.42% de la población), Comunitat Valenciana (49.40% del territorio y 88.49% de la población) y la Región de Murcia (0.15% del territorio y 0.65% de la población) (Confederación Hidrográfica Del Júcar, 2019).

De la Comunitat Valenciana, dentro de la Demarcación del Júcar se encuentra el 90% de su territorio y el 91.22% de su población (Confederación Hidrográfica Del Júcar, 2019), por lo cual la demanda de agua de Comunitat se suministra desde los sistemas de explotación del Júcar.

En la Figura 2-1 se presenta el área de estudio correspondiente a la confederación hidrográfica del Júcar y el área de la Comunitat Valenciana.

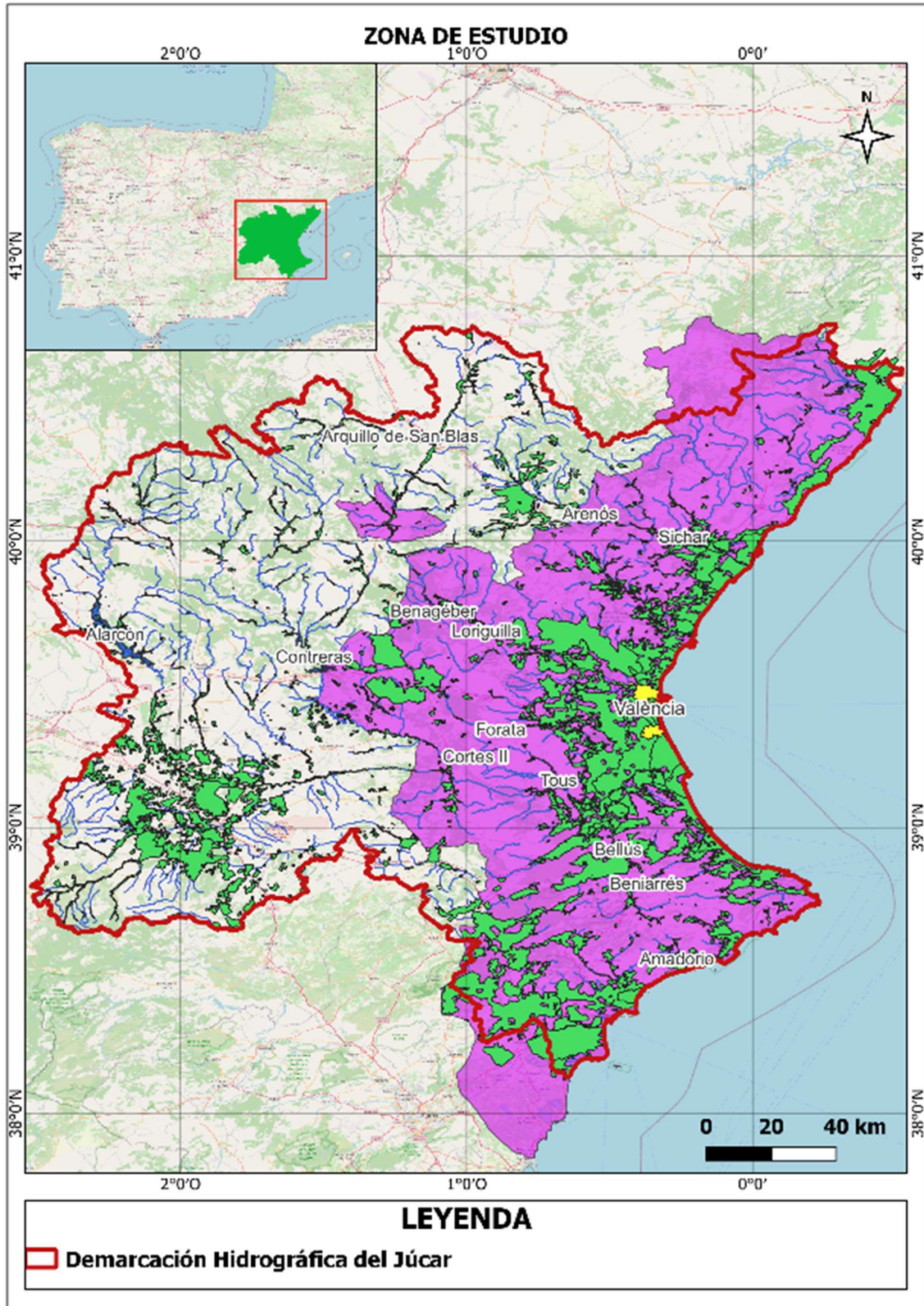


Figura 2-1 Área de estudio.

Dentro de la Demarcación hidrográfica se encuentran definidos nueve sistemas de explotación que en su conjunto definen el sistema de explotación único de toda la Demarcación (Figura 2-2):

- Sistema de explotación Cenia–Maestrazgo
- Sistema de explotación Mijares–Plana de Castellón
- Sistema de explotación Palancia–Los Valles
- Sistema de explotación Turia
- Sistema de explotación Júcar
- Sistema de explotación Serpis
- Sistema de explotación Marina Alta
- Sistema de explotación Marina Baja
- Sistema de explotación Vinalopó– Alcantí



Figura 2-2 Sistemas de explotación parciales considerados en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Fuente: Tomado de (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a)

2.1.2 Sistema de explotación Júcar

Uno de los sistemas de explotación de la confederación más importante es el sistema de explotación Júcar, el cual comprende la propia cuenca del río Júcar y todas las demandas atendidas por ella. Cuenta con un área de 22 261 km², sus principales afluentes son los ríos Cabriel, Magro, Sellent y Albaida (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a).

Dentro de este sistema de explotación se encuentran numerosos embalses de los cuales los principales son los de Alarcón, El Molinar, Contreras, Cortes, El Naranjero, La Muela, Tous, Forata y Bellús, gracias a que por su capacidad son embalses con una contribución importante en la regulación y gestión del sistema a escala mensual, sus funciones contemplan principalmente el riego, la producción hidroeléctrica y la protección frente avenidas (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a). Las características de estos embalses se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Características de los principales embalses del sistema de explotación Júcar. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a).

Embalse	Uso	Tipo de presa	Río	Capacidad (Hm ³)
Alarcón	Regulación de recursos hídricos y riego.	Gravedad planta recta	Júcar	1 117.8
El Molinar	Riego y producción de energía.	Tierras	Júcar	4.3
Contreras	Abastecimiento, hidroeléctrico y riego.	Gravedad planta recta.	Cabriel	360.8
Cortes	Riego y producción de energía.	Gravedad	Júcar	118
El Naranjero	Riego y producción de energía.	Gravedad	Júcar	29
La Muela	Riego y producción de energía.	Escollera	Júcar	20
Tous	Laminación de avenidas, abastecimiento y riego.	Gravedad	Júcar	378.6
Forata	Riego	Gravedad planta	Magro	37.3
Bellús	Defensa frente avenidas y riego.	Gravedad planta	Albaida	69.2

De igual manera, en la Figura 2-3 se presenta la ubicación de estos embalses dentro de la demarcación hidrográfica del Júcar.

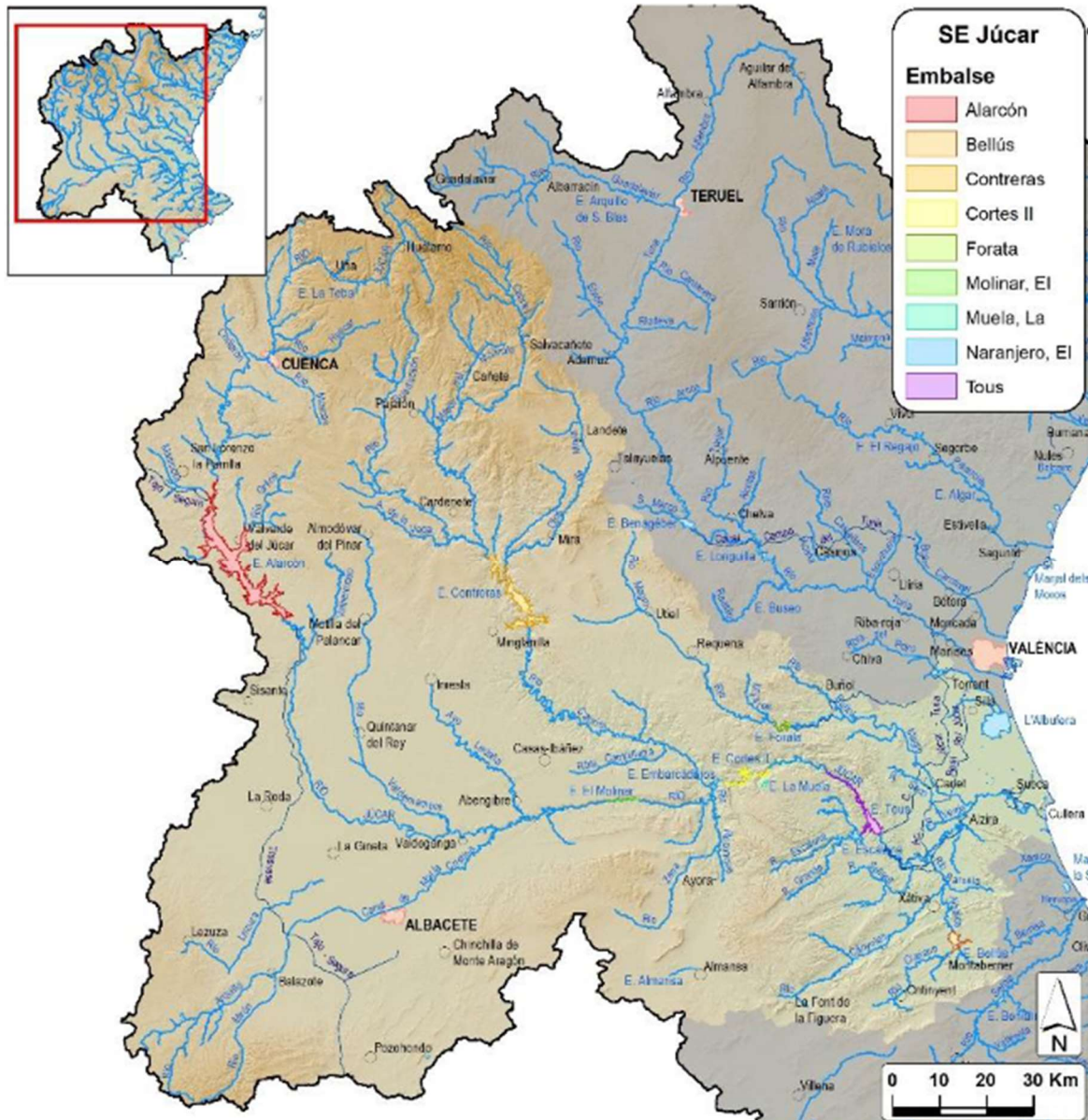


Figura 2-3 Embalses del sistema de explotación del Júcar. Fuente: Tomado de (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a).

En el presente estudio se estudiará la viabilidad de las predicciones de aportaciones a régimen natural a los embalses de Alarcón, Bellús, Contreras, Forata y Tous.

2.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA

Los datos meteorológicos utilizados para el desarrollo de la investigación han sido obtenidos de la base de datos de ERA5–Land, descargados de los servidores de Copernicus. ERA5–Land consiste en un reanálisis que otorga una vista de la evolución temporal de las variables terrestres, a partir de la reproducción del componente tierra (Land) del modelo climático de reanálisis ERA5 del ECMWF.

El modelo de reanálisis combina datos observados históricos con datos de modelos climáticos, permitiendo la obtención de un conjunto globalmente completo que representa de manera precisa el clima del pasado, logrando remontarse varias décadas (cuenta con datos completos desde el año 1950). Este modelo cuenta con una oferta de información sobre una amplia gama de variables, (temperatura, precipitación, radiación solar...), lo que permite un reflejo homogéneo y coherente del clima, permitiendo no tener que recurrir a diferentes fuentes de información. Adicionalmente ERA5–Land cuenta con una escala espacial definida por una malla, en línea con la parametrización que realiza el modelo hidrológico a utilizar y el modelo de predicción.

Para la presente investigación los datos históricos se extraen de la base de datos de ERA5–Land, estos datos cuentan con una resolución espacial de 9 km (alrededor de 0.08°) y una resolución temporal de 1 hora de acumulación.

2.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA HISTÓRICA

Para el caso de la información hidrológica, los caudales de aforo son de dos fuentes, en primer lugar, se obtuvieron caudales para de La Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A.) las estaciones que se encuentran aguas arriba de los embalses de Contreras, Alarcón, El Molinar, Forata, así como la desembocadura y la estación de Pajaroncillo, en donde se realiza la calibración del modelo. De acuerdo con la escala temporal del estudio, se recuperaron los valores de caudales medios diarios para las estaciones de interés.

Adicionalmente para validar el modelo se obtuvieron las entradas medias diarias de los embalses de Alarcón, Bellús, Contreras, El Molinar, Forata, Tous y Villora, del anuario de aforos del CEDEX. Cabe precisar que los valores presentes en el anuario se encuentran actualizados hasta el año hidrológico 2018/2019.

2.4 PREDICCIONES METEOROLÓGICAS

El modelo ECMWF del proyecto S2S se caracteriza por ser un modelo de predicción por conjuntos (ensemble), el cual produce un grupo de pronósticos que representan un rango de posibles estados futuros de la atmósfera, por medio de la introducción de variaciones aleatorias en las condiciones iniciales a la hora de la ejecución del modelo. Los pronósticos de enfoque por conjuntos permiten obtener información no solo del escenario más probable para cada evento, sino que permiten estudiar la incertidumbre asociada de manera cuantitativa.

El ensemble producido del modelo ECMWF es de 51 componentes, cuenta con una resolución espacial original de 1.5° y un periodo de anticipación de 0–46 días con 6 horas de periodo de acumulación, además se ejecuta dos veces por semana (*ECMWF Model – S2S – ECMWF Confluence Wiki*, s. f.).

En el presente estudio se utiliza la versión reescalada espacialmente por el ECMWF a 0.25° y un periodo de acumulación para las variables de 24 horas.

2.5 MODELO HIDROLÓGICO TETIS

En el presente estudio con el fin de obtener predicciones de caudal a partir de las predicciones meteorológicas, se utilizará el modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual TETIS, desarrollado por Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GHIMA) del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA).

TETIS es un modelo hidrológico el cual permite obtener la respuesta hidrológica de una cuenca a partir de la precipitación y la temperatura, por medio de la representación de diversos procesos físicos que se ven involucrados en la producción de escorrentía y su respectiva propagación (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

Para lograr representar la producción de escorrentía TETIS utiliza un esquema conceptual de varios tanques de almacenamiento interconectados entre sí, basándose en la realización de un balance hídrico en cada celda, el cual asume una distribución del agua en seis tanques, en donde el flujo entre ellos se da en función del agua almacenada en cada uno por lo cual su volumen almacenado se considera como su variable estado. El flujo se relaciona

con las variables estado es función del esquema conceptual de tanques, el tipo de tanque y de las características hidromorfológicas de las celdas y el suelo en ellas (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021). En la Figura 2-4 se presenta el esquema conceptual que utiliza TETIS para la producción de escorrentía en cada celda.

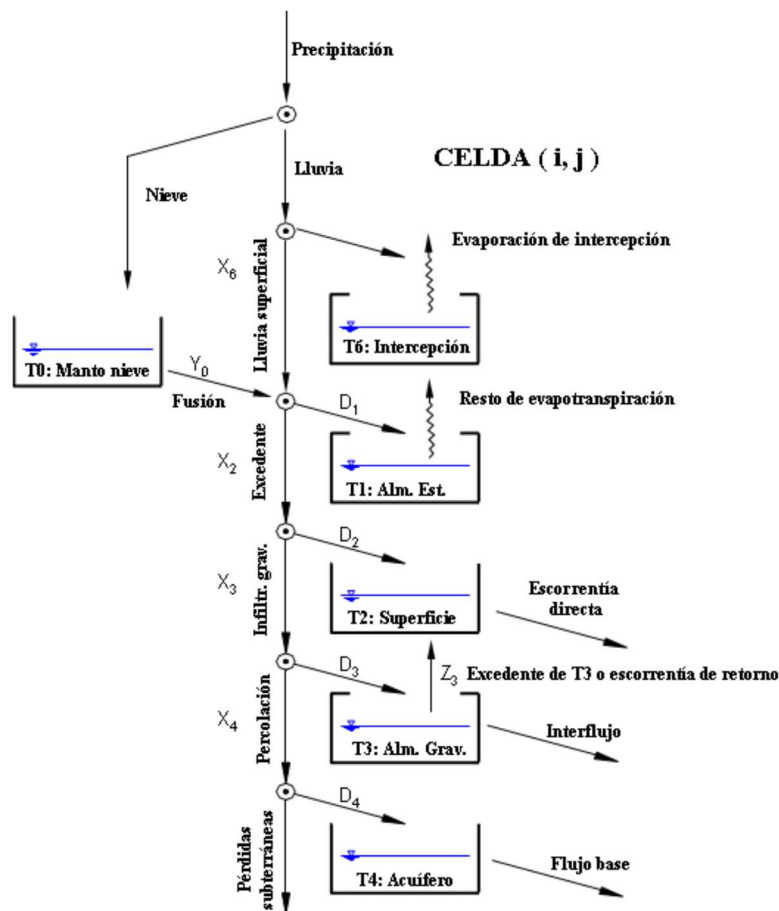


Figura 2-4 Esquema conceptual de tanques del modelo TETIS. Fuente: Tomado de (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

El tanque (T6) es el de intercepción, el cual representa el agua interceptada por la cubierta vegetal durante en episodio de precipitación y que es liberada por evaporación directa sin entrar a hacer parte de la escorrentía. El tanque T1 denominado almacenamiento estático, representa el excedente de la precipitación directa que se queda en el suelo en forma de charcos y sale de el en forma de evapotranspiración, por lo que tampoco hace parte de la escorrentía. El tanque T2 representa el almacenamiento en superficie que puede moverse por la ladera hacia el cauce, y también el agua que puede infiltrarse en el suelo en forma de excedente. El tanque T3 representa el almacenamiento gravitacional, que es el agua almacenada en el suelo por gravedad, la

cual puede ser parte del Interflujo o de la percolación hacia suelo profundo. El tanque T4 representa el almacenamiento subterráneo o agua del acuífero, la cual puede seguir infiltrando hacia suelo muy profundo o formar parte del flujo base del cauce. Y por último, el tanque T0 que representa la aportación a la escorrentía en caso de que exista fusión de nieve (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021)

Adicionalmente a la producción de escorrentía, TETIS representa a su vez la propagación de esta en la cuenca gracias a que los tres tanques inferiores tienen como salida flujos de escorrentía directa, interflujo y flujo base, los cuales drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo siguiendo las direcciones de flujo hasta alcanzar la red de drenaje. El sistema de drenaje se encuentra dividido en tres elementos, ladera, cárcavas y cauces, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie, las laderas presentan escorrentía directa donde el flujo superficial se mueve por medio de una combinación entre flujo laminar y a través de la red de surcos, así mismo el interflujo y el flujo base son generados en sus respectivas capas del suelo, cuando estos alcanzan una celda con un área drenada mayor al área umbral respectiva el flujo sale a superficie (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021). En la Figura 2-5 se observa un esquema de la relación entre las áreas umbrales para las diferentes componentes de la escorrentía y el área de captación.

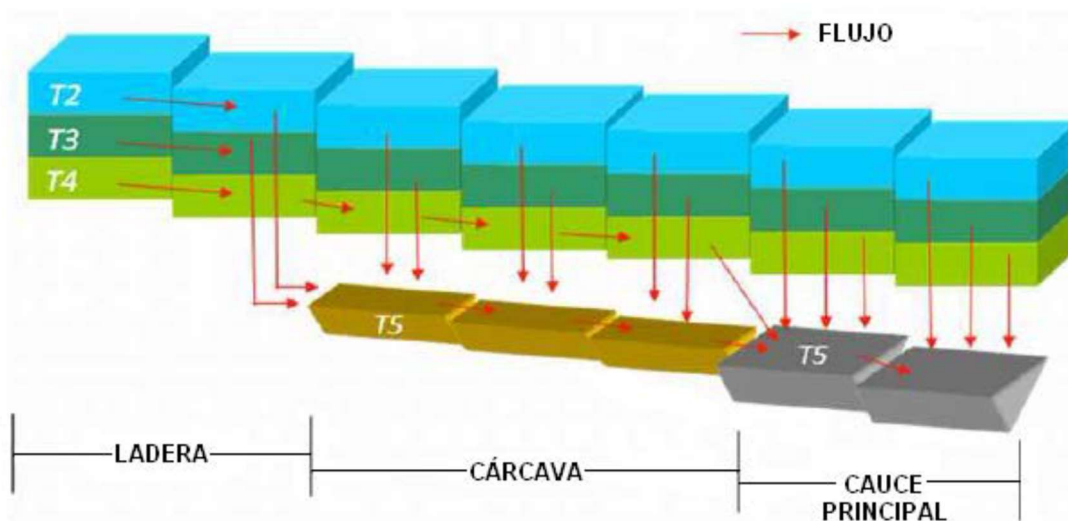


Figura 2-5 Esquema de propagación del flujo propuesto en TETIS. Fuente: Tomado de (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

Este proceso de propagación de la escorrentía se modela en TETIS considerando que el agua no abstraída circula en las laderas ya mencionadas hasta alcanzar algún canal de la red de drenaje, circulando en este a posterior, aproximando este comportamiento por medio del modelo de la Onda Cinemática, una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant, incorporando las características hidráulicas de los cauces a partir de la información geomorfológica de la cuenca (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

La información de entrada necesaria para la ejecución del modelo se basa en series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura (ésta última para el submodelo de fusión de nieve). En cuanto a la información cartográfica, se emplea el formato tipo ráster. Se requiere de un modelo de elevación digital y de los mapas con las características del suelo y subsuelo. Estos últimos se obtienen a partir de estudios de suelos, cobertura vegetal, mapas geológicos, información edafológica, mapas hidrogeológicos y demás temas ambientales que puedan ser de interés y que se encuentren disponibles para la zona de estudio (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

El modelo TETIS presenta una estructura separada de sus parámetros efectivos, de esta forma el valor efectivo en una celda de un parámetro es el resultado de la multiplicación del valor del mapa correspondiente por un factor corrector, que es común para todas las celdas y diferente para cada parámetro. Por lo tanto, el número de variables a calibrar se reduce a 9 (ocho procesos de ladera y acuífero y uno de propagación en la red fluvial), los cuales se presentan en la (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

Tabla 2-2 Parámetros calibrables en el modelo hidrológico TETIS.

Nombre	Factor Corrector	Unidad de medida
Almacenamiento estático máximo	FC1	mm
Evapotranspiración	FC2	mm
Infiltración	FC3	mm/h
Velocidad de ladera	FC4	m/s
Percolación	FC5	mm/h
Interflujo	FC6	mm/h
Percolación profunda	FC7	mm/h

Nombre	Factor Corrector	Unidad de medida
Flujo base	FC8	mm/h
Velocidad en red fluvial	FC9	m/s

TETIS ha sido utilizado previamente para diferentes tipos de estudios en el ámbito académico como en el no académico. En lo referente a las investigaciones académicas, se ha utilizado a distintos niveles de complejidad para trabajos finales de grado, tesinas de maestría y tesis doctorales. Entre los trabajos realizados con TETIS se destacan las tesis doctorales de: Berrios (Berrios Peña, 2011) quién ha estudiado el efecto de escala en un modelo distribuido; Orozco (Orozco Medina, 2014) quien ha estudiado los procesos de acumulación y fusión de nieve; Bussi (Bussi, 2010) ha implementado modelo de sedimentos en diferentes escenarios de disponibilidad de datos; Pasquato (Pasquato et al., 2011) ha comparados dos modelos de vegetación; y Ruiz-Pérez (Ruiz-Pérez et al., 2017) ha propuesto la calibración de un modelo hidrológico utilizando información de satélite, específicamente NDVI, con proyección a utilizar la metodología en cuencas no aforadas.

2.6 POST PROCESAMIENTO PREDICCIONES METEOROLÓGICAS

Los pronósticos probabilísticos generados por medio de modelos matemáticos presentan sesgos intrínsecos en sus valores, por lo cual para poder utilizar estas predicciones es necesario hacer un procesamiento de esta información con el fin de eliminar dicho sesgo, un proceso que se realiza por medio de la utilización de postprocesadores estadísticos habitualmente.

Los postprocesadores estadísticos son modelos estadísticos que relacionan las variables de interés observadas con los predictores apropiados derivados de los resultados directos del modelo, en este caso, meteorológico.

El postprocesador funciona por partes. En primer lugar, los pronósticos directos del modelo de un evento específico y las observaciones correspondientes recolectadas en el período de entrenamiento se introducen en un modelo estadístico para derivar la distribución de probabilidad conjunta entre los pronósticos sin procesar y las observaciones. Posteriormente los miembros corregidos del conjunto se generan a partir de las distribuciones de probabilidad calibradas (Li et al., 2017). En la Figura 2-6 se presenta este

procedimiento de manera gráfica, en donde el objetivo es la obtención de los pronósticos calibrados.

Los postprocesadores deben cumplir con los siguientes propósitos:

- Corregir de los sesgos y los errores de dispersión de los pronósticos originales.
- Conservar la habilidad predictiva de los pronósticos brutos.
- Reducir la escala de los pronósticos a una aplicable (p. ej., escala de cuenca)
- Generar miembros de conjuntos de variables interesadas, que preservan la estructura de dependencia estadística espaciotemporal e inter-variable. (Li et al., 2017).

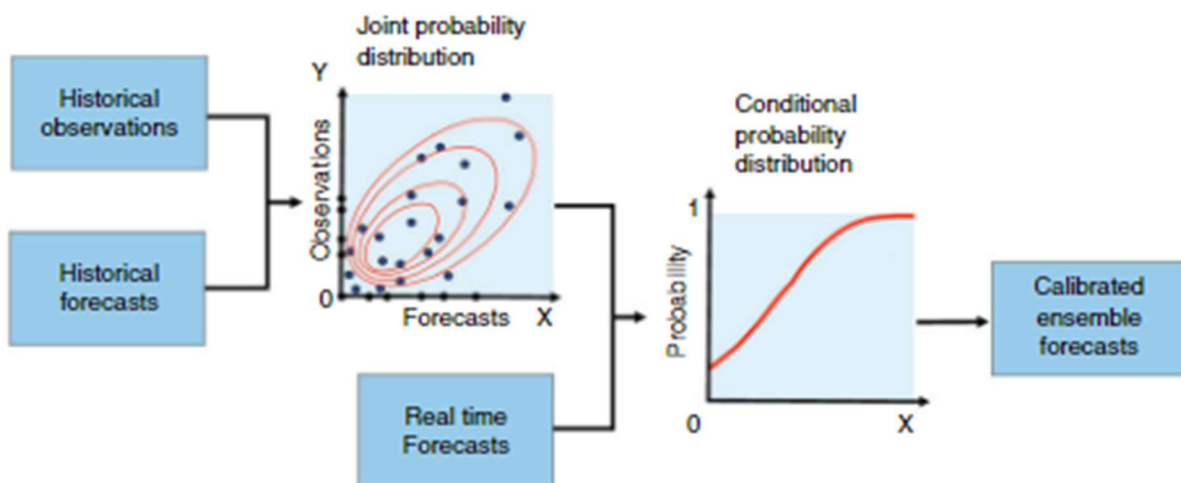


Figura 2-6 Funcionamiento de un postprocesador estadístico para pronósticos conjuntos. Fuente: Tomado de (Li et al., 2017).

Existen diversos enfoques para realizar la corrección del sesgo. En particular existen métodos empíricos como el Quantile Mapping (Mapeo de cuantiles) y el Método Análogo, o métodos estadísticos típicos como la calibración por regresiones o basados en distribuciones condicionales. En el presente estudio se realiza la corrección por medio del método de Quantile Mapping agregando de dos maneras diferentes los datos para obtener sus funciones de distribución. Primeramente, con los datos de las predicciones teniendo en cuenta solamente el mes de lanzamiento y en segundo lugar con las predicciones agregando por mes y por periodo de anticipación.

2.6.1 Quantile Mapping (QM)

El método de Quantile mapping es un método de postprocesado que consiste en la transformación de la función de distribución acumulada (CDF) de las predicciones en la función de distribución observada como presenta la Figura 2-7. Esto se realiza por medio de lo presentado en la Ecuación (1).

$$\tilde{x}_{ajustado} = F_{obs}^{-1}(F_{sim}(x_{sim})) \quad \text{Ecuación (1)}$$

En donde x_{sim} es el valor de la predicción del modelo numérico, $\tilde{x}_{ajustado}$ es la predicción corregida, F_{sim} es la función de distribución acumulada original del modelo y F_{obs}^{-1} es la inversa de la función de distribución acumulada de los datos observados. El mapeo de cuantiles asigna a cada valor de las predicciones el cuantil correspondiente de la función de distribución acumulada de las observaciones. Esta corrección se puede realizar de distintas maneras:

- De forma paramétrica por medio de:
 - Funciones de transferencia para establecer las relaciones cuantil-cuantil
 - Aproximación de distribuciones derivadas
 - Aproximación de las CDF tanto simuladas como observadas a una función de distribución conocida y obteniendo los parámetros respectivos
- D forma no paramétrica por medio de:
 - Aproximación de los cuantiles de manera empírica
 - Cuantiles separados espacialmente de manera regular
 - Cuantiles empíricos robustos aproximados con mínimos cuadrados
 - Suavizado de splines, ajustando una spline a la gráfica cuantil-cuantil de la serie de tiempo observada y modelada (Enayati et al., 2021; Li et al., 2017).

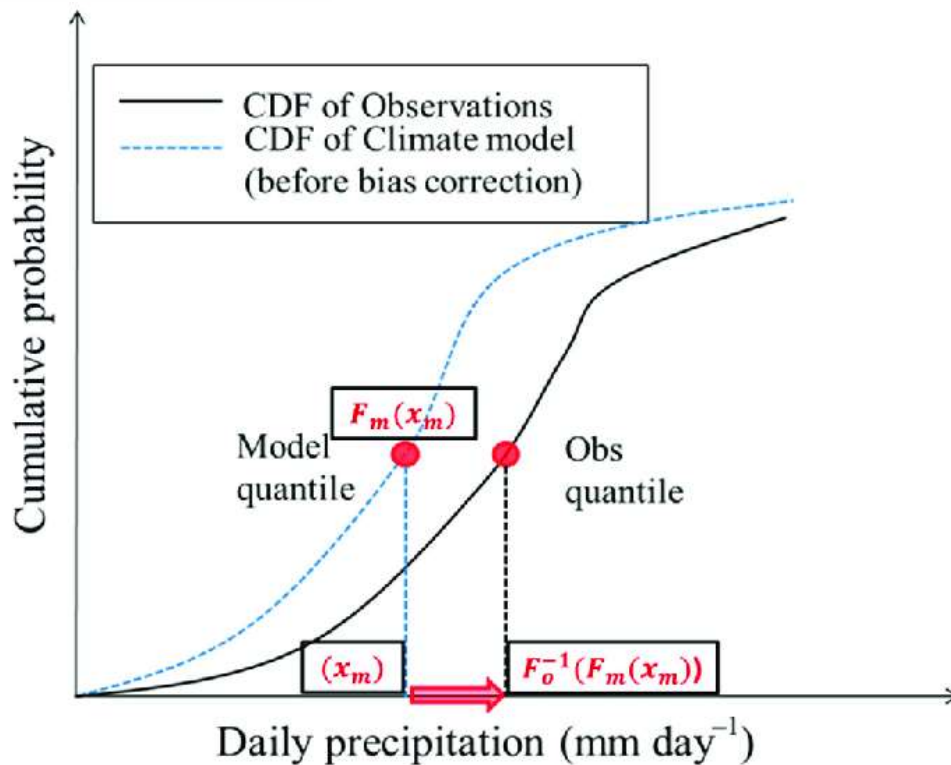


Figura 2-7 Proceso de ajuste por quantile mapping. Fuente:(Gupta et al., 2019)

2.7 ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS PREDICIONES

De igual manera es de gran importancia realizar la evaluación de la calidad de las predicciones, así como de los pronósticos con las correcciones realizadas, con el fin de asimilar su capacidad predictora y la habilidad del post-procesamiento de manera cualitativa. Este análisis de calidad se realiza por medio de la estimación de la calidad para las predicciones brutas y las corregidas, así como un indicador de verificación para evaluar el comportamiento de la corrección del sesgo sobre el original (World Meteorological Organization, 2021).

2.7.1 Calidad (Skill)

Las predicciones por conjuntos pueden verificarse contrastando su comportamiento con respecto a las observaciones por medio de diferentes metodologías.

En el presente documento se evalúa el desempeño de las predicciones con el puntaje (Skill Score) basado en el indicador de Puntuación de probabilidad clasificada continua (CRPS por sus siglas en inglés). Este indicador permite

medir el comportamiento general del modelo al tratarse la temperatura y la precipitación como variables de tipo continuo a manera de conjunto probabi-
lístico. De manera general el CRPS se estima comparando la función de dis-
tribución obtenida de los conjuntos simulados con la función de distribución
de las observaciones para el mismo periodo, el CRPS es el área total entre la
función de distribución del pronóstico y la función de distribución de la ob-
servación (Mishra, 2015) y se estima como se presenta en la Ecuación (2).

$$CRPS = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} (F_t^f(x) - F_t^0(x))^2 dx \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde $F_t^f(x)$ es la función de distribución de la predicción t y $F_t^0(x)$ es la
función de distribución t de las observaciones, la cual es 0 para un valor in-
ferior a la observación y 1 para un valor igual o superior (Mishra, 2015).

Finalmente, el indicador de calidad (Skill Score) basado en el CRPS se obtiene
como presenta la Ecuación (3)

$$CRPSS = \frac{CRPS_{for} - CRPS_{ref}}{CRPS_{perf} - CRPS_{ref}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

En donde $CRPSS$ es el puntaje de la predicción, $CRPS_{for}$ es el CRPS del conjun-
to de las predicciones, $CRPS_{ref}$ es el CRPS del conjunto de referencia climato-
lógico el cual se toma como la función de distribución de la variable para el
mes de estudio (de manera general se define como el CRPS del sistema de
predicción de referencia. Se usa el conjunto climatológico cuando se quiere
determinar si el sistema de predicción mejora a una situación en la que no
hay predicciones), y $CRPS_{perf}$ es el CRPS de la predicción perfecta, que en el
caso del indicador CRPS tiene el valor de cero, por lo cual el CRPSS se puede
simplificar como indica la Ecuación (4).

$$CRPSS = 1 - \frac{CRPS_{for}}{CRPS_{ref}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

El indicador CRPSS se encuentra definido entre valores mínimos teóricos de
menos infinito y el valor máximo teórico de 1, en donde un modelo de pre-
dicción probabilístico en el cual la predicción sea perfecta toma un valor de 1
otorgando una muy alta calidad de predicción, con valores positivos en casos
en donde se tenga valor predictivo y negativos en donde se pierda valor al
usar la predicción.

3 METODOLOGÍA

El procedimiento para la obtención de las predicciones hidrológicas subestacionales se desarrolló por medio de la utilización del lenguaje de programación estadística R para la información de carácter meteorológico, tanto de datos históricos como de las predicciones, así como para la evaluación de la calidad de los pronósticos hidrológicos y meteorológicos. La estimación de dichos pronósticos hidrológicos se realiza con el modelo hidrológico TETIS previamente calibrado.

El procesamiento de datos meteorológicos históricos, de predicciones meteorológicas, el postprocesamiento de las predicciones meteorológicas brutas, la ejecución de TETIS para la obtención de predicciones meteorológicas y el análisis de calidad de las predicciones tanto meteorológicas como hidrológicas se realizan por medio de diferentes códigos de programación desarrollados en el lenguaje de programación R.

En la Figura 3-1 se presenta un esquema general con la metodología de obtención y análisis de las predicciones hidrológicas, en primer lugar se obtiene la información meteorológica para la zona de estudio de la base de datos ERA5-Land para el periodo 2013-2021, estimando a su vez la evapotranspiración potencial por medio del método de Hargreaves (entrada requerida por TETIS). Posteriormente se obtienen los valores de predicciones meteorológicas del modelo ECMWF del proyecto S2S y se procede con el postprocesamiento de las mismas por medio del método del mapeo de cuantiles (Quantile Mapping) aproximando los cuantiles de las predicciones a los de los datos históricos por medio de dos métodos: agregando las predicciones por mes de ejecución del modelo en un primera aproximación, y agregando por mes y día de anticipación en una segunda aproximación. Realizado el postprocesamiento se realiza el análisis de calidad por medio del índice CRPSS, el cual compara las funciones de probabilidad de las predicciones evaluadas y los valores históricos, para las predicciones brutas, agregadas por mes y agregadas por mes y periodo de anticipación, los cuales se representan por medio de mapas de calor para la Confederación Hidrográfica del Júcar que representan el porcentaje de acierto de las predicciones de cada variable espacialmente distribuida, seleccionando finalmente los pronósticos que mejor comportamiento presenten para obtener las predicciones hidrológicas.

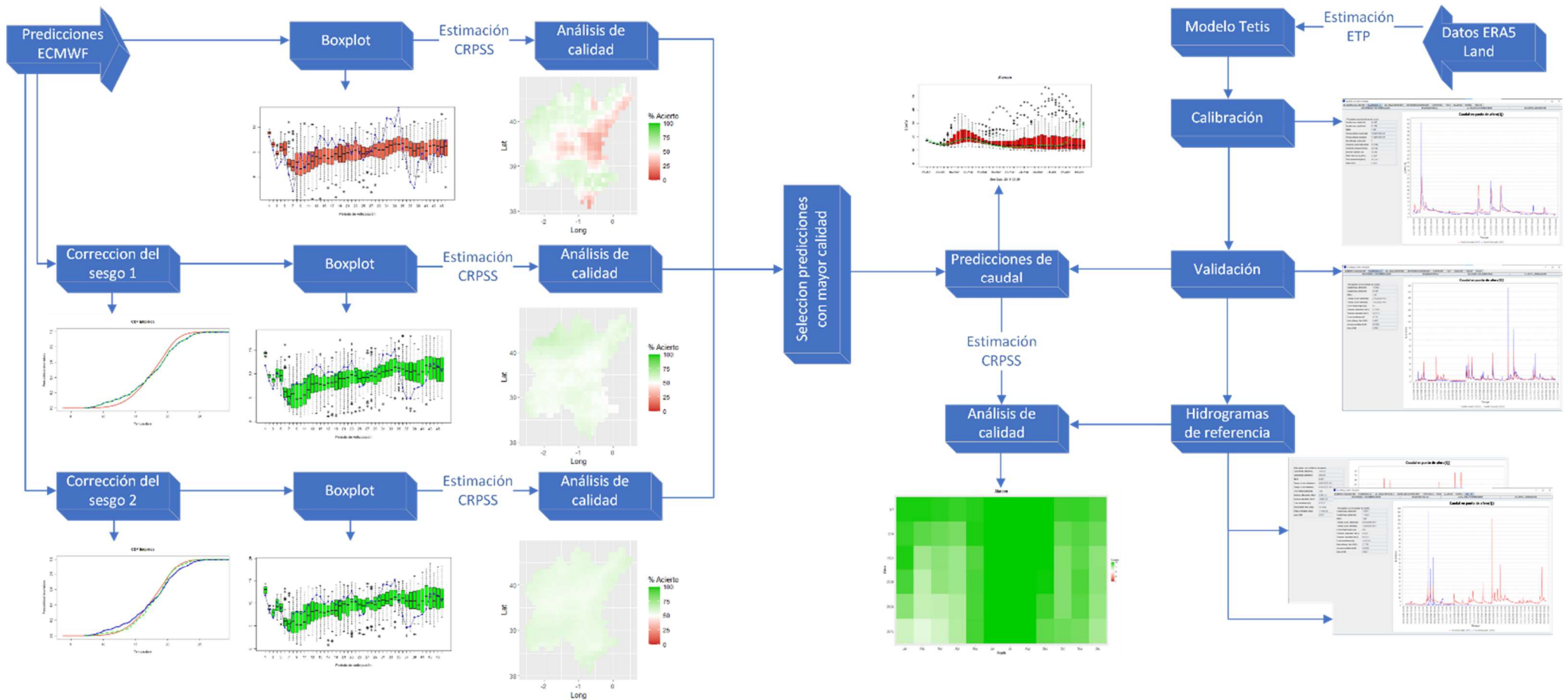


Figura 3-1 Esquema general de desarrollo.

Paralelamente al análisis de la información meteorológica tanto histórica como de predicciones, se procede con la calibración y validación del modelo TETIS, el cual se realiza en dos estaciones de aforo que se encuentran en régimen natural. Una vez calibrado y validado el modelo, y seleccionado la escala de la corrección del sesgo de los pronósticos, se obtienen los valores de las predicciones de las variables requeridas para la modelación en TETIS, la precipitación y la evapotranspiración potencial, obteniendo las predicciones hidrológicas para los cinco embalses de interés, para finalmente obtener la calidad de dichas predicciones por medio del índice CRPSS representado con un mapa de calor.

Cada uno de los pasos de este procedimiento cuenta con una metodología de cálculo las cuales se describen a continuación.

3.1 OBTENCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Como se mencionó anteriormente para realizar la modelación hidrológica con TETIS es necesario obtener una serie de evapotranspiración potencial a escala diaria para cada una de las celdas de la malla ERA5-Land, tanto para los datos históricos como para las predicciones.

En la literatura existen diferentes aproximaciones para la obtención de la evapotranspiración de referencia, como los métodos de Thornwaite, Penman - Monteith o Hargreaves-Samani. En el presente estudio se utiliza la fórmula propuesta por Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), la cual solamente necesita de datos de temperatura y radiación solar. La expresión simplificada agrupando términos se presenta en la Ecuación (5)

$$ET_o = 0.0023 \times (t_{med} + 17.78) \times R_0 \times (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde ET_o es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día

t_{med} es la temperatura media diaria en °C

R_0 es la radiación solar extraterrestre en mm/día, (se encuentra tabulada)

t_{max} es la temperatura máxima diaria en °C

t_{min} es la temperatura mínima diaria en °C

La obtención de la serie de evapotranspiración potencial se obtuvo por medio de un código desarrollado y ejecutado en R.

3.2 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO TETIS A LA CUENCA DEL JÚCAR

Dentro de la presente investigación se utiliza el modelo TETIS desarrollado previamente por Lía Ramos (Ramos Fernández, 2013) durante el desarrollo de su Tesis Doctoral para obtener un sistema de predicción hidrológica basado en los pronósticos subestacionales de precipitación y temperatura para apoyar la gestión de los sistemas de recursos hídricos dentro de la cuenca del río Júcar, cuya estructura y parámetros se describen a continuación.

3.2.1 Modelo Digital de Elevación y derivados

El MDE utilizado tiene un tamaño de celda de 500x500 m, se presenta en la Figura 3-2 a). Como paso previo, se procede a la corrección del MDE. Este paso es necesario para eliminar las incertidumbres en la determinación de las direcciones de drenaje derivadas de una baja precisión en las cotas o un tamaño excesivo de celda. Esto provoca que no exista una única pendiente máxima positiva para el cálculo de las direcciones de drenaje.

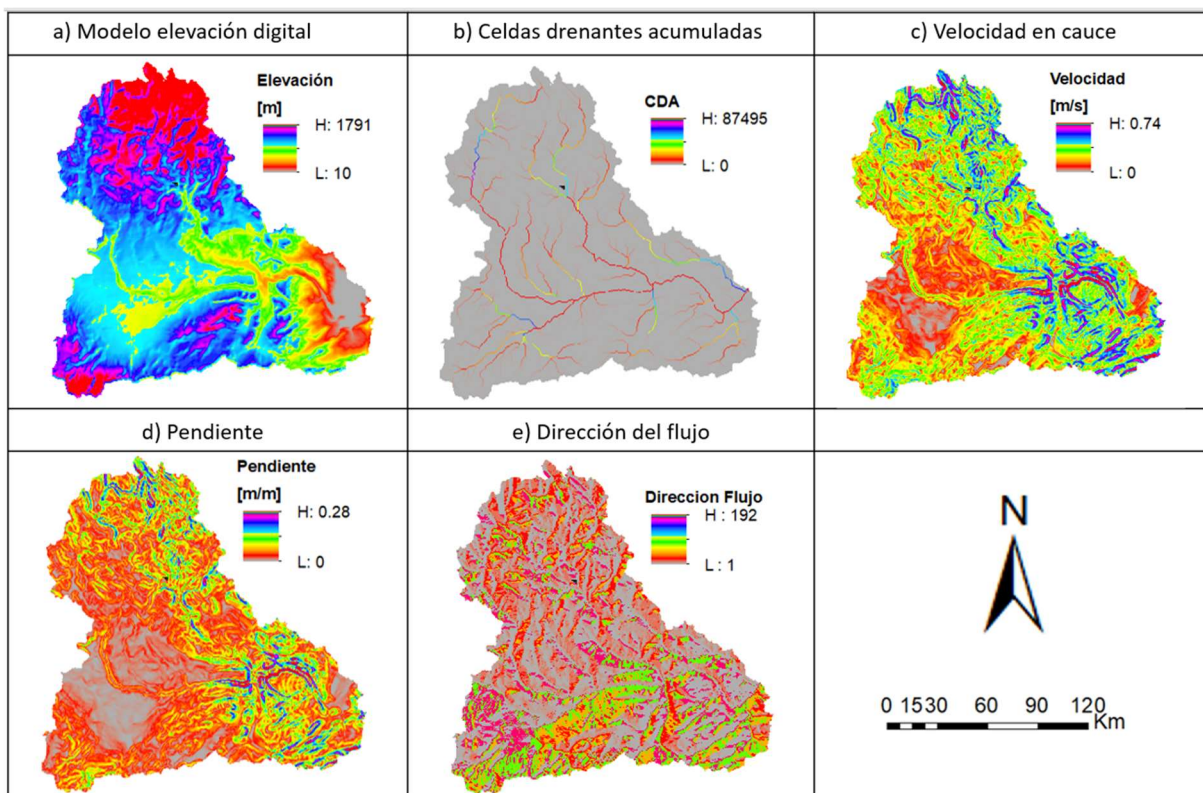


Figura 3-2 Mapas de MDE y derivados correspondientes a la cuenca de estudio.

Los elementos que producen incertidumbres son: hoyos, zonas planas, bifurcaciones y sumideros espurios. Una vez que el MDE crudo está corregido, es posible calcular los demás mapas derivados del MDE: dirección de flujo (Figura 3-2 e), celdas drenantes acumuladas (Figura 3-2 b), pendientes (Figura 3-2 d), velocidad en el cauce (Figura 3-2 c).

El mapa de celdas drenantes acumuladas se calcula mediante un algoritmo que va acumulando la cantidad de celdas que vierten a cada una.

Para el caso del mapa de pendientes el mismo se determina mediante la diferencia de cotas máxima para cada celda. La misma puede ser expresada en m/m, porcentaje o grados. Para este trabajo se utiliza la pendiente en unidades de m/m.

En relación con la velocidad, aunque la misma es considerada estacionaria, varía en función de la pendiente según lo expresado en la Ecuación (6):

$$v = f(\text{pendiente}) = \sqrt{2 \times \text{pendiente} [m/m]} \quad \text{Ecuación (6)}$$

3.2.2 Parámetros hidrológicos

La capacidad de infiltración se ha calculado a partir de los mapas derivados de base de datos europea de suelos (ESDB por sus siglas en inglés) aplicando las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls.

Para estimar la capacidad de percolación del sustrato, se ha utilizado el mapa de permeabilidad cualitativa del acuífero del IGME. Este mapa aporta información sobre las unidades litológicas existentes: a) Roca (C), b) Detrítica (D), c) Cuaternario (Q), d) Volcánica (V), e) Metadetrítica (M), f) Ígnea (I), y g) Evaporita. Además, clasifica la permeabilidad del acuífero de forma cualitativa: a) Muy alta (VH), b) Alta (H), c) Media (M), d) Baja (L), e) Muy Baja (VL).

Realizando el cruce de ambos tipos de información cualitativa y aplicando las funciones de pedotransferencia, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Capacidad de percolación del sustrato según el tipo de roca y su permeabilidad cualitativa.

Categoría	Valor adoptado (mm/h)	Categoría	Valor adoptado (mm/h)
C-MB	4.17×10^{-4}	D-MA	416.67
C-B	7.41×10^{-2}	M-MB	4.17×10^{-7}
C-M	13.18	M-B	2.34×10^{-5}

Categoría	Valor adoptado (mm/h)	Categoría	Valor adoptado (mm/h)
C-A	2.34×10^3	M-M	13.18×10^{-4}
C-MA	4.17×10^5	Q-B	7.41×10^{-3}
E-MB	4.17×10^{-2}	Q-M	1.32
E-B	0.74	Q-A	234.31
E-M	13.18	Q-MA	4.17×10^4
D-MB	4.17×10^{-6}	V-MB	0.36
D-B	4.17×10^{-4}	V-B	1.14
D-M	4.17×10^{-2}	I-MB	36×10^{-8}
D-A	4.17	I-B	36×10^{-6}

Como TETIS presenta una estructura separada de sus parámetros efectivos, por lo tanto, el valor efectivo en una celda de un parámetro es el producto del mapa correspondiente por un factor corrector. De esta forma, lo importante es estimar adecuadamente el valor relativo entre las celdas y su distribución espacial. Por lo tanto, se hacen algunas asunciones como utilizar el mapa de capacidad de infiltración del suelo como el de la conductividad hidráulica del interflujo (Figura 3-3 e), es decir $K_{ss}=K_s$. De igual manera, y por la misma razón se usa el mapa de percolación para representar a los mapas de conductividad hidráulica saturada del acuífero (Figura 3-3 f), o sea $K_{sa} = K_p$, y capacidad de pérdidas del acuífero (Figura 3-3 d), asumiendo $K_{ps} = K_p$.

El almacenamiento estático máximo (Figura 3-3 c), es la cantidad máxima de agua que puede almacenarse en la superficie del terreno, que no es capaz de salir como escorrentía superficial, y que, por lo tanto, debe evaporarse o infiltrarse en el suelo. Depende de la forma del terreno y del tipo de suelo. El mismo está compuesto por el almacenamiento superficial (almacenamiento en charcos y almacenamiento en depresión) y por el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares (almacenamiento capilar). Por lo tanto, su cálculo queda expresado en la Ecuación (7):

$$Hu = AS + AT \times \min(PR; ROO) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde AS es el almacenamiento en superficie (almacenamiento en charcos más almacenamiento en depresión), expresado en mm; AT es el contenido de agua disponible en el suelo, expresado en mm/m, PR es la profundidad de las raíces sin obstáculos, expresada en m; ROO es la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces, expresado en m. Hu se expresa en mm.

Para el almacenamiento superficial (Ecuación (8)), que se encuentra compuesto del almacenamiento en charcos y el almacenamiento en depresión, se ha procedido al cálculo de ambas componentes por separado y a la posterior suma de ambos valores.

$$AT = AC + AD \quad \text{Ecuación (8)}$$

donde AC es el almacenamiento en charcos, expresado en mm; y AD es el almacenamiento en depresión, expresado en mm.

Para el almacenamiento en charcos, los valores se obtienen de estudios previos realizados en el DIHMA, y se pueden ver tabulados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Almacenamiento en charcos según el uso del suelo.

Uso del suelo	Alm. Charcos (mm)
Huerta	6
Cítricos	6
Cultivo de regadío	6
Viñedos - Olivos	6
Cultivo de secano	6
Bosque de coníferas	4
Bosque mixto	5
Matorral	3
Vegetación escasa	3
Suelo Urbano	0
Cursos de agua	0
Pastizal	3

Para el cálculo del almacenamiento en depresión expresada en mm, se ha utilizado la expresión siguiente (Ecuación (9)):

$$AD = 10 - 1.3 \times \text{pendiente}(\%) \quad \text{Ecuación (9)}$$

Para el cálculo del almacenamiento capilar se ha recurrido a la información cartográfica de la ESDB. A partir de éstos, es posible aplicar las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls y calcular el contenido de agua disponible en el suelo. Los valores de la profundidad de las raíces han sido obtenidos de estudios previos del DIHMA y son visibles en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Profundidad de raíces según el uso del suelo.

Uso del suelo	Prof. Raíces (m)
Huerta	0.7
Cítricos	1.5
Cultivo de regadío	1.5
Viñedos – Olivos	0.8
Cultivo de secano	0.8
Bosque de coníferas	1
Bosque mixto	0.7
Matorral	0.2
Vegetación escasa	0.2
Suelo Urbano	0
Cursos de agua	0
Pastizal	0.2

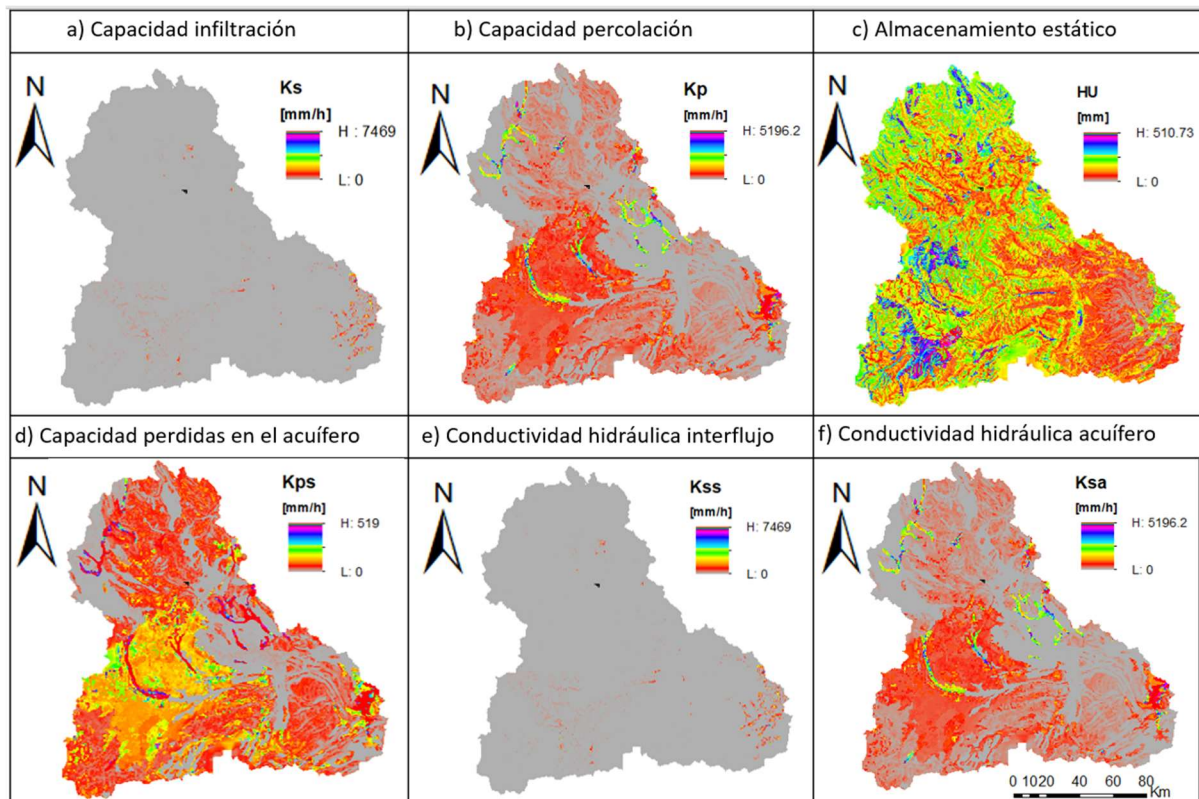


Figura 3-3. Mapas de parámetros hidrológicos utilizados en la cuenca de estudio.

3.2.3 Áreas umbrales: Onda Cinemática Geomorfológica

Para la determinación de las áreas umbrales es preciso conocer la diferencia entre cauce, cárcava y ladera. En TETIS, la zona de cárcavas es donde se produce el paso del flujo en ladera al flujo canalizado (cauce). Generalmente comienza en una zona de canalización incipiente por surcos y termina en la cabecera de los cauces. La ladera es el resto de superficie que no es considerada cauce ni cárcava y en la que sólo se produce escorrentía directa.

Las áreas umbrales a determinar son el área umbral del flujo base y el área umbral del interflujo. La determinación del área umbral del flujo base se ha determinado mediante la comparación entre una fuente cartográfica externa de cauces (mapa vectorial de la red de cauces); y el resultado obtenido para diversos valores de umbral. Por lo tanto, la metodología seguida ha sido la prueba de diferentes áreas umbrales hasta obtener una que reproduzca de forma aceptable el inicio de los cauces y el número de cauces que componen la red. Finalmente, el valor adoptado ha sido 0.9 km².

En la determinación del área umbral del interflujo se ha utilizado un mapa cartográfico. En un primer lugar se ha estimado que el área umbral del interflujo debería situarse entre 10 y 100 km². La metodología para su estimación ha sido el cálculo del área de la cuenca asociada al punto en el que se inicia el cauce, es decir, donde la línea azul que identifica los cauces pasa de discontinua a continua. Esto se ha llevado a cabo en diferentes zonas y se han obtenido valores muy diversos dentro del intervalo esperado. Debido a la variedad de resultados se ha decidido emplear el valor medio de 50 km².

Para los valores de los parámetros (coeficientes y exponentes) de la OCG se ha utilizado valores obtenidos en un estudio previo de la cuenca del Tajo (DIHMA, 2001). Los valores se pueden observar en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Coeficientes y exponentes utilizados para la OCG

Coeficientes		Exponentes	
k	1.2968	ϕ	0.7571
C1	3.1301	$\epsilon 1$	0.5088
Cd	6.5156	$\epsilon 1$	0.3253
Cn	0.047	θ	0.6548
		ξ	0.1667

Debido a las características que posee el área de estudio y el tipo de cauce, de los nueve parámetros calibrables que posee el modelo hidrológico, en esta investigación han sido calibrados ocho de ellos, dejando el parámetro de percolación profunda (FC7) fuera del proceso de calibración.

Para la presente investigación se realiza la calibración en la estación de aforo de Pajaroncillo, la cual se encuentra en régimen natural, por lo cual para la validación en la estación de El Castellar y la obtención de caudales para los embalses de interés se obtienen valores de caudales medio diarios en régimen natural. Se realiza también la validación en las entradas a los embalses de interés, sin embargo, al no estar estas en régimen natural son descartados los valores de los índices de bondad.

3.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN MODELO TETIS

Por medio de la modelación hidrológica es posible representar de manera simplificada los procesos físicos que ocurren en la cuenca por medio de ecuaciones matemáticas, por lo cual, teniendo como objetivo que esta simplificación reproduzca de la mejor manera posible la realidad, es necesario realizar la calibración de los parámetros que caracterizan la cuenca desde el punto de vista del modelo, junto con una posterior validación tanto espacial como temporal.

En el caso de TETIS, se pueden calibrar diversos elementos y parámetros:

- Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía.
- Los valores iniciales de las variables de estado de almacenamiento.
- Los coeficientes de correlación con la altura para la interpolación espacial.
- Los parámetros agregados del submodelo de nieve

(Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

De igual manera, TETIS permite realizar la calibración automática de los parámetros deseados por medio del método del SCE-UA, desarrollado por la Universidad de Arizona, un método eficiente y robusto para la realización de

la calibración de modelos precipitación–escorrentía (Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida, 2021).

Una vez realizada la calibración del modelo, se realiza una validación espacio–temporal de los parámetros, con el fin de demostrar que los procesos físicos son representados de buena manera con dichos parámetros calibrados.

La validación de tipo espacio – temporal consiste en la evaluación del desempeño del modelo calibrado en un punto espacial diferente al de calibración para una ventana temporal distinta.

3.4 POSTPROCESAMIENTO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR

El postprocesamiento de la información de predicciones meteorológicas se realizó por medio de la metodología de cuantiles empíricos del método de quantile mapping. Este consiste en aproximar los cuantiles empíricos de las predicciones a los cuantiles empíricos de los datos históricos.

Para cada celda de ERA5–Land con información de temperaturas y precipitación, se obtiene su función de probabilidad acumulada (CDF), de igual manera para cada celda de la malla del modelo ECMWF se obtiene la CDF de todo el conjunto probabilístico de predicciones y se ajusta, por medio de una aproximación de cuantiles empíricos de carácter no paramétrico, a la observada.

El ajuste se realiza para cada una de las celdas del modelo ECMWF que se encuentran dentro de las celdas de la malla ERA5–Land, respetando de esta manera la variabilidad espacial de las variables.

Para las correcciones realizadas agrupando las predicciones por mes de ejecución del modelo, para cada celda de ERA5 Land, se corrige la función de distribución de las predicciones que tienen como en común el mismo mes de ejecución del modelo ECMWF, y se ajusta su CDF a la observada para el correspondiente mes de ejecución. Es decir, si se desea hacer la corrección de las predicciones ejecutadas en el mes de enero, se toman los resultados de las 56 ejecuciones con todos los 51 miembros, se obtiene la CDF y esta se

ajusta a la CDF de los valores que se encuentran en la base ERA5 Land del mes de enero.

De manera análoga se procede con el proceso de quantile mapping para la corrección por mes y periodo de anticipación, solamente que en este caso se obtiene la CDF de las predicciones que además de tener en común el mismo mes de ejecución, tienen el mismo periodo de anticipación. Por ejemplo se obtiene la función de distribución para cero días de periodo de anticipación para todas las 56 ejecuciones del modelo ECMWF realizadas en enero durante el periodo de estudio y esta es la que se corrige con la CDF observada en el mes de enero para cada celda

La comprobación del ajuste de las funciones de distribución se presenta de manera gráfica, primero por medio de un diagrama de cajas y bigotes en el que se presenta la distribución diaria de las perturbaciones, junto con la referencia histórica, para cada uno de los días de anticipación de cada ejecución del modelo ECMWF, seguido de un diagrama de violines, en el cual se presenta y compara la función de densidad de probabilidad (PDF) de las predicciones estudiadas (ya sean las brutas o las corregidas) y la función de densidad de probabilidad de los valores históricos de ERA5 Land para la celda de estudio y el correspondiente mes.

En el presente estudio se realiza el postprocesamiento por medio de un código desarrollado y ejecutado en R.

3.5 ANÁLISIS DE CALIDAD DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR

El análisis de calidad de predicciones se ha realizado tanto para las predicciones meteorológicas brutas y postprocesadas, como para las predicciones hidrológicas, teniendo como datos de referencia los valores obtenidos de cada variable de la base ERA5–Land para el caso meteorológico y los valores de caudal obtenidos de TETIS para las entradas a los embalses de interés para el caso hidrológico.

El índice CRPSS se obtuvo para cada una de las celdas del ERA5–Land, comparando los valores de las predicciones obtenidas que coinciden con las de la malla de ERA5–Land, lo cual se realizó por medio de un código desarrollado en R utilizando las funciones del paquete qmap (Gudmunson, 2016).

En el caso de las predicciones meteorológicas, al ser información con una connotación espacial, se presentan mapas de calor espacialmente distribuidos para toda la Demarcación Hidrográfica del Júcar, con los cuales se representa para cada celda el porcentaje de las simulaciones con un valor del índice CRPSS positivo, es decir la cantidad de valores de predicciones que obtuvieron un mejor comportamiento respecto a la referencia tomada de ERA5 Land, para cada variable meteorológica y para cada conjunto de predicciones (las brutas del ECMWF, las corregidas por mes y las corregidas por mes y periodo de anticipación). El análisis realizado emplea el valor medio del porcentaje de predicciones con un valor positivo del CRPSS, promediado para una escala temporal semanal al tener 46 periodos de anticipación de la información (0-45 días), por lo cual se agregan los valores de las predicciones en 6 grupos, de 0-7 días, de 8-14, de 15-21, de 22-28, de 29-35 y de 36-45 días.

El cálculo de los indicadores CRPSS y los respectivos mapas de salida se obtuvieron por medio de un código desarrollado en R.

3.6 OBTENCIÓN DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS

Con el modelo hidrológico calibrado se procede con la obtención de las predicciones hidrológicas a partir de las predicciones meteorológicas de precipitación y temperatura. Estas predicciones son obtenidas ejecutando el modelo hidrológico TETIS tomando como input cada una de las 51 series de los miembros del ensemble de las predicciones de precipitación, y las respectivas series de evapotranspiración estimadas por medio del método de Hargreaves, el día de ejecución del modelo de predicción meteorológico. Es decir que si el ensemble de predicciones meteorológicas se ejecutó el día 25-02-2019, se ejecutará TETIS con fecha de inicio del día 25-02-2019 para cada una de las series input de predicción y obteniendo de cada una un valor de caudal correspondiente construyendo el ensemble de caudales de predicción. Los valores de caudal obtenidos dependen de la condiciones iniciales de la cuenca, por lo cual en primer lugar se ejecuta TETIS hasta el día anterior a la fecha de ejecución del modelo ECMWF de predicción, obteniendo de esta manera las condiciones de la cuenca para el día de interés.

Del modelo ECMWF de predicción se han obtenido los datos de 625 ejecuciones para el periodo de estudio 2016–2021, cada una con 51 series de datos, por cual para la obtención de los caudales es necesario ejecutar el modelo de TETIS 31 875 veces. Para se han desarrollado tres scripts en R para poder realizar este procedimiento, un primer script para poder obtener la evapotranspiración potencial en cada una de las celdas de la malla correspondientes a la base ERA5 Land, un segundo script para la creación de los 51 archivos de entrada para TETIS para una misma fecha de ejecución del modelo, y un tercer script para ejecutar TETIS con cada uno de los mencionados archivos input.

3.7 ANÁLISIS DE CALIDAD DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS

Como se mencionó anteriormente, en el caso de las predicciones hidrológicas se asumen como datos de referencia los valores de caudal obtenidos a partir del modelo de TETIS, ya que estos se obtienen en régimen natural al realizarse la calibración de parámetros en la estación de Pajaroncillo la cual se encuentra en régimen natural, asumiendo como verdaderos los valores que se generan en los distintos lugares de interés.

El procedimiento es análogo al presentado en la sección 3.5 más atrás, sin embargo, en este caso al ser información puntual, se presentan los resultados como un mapa con el cual se representa el porcentaje de las simulaciones con un valor del índice CRPSS positivo.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos durante la investigación. En primer lugar, se presentan los resultados de la calibración y la validación del modelo hidrológico TETIS utilizado, así como el análisis de las predicciones obtenidas, tanto para las predicciones brutas como para las dos correcciones de sesgo realizadas, para las 4 variables meteorológicas de interés, de ellas se seleccionaron las predicciones que contaran con mayor calidad para posteriormente obtener las predicciones hidrológicas por medio del modelo hidrológico calibrado.

De igual manera se presentan los resultados obtenidos de las predicciones hidrológicas de aportación a los embalses de interés, mostrando la calidad de estas.

4.1 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

En el presente caso de estudio, la calibración del modelo de TETIS utilizando como referencia los valores de caudales medios diarios para el periodo 2013–2015. Adicionalmente se han calibrado 8 de los 9 factores correctores, debido a que el factor corrector que representa el flujo subterráneo profundo (FC-7) se ha definido como 0 ya que se desea desconectar este proceso de los otros que se presentan en la cuenca.

Los valores de los parámetros obtenidos durante la calibración se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Valores de los factores correctores calibrados

Factor Corrector	Valor	Factor Corrector	Valor
FC-1	0.74508	FC-5	0.01470
FC-2	0.61535	FC-6	14.63869
FC-3	0.68859	FC-8	2.89468
FC-4	0.27808	FC9	0.04432

Los valores de los índices de bondad de ajuste utilizados para la evaluación de la calibración son el Índice de Nash–Sutcliffe (NSE) y el valor de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). En la Tabla 4-2 se presentan los valores del NSE y el RMSE obtenidos para el periodo de calibración.

Tabla 4-2 Índices de bondad de ajuste obtenidos para la calibración.

Índice de ajuste	Valor
NSE	0.5224
RMSE	1.836

Adicionalmente, en la Figura 4-1 se presentan los caudales simulados y observados en la estación de Pajaroncillo para el periodo de calibración.

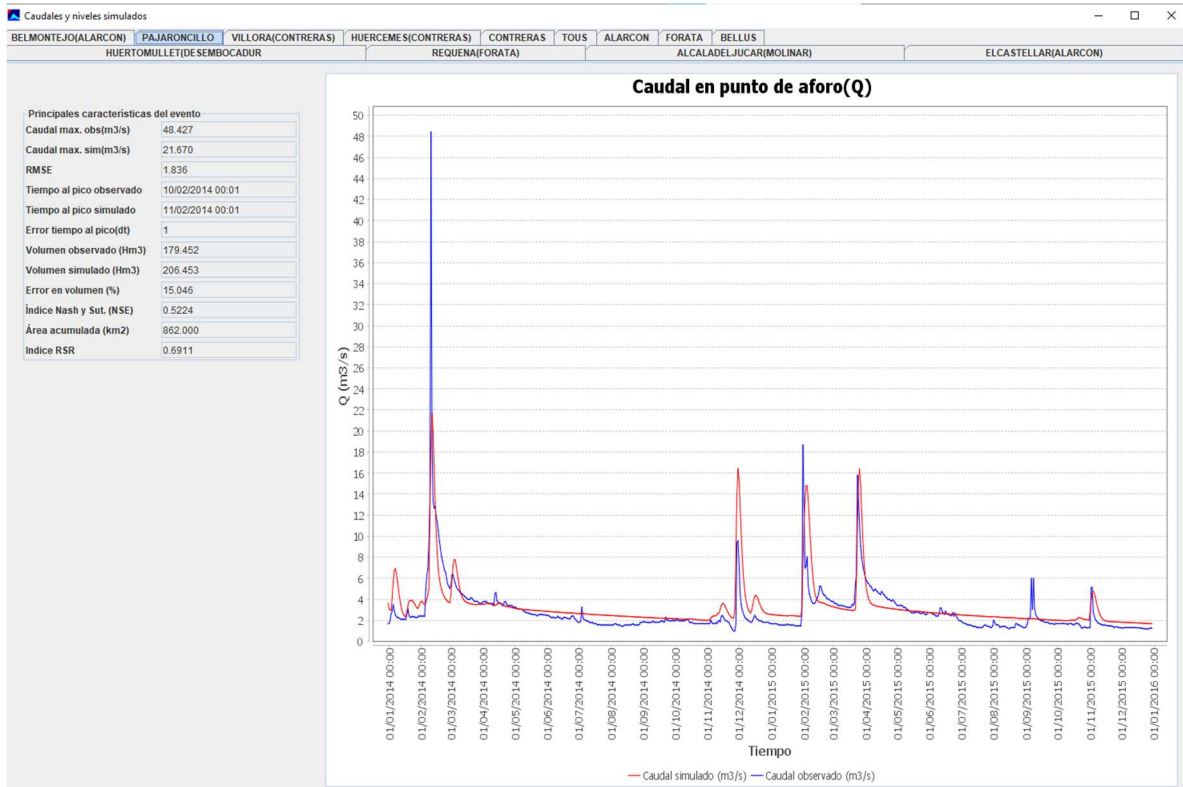


Figura 4-1 Hidrograma obtenido para el periodo 2014-2015 en la estación de Pajaroncillo.

Posterior a la calibración se realiza una validación de carácter espacial y temporal, con el fin de determinar si con los parámetros obtenidos es posible representar una ventana temporal diferente a la calibrada y adicionalmente comprobar si los valores de caudal que se obtienen en puntos distintos a la estación donde se realiza la calibración son bien representados. La validación se realizó en dos estaciones, la estación de Pajaroncillo en donde se ha realizado la calibración, y la estación de El Castellar, otra estación que se encuentra en régimen natural, para los periodos de calibración (2013–2015) y el periodo de estudio (2016–2021).

Los valores obtenidos para el NSE y el RMSE en los distintos puntos de validación tanto para el periodo de calibración 2014–2015 (sin tener en cuenta

el año 2013 asumido como calentamiento del modelo), como para el periodo de estudio 2016–2021 se presentan en la Tabla 4–3.

Tabla 4-3 Valores de los índices de bondad obtenidos durante la validación espacio – temporal.

Punto de Validación	Periodo	Valor
Pajaroncillo	2014–2015	NSE = 0.5234 RMSE = 1.836
	2016–2021	NSE = 0.4667 RMSE = 4.367
Castellar	2014–2015	NSE = 0.5028 RMSE = 5.988
	2016–2021	NSE = 0.3503 RMSE = 9.527

En las Figuras Figura 4–2, Figura 4–3 y Figura 4–4 se presentan los hidrogramas obtenidos para la validación espacio – temporal en las estaciones de Pajaroncillo y El Castellar respectivamente, para los periodos en 2014–2015 y 2016–2021.

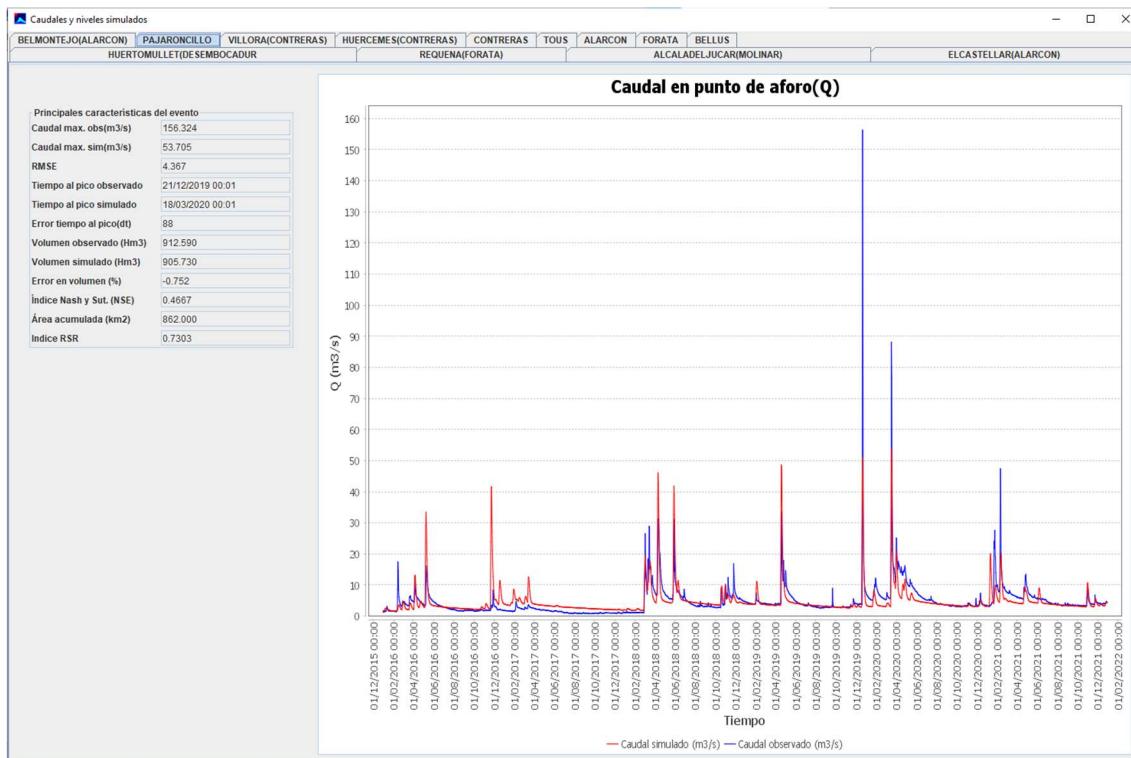


Figura 4-2 Hidrograma obtenido para el periodo 2016-2021 en la estación de Pajaroncillo.

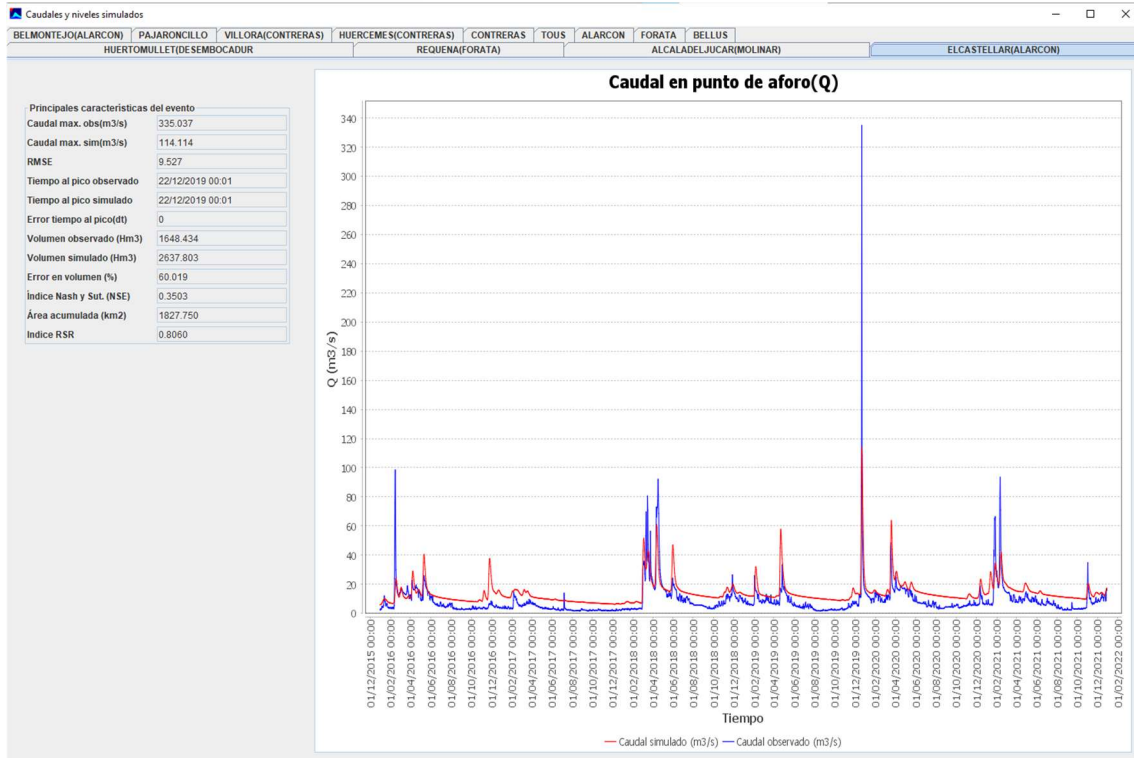


Figura 4-3 Hidrograma obtenido para el periodo 2014-2015 en la estación de El Castellar.

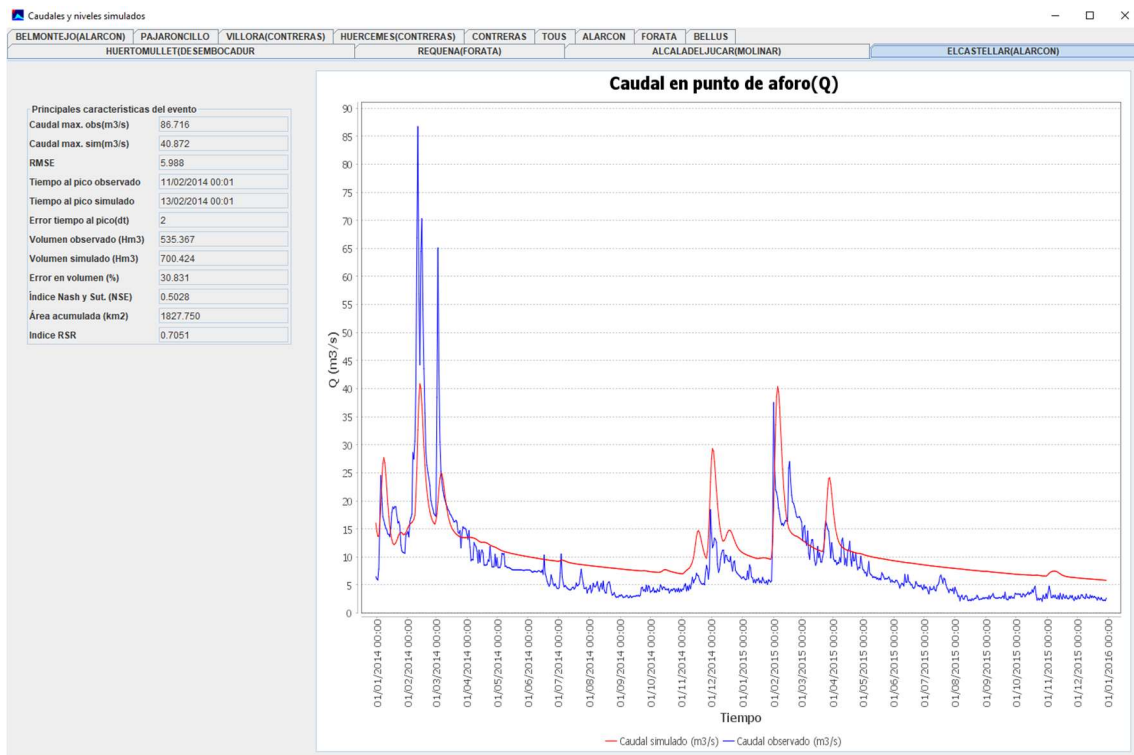


Figura 4-4 Hidrograma obtenido para el periodo 2016-2021 en la estación de El Castellar.

Una vez se ha realizada la validación del modelo, se obtienen los caudales en régimen natural para los embalses de interés, Alarcón, Bellús, Castellar, Forata y Tous, de los cuales se presentan en el Anexo I los hidrogramas.

Los hidrogramas a régimen natural se asumen como la referencia a la hora de calcular la calidad de las predicciones hidrológicas.

4.2 ANÁLISIS DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS PARA LA CUENCA DEL JÚCAR

Como se mencionó previamente, se realiza el análisis de calidad de las predicciones para cada una de las variables meteorológicas de interés y cada una de las correcciones realizadas. Se presenta como ejemplo en primer lugar un diagrama de cajas y bigotes representando la distribución del conjunto de 51 miembros de las predicciones para cada uno de los días del periodo de anticipación entre 0 y 45, junto con los valores observados de la serie con los datos de la variable para cada celda de la base ERA5-Land, para una ejecución del modelo ECMWF.

De igual manera, para una celda de la Demarcación Hidrográfica se presenta un diagrama de violín, con el cual se quiere representar el resumen de las estadísticas junto con la función de distribución de las series de precipitación tanto de las predicciones como de los valores histórico para todas las simulaciones y valores históricos de un respectivo mes.

Finalmente se presenta a modo resumen un mapa de calor para toda la Demarcación Hidrográfica con el cual se representa el porcentaje de acierto de las predicciones, es decir valores de CRPSS mayores a 0, tomando como referencia los valores de ERA5-Land.

4.2.1 *Precipitación*

La primera variable por estudiar es la de precipitación, presentando en primer lugar el análisis de la calidad de las predicciones brutas obtenidas del modelo ECMWF, previo a la corrección del sesgo, para tener a manera de referencia y poder determinar el mejor método de corrección en el caso que mejore el comportamiento de las correcciones corregidas dado el caso que se mejore el comportamiento de los datos en bruto.

4.2.1.1 Predicciones brutas

Para el caso de las predicciones brutas de la precipitación se presenta en la Figura 4-5 su comportamiento respecto al histórico, para una ejecución del modelo en enero a modo de ejemplo, en una celda de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, en donde se observan en azul los valores históricos de ERA5 Land, además de presentar como un diagrama de cajas y bigotes la distribución de los 51 miembros de las predicciones para cada día uno de los días del periodo de anticipación entre 0 y 45 en color rojo, presentando como un chinche los datos anómalos o outliers.

Se observa un gran número de valores extremos (fuera de los bigotes), especialmente en días en donde los datos observados indican que no llovió, pero varias predicciones indican valores altos de lluvia para la ejecución enseñada.

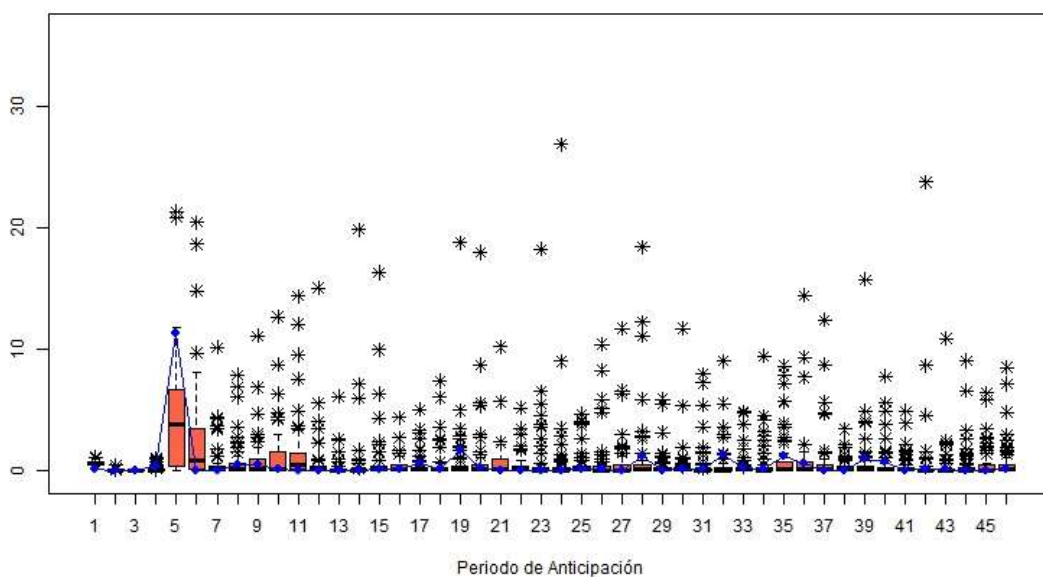


Figura 4-5 Predicciones de precipitación brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.

En la Figura 4-6 se presenta el diagrama de violín obtenido por la precipitación, en donde en color rojo se presenta la función de distribución de todo el conjunto de las predicciones para todas las ejecuciones del modelo de los meses de enero y en azul la función de distribución de los valores históricos también para el mes de enero.

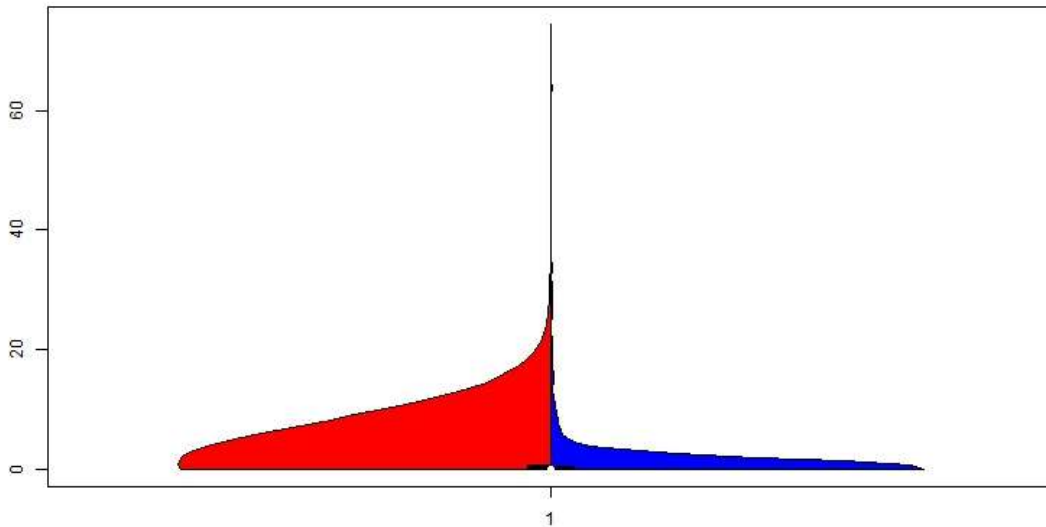


Figura 4-6 Diagrama de violín de predicciones precipitación brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

Finalmente se presenta en la Figura 4-7 el mapa de calor con el porcentaje de predicciones con calidad para las predicciones brutas del modelo ECMWF, para los periodos de anticipación agrupados por semana, para cada uno de los meses del año. En ellos se presenta con colores verdes (porcentajes mayores al 50%) las zonas de la Demarcación en donde las predicciones tienen calidad significativa, mientras que en colores rojos, porcentajes menores del 50%, se encuentran las zonas de la Demarcación en donde las predicciones no presentan calidad.

Es posible observar de manera general que, para periodos de anticipación cortos, entre 0 y 14 días, en todos los meses de ejecución y toda el área de la confederación se presenta calidad, mientras que, para los meses de enero, febrero, julio, agosto, septiembre y diciembre, para periodos mayores a 14 días, se encuentran zonas claramente marcadas en donde las predicciones no tienen calidad. Para los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y noviembre, se encuentran calidades altas de las predicciones en toda la demarcación o la mayoría de ella incluso para periodos de anticipación altos de 6 semanas.

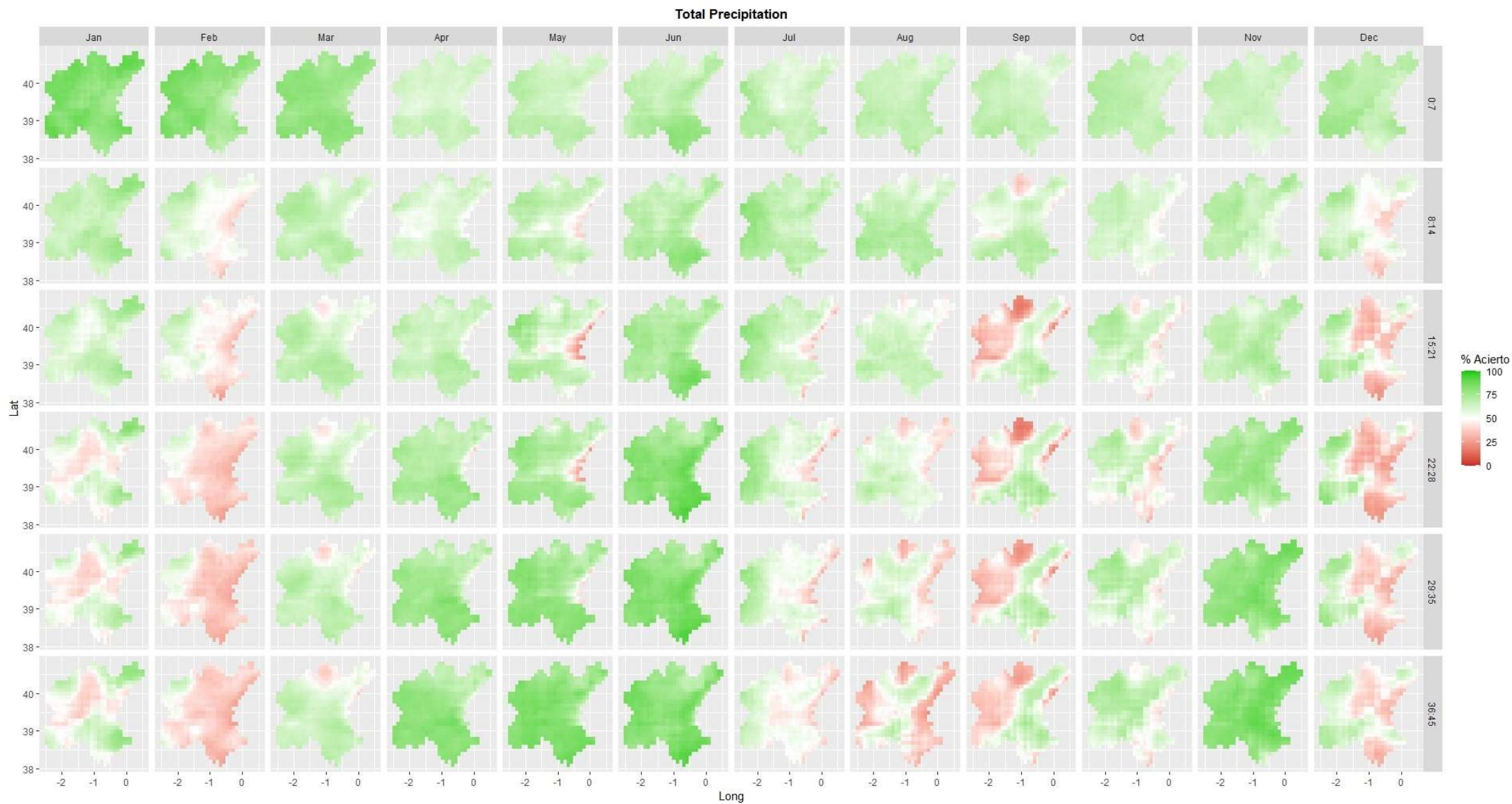


Figura 4-7 Porcentaje de predicciones de precipitación brutas con calidad.

4.2.1.2 Predicciones corregidas por mes

Siguiendo con el estudio de las predicciones de precipitación, se realiza la corrección del sesgo agrupando las predicciones por mes de ejecución del modelo del ECMWF, para desarrollar el algoritmo de quantile mapping sobre las funciones de distribución de cada mes. Es decir, para cada celda de ERA5 Land para cada mes, se corrige la función de distribución de las predicciones ajustándola a la observada.

Los resultados obtenidos para las predicciones corregidas se presentan en dos partes, en primer lugar en la Figura 4–8 muestra el comportamiento de estas predicciones para la misma ejecución del modelo presentada en la Figura 4–5 y la misma celda de la Demarcación Hidrográfica, en donde de igual manera se observan en azul los valores históricos de ERA5 Land, y un diagrama de cajas y bigotes con la distribución de los 51 miembros corregidos.

En este caso es posible observar el efecto que produce la corrección del sesgo realizada, de manera general la cantidad de datos anómalos se reduce para los 46 periodos de anticipación, debido a la reducción de los extremos de la distribución.

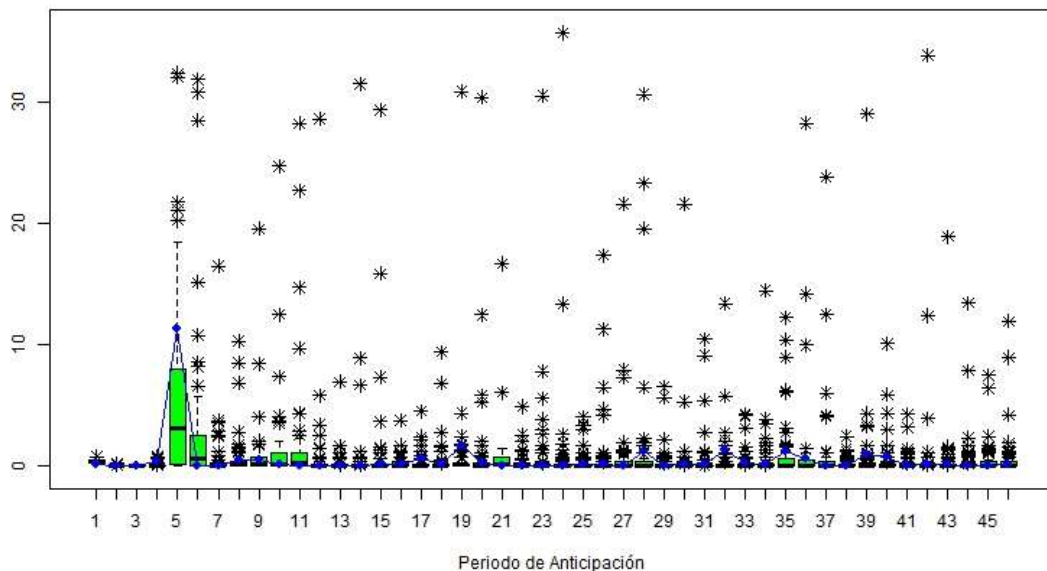


Figura 4-8 Predicciones de precipitación corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.

De igual manera en la Figura 4–9 se presenta el diagrama de violín para las predicciones ejecutadas en el mes de enero, ya corregidas, en donde se ob-

serva de mejor manera el ajuste sobre la función de distribución obtenido por el método de quantile mapping. En este caso se puede observar cómo al realizar la corrección del sesgo se ajustan de mejor manera los valores máximos de las simulaciones, que se reduce de un valor de más de 70 mm a uno de 65 mm.

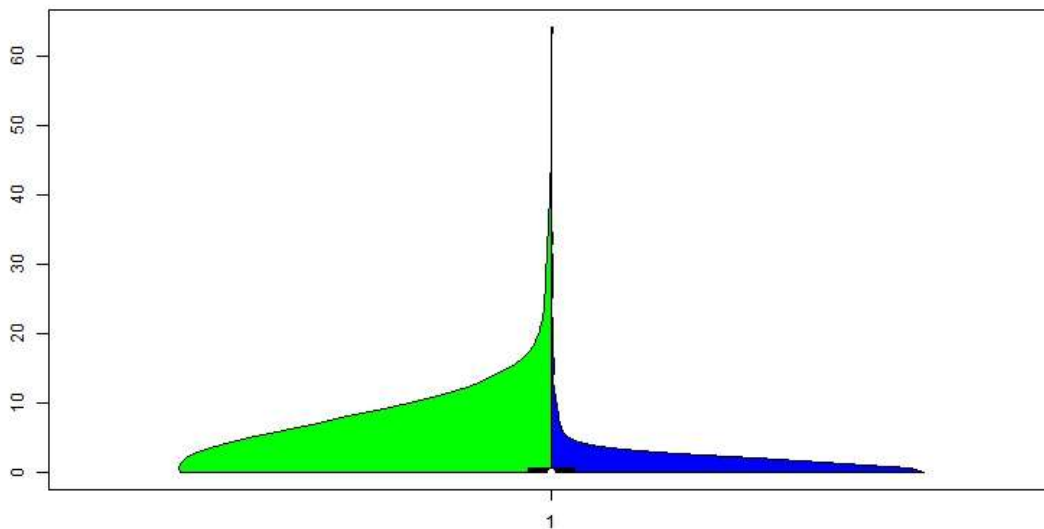


Figura 4-9 Diagrama de violín de predicciones de precipitación corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

En el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones corregidas realizadas por mes para los 11 meses restantes para la celda analizada, junto con sus diagramas de violín respectivos para cada mes.

Así mismo el mapa de calor de la Figura 4-10 se encuentra ilustrando el porcentaje de predicciones corregidas con calidad, agrupadas por semana, para todos los meses del año. Con colores verdes se encuentran porcentajes mayores al 50% con una calidad significativa, como es el caso de todos los periodos de anticipación en toda la Demarcación para los meses abril, mayo, junio y noviembre, mientras que para los otros meses se tiene alta calidad para los periodos cortos, menores a 2 semanas, a excepción de unas zonas para el mes de febrero. En colores rojos, zonas con baja calidad de predicción, se encuentran toda la Demarcación o la mayoría del área para febrero y julio en periodos mayores a 2 semanas, en agosto conforme incrementa el



periodo de anticipación se pierde calidad en las predicciones para toda la zona.

Para los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y noviembre, se encuentran calidades altas de las predicciones en toda la demarcación o la mayoría de ella incluso para periodos de anticipación altos de 6 semanas. La corrección del sesgo por este método hace que se pierda calidad en las simulaciones de febrero y julio, pero que se gane calidad en las de los meses de diciembre principalmente, mientras que en los otros meses no se presenta una mejora clara del comportamiento.

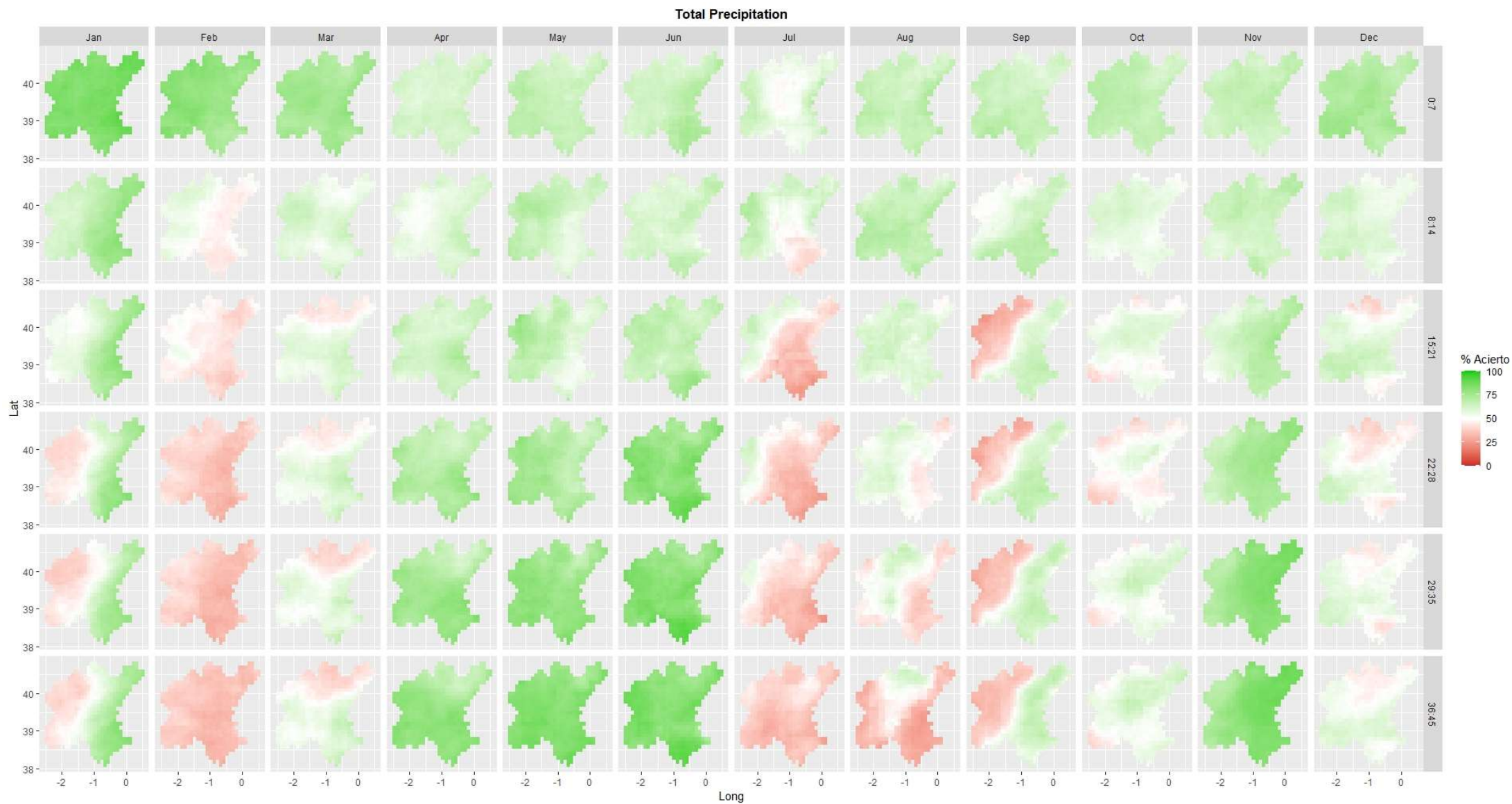


Figura 4-10 Porcentaje de predicciones de precipitación corregidas por mes con calidad.

4.2.1.3 Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

La última corrección de sesgo que se realiza para la precipitación es agrupando las predicciones por mes de ejecución del modelo matemático y periodo de anticipación, es decir, para la ejecución de la corrección con quantile mapping, la función de distribución que se corrige es la de las predicciones que cuentan con el mismo periodo de anticipación para todas las ejecuciones que se realizan en un mismo mes. Por ejemplo, se obtiene la función de distribución para cero días de periodo de anticipación para todas las 56 ejecuciones del modelo ECMWF y esta es la que se corrige con la función de distribución observada para cada celda.

El resultado de realizar el quantile mapping por medio de esta metodología de corrección se presenta en la Figura 4-11, donde se presenta por medio de un diagrama de cajas y bigotes la distribución de los 51 miembros corregidos para la misma ejecución del modelo presentada en las Figuras Figura 4-5 y Figura 4-8, con la referencia de los datos observados en color azul.

En este caso, con respecto a los dos anteriores, se observa que la cantidad de valores extremos se reduce de gran manera, en especial para periodos de anticipación a los 14 días, reduciendo de manera general los valores altos de la distribución, estando todos los valores más cerca entre sí y más aproximados a el valor registrado en ERA5 Land.

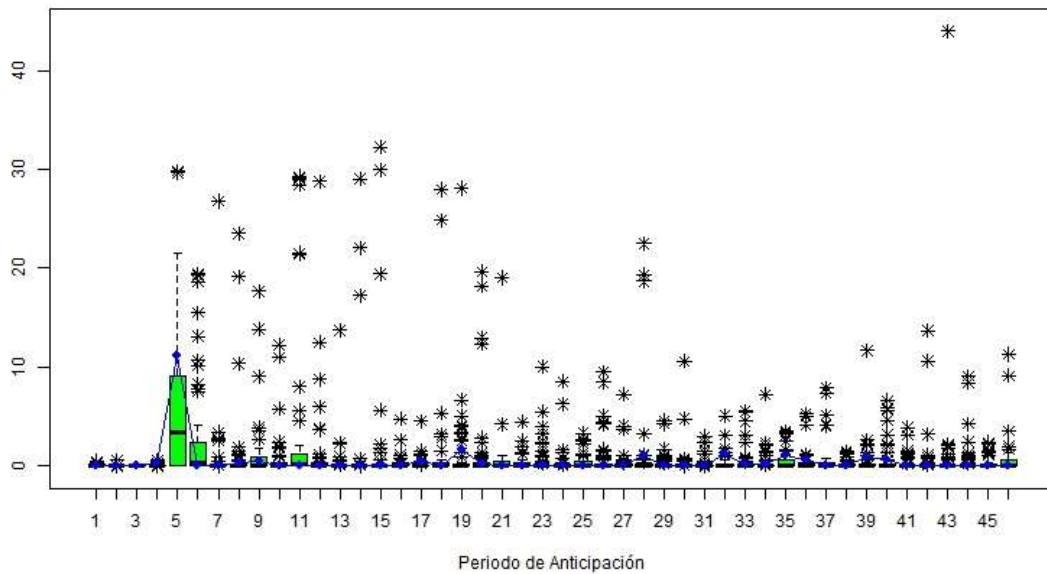


Figura 4-11 Predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.

Para apreciar de mejor manera el efecto de la corrección se presenta en la Figura 4-12 el diagrama de violín para el mes de enero, donde se aprecia un ajuste mejor. En este caso se puede observar como al realizar la corrección del sesgo se ajustan de mejor manera los valores máximos de las simulaciones, se reduce de un valor de más de 70 mm a uno de 65 mm

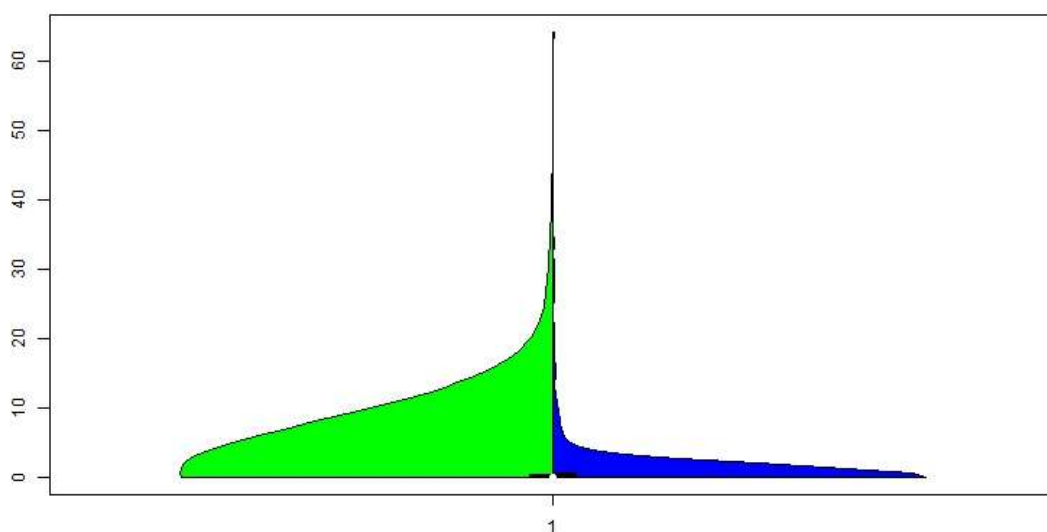


Figura 4-12 Diagrama de violín de predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

En el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones corregidas realizadas por mes y periodo de anticipación para los 11 meses restantes para la celda analizada, junto con sus diagramas de violín respectivos para cada mes.

Respecto a la calidad, se presenta el mapa de calor con el porcentaje de acierto de las predicciones en la Figura 4-13. En este caso se puede observar que para periodos de anticipación de hasta dos semanas, los pronósticos corregidos presentan un alto nivel de calidad para toda la demarcación. Para los meses de abril, mayo, junio y noviembre, la calidad se mantiene para los periodos más largos de hasta seis semanas.

Los meses de febrero, julio, septiembre y diciembre ven reducida su calidad conforme la anticipación se incrementa, aumentando las áreas con baja calidad con cada periodo de anticipación mayor.

Para el caso de agosto y octubre se presentan zonas con alta calidad en todos los periodos de anticipación, pero zonas marcadas con pérdida de calidad, en agosto para periodos intermedios de anticipación recuperando calidad hacia la quinta semana, y en octubre perdiendo calidad en la zona baja de la demarcación conforme incrementa el periodo.

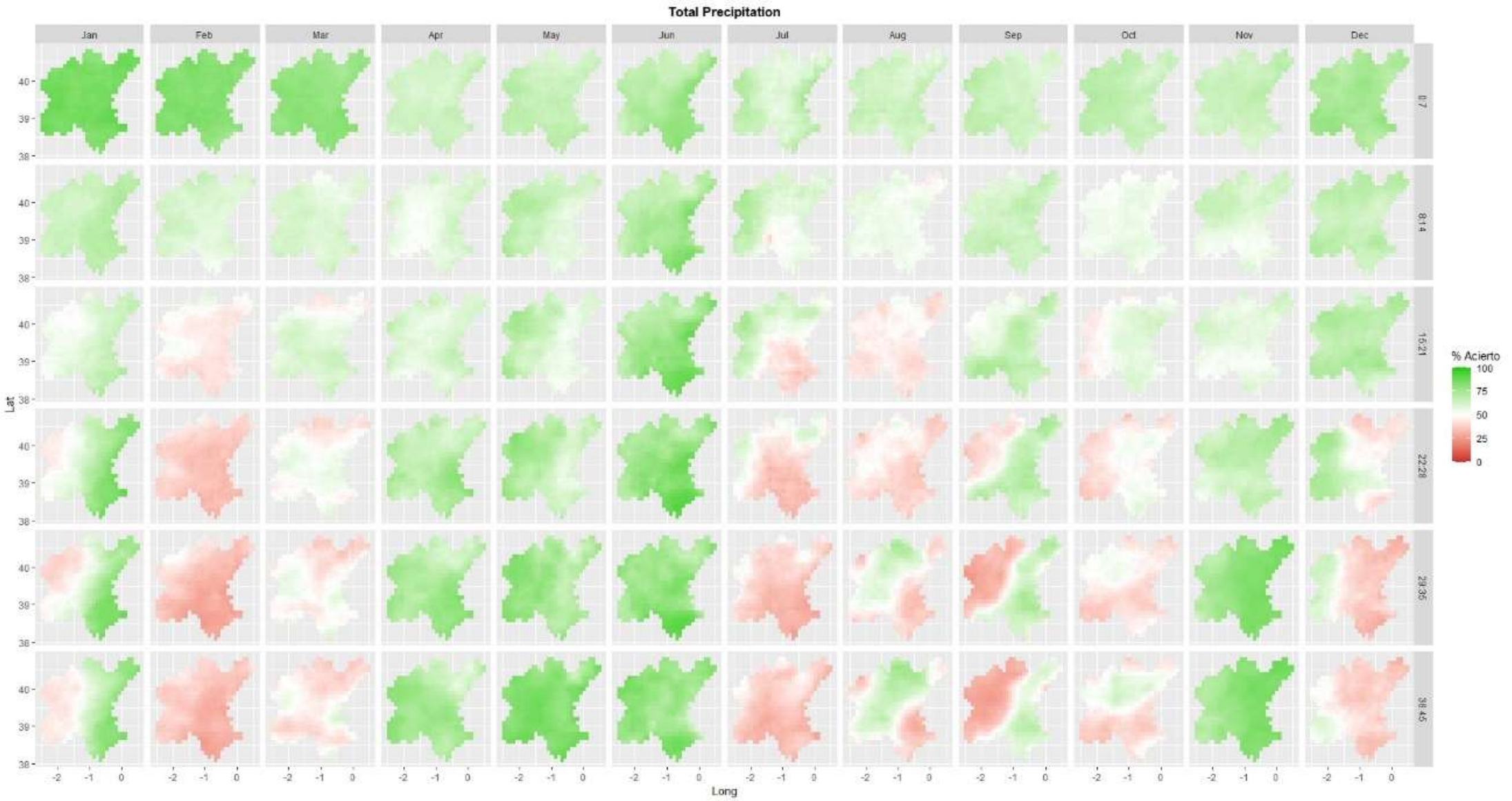


Figura 4-13 Porcentaje de predicciones de precipitación corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.

Una vez analizadas las predicciones brutas y las dos correcciones ejecutadas, se seleccionan las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación para ejecutar el modelo de TETIS, al presentar estas un mejor comportamiento general con una mayor calidad respecto a las otras dos, con excepción de los meses de febrero y julio para periodos mayores a las dos semanas.

4.2.2 Temperatura Media

Siguiendo la estructura que se utilizó en el caso de la precipitación, en primer lugar se presenta el análisis de las predicciones brutas sin corrección del sesgo obtenidas directamente del modelo ECMWF, seguido de los resultados de la corrección por mes y por mes y periodo de anticipación.

4.2.2.1 Predicciones brutas

Las predicciones brutas para la temperatura media tienen un comportamiento que se presenta en la Figura 4-14, comparando, para una simulación realizada en el mes de enero, la distribución de los 51 miembros de las predicciones representada por medio de un diagrama de cajas y bigotes en color rojo, con los valores históricos presentados con la línea de color azul.

En este caso se observa que para la simulación presentada la mayoría de los valores anómalos, que se alejan de los históricos, se encuentran con valores por debajo de los observados, junto con un sesgo de una subrepresentación general de la temperatura, al estar la mayoría de las veces la media de las predicciones por debajo de la línea de valores de ERA5 Land.

Adicionalmente se muestra claramente que conforme se incrementa el periodo de anticipación, es decir se alejan las predicciones del día de ejecución del modelo, más amplia es la distribución del conjunto de las predicciones al perder la influencia de las condiciones iniciales e ir acercándose a fenómenos de mayor influencia meteorológica como predictores.

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones independientemente del mes de ejecución, en el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura media sin corregir para los 11 meses restantes.

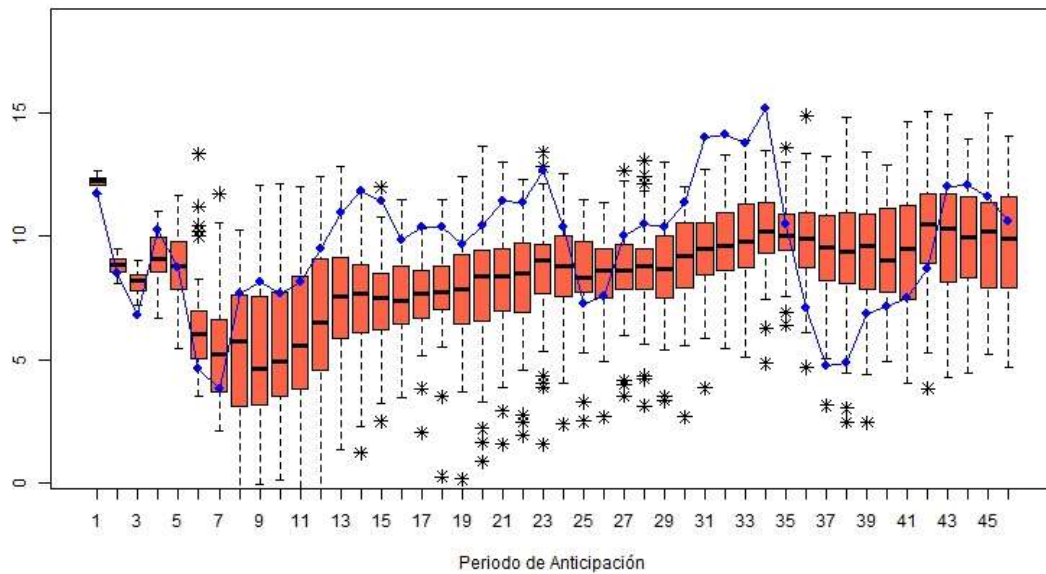


Figura 4-14 Predicciones de temperatura media brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.

De igual manera, este sesgo de subrepresentación de la temperatura media se puede observar en la Figura 4-15 con el diagrama de violín presentado para las simulaciones y observaciones de todos los meses de enero del periodo de estudio, en donde la mediana de la función de distribución de las predicciones se encuentra por debajo de la mediana de los valores históricos y se presenta una cola de temperaturas más bajas que las encontradas en los históricos.

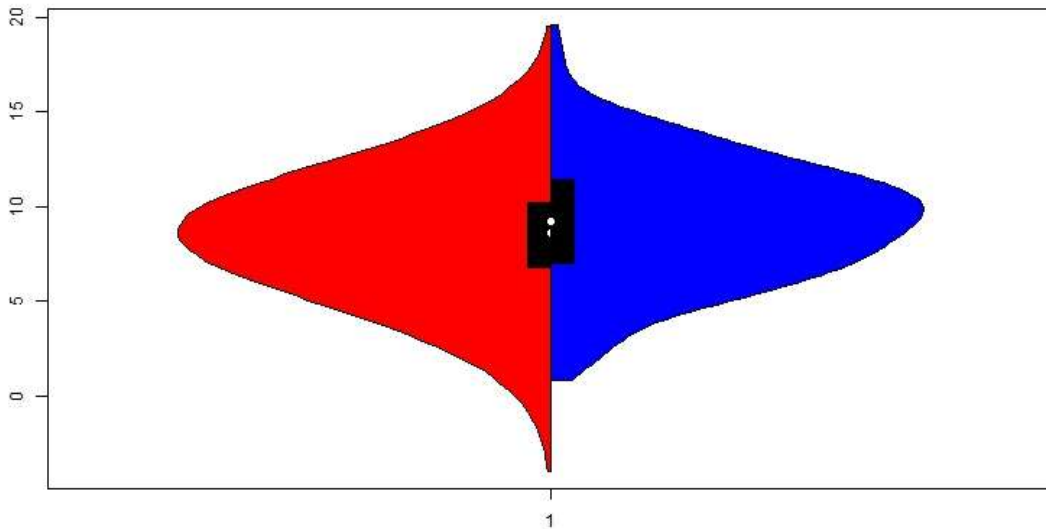


Figura 4-15 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

Respecto al análisis de calidad, se puede observar en la Figura 4-16 por medio del mapa de calor para toda la Demarcación que, a pesar del sesgo general de subestimación de la temperatura, las predicciones presentan un muy buen comportamiento para toda el área de estudio y todos los periodos de anticipación, incluso obteniendo los valores más altos a las seis semanas. Así mismo, se observa la presencia de unas zonas claramente marcadas hacia la costa de la Comunidad Valenciana, en donde en todos los casos las calidades se reducen respecto al resto de la demarcación, pudiendo ser incluso de mala calidad en los meses de enero, febrero, marzo, julio, noviembre y diciembre para todos los periodos de anticipación.

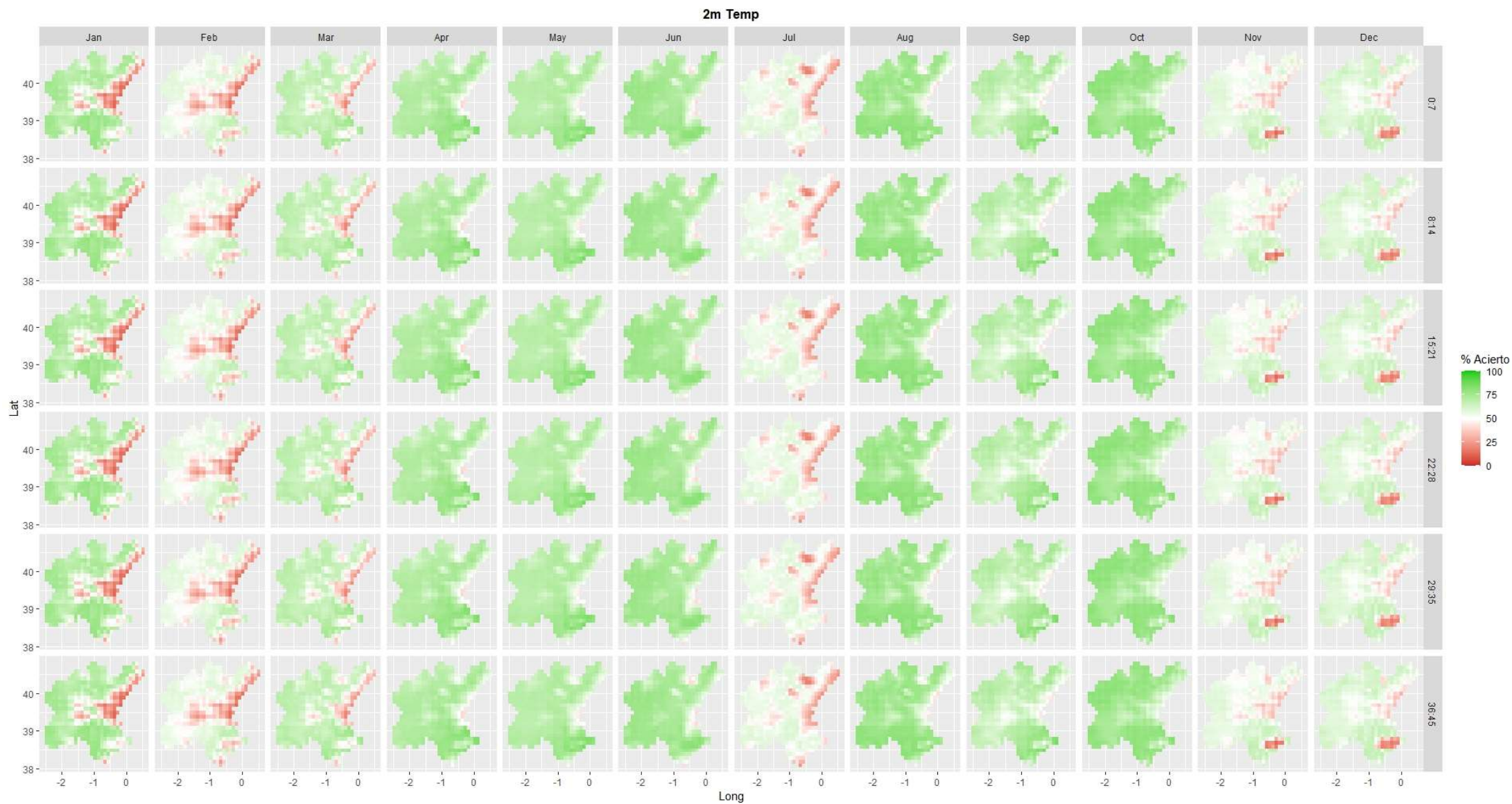


Figura 4-16 Porcentaje de predicciones de temperatura media brutas con calidad.

4.2.2.2 Predicciones corregidas por mes

En el caso de las predicciones de temperatura mínima corregidas por medio de la agrupación de simulaciones tomando como referencia el mes de ejecución, se presenta en primer lugar en la Figura 4-17 las predicciones corregidas con un diagrama de cajas y bigotes en color verde, y los valores históricos en azul, para la misma celda y simulación de la presentada en la Figura 4-14.

Para el caso de las predicciones corregidas, se logra observar un desplazamiento de las funciones hacia arriba, acercándose los valores mínimos de las predicciones a los observados, y con una tendencia de la mediana de las predicciones más certera respecto al valor observado en azul, corrigiendo de esta manera una parte del sesgo de subestimación de la temperatura que tenían las predicciones brutas.

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones corregidas por mes independientemente del mes de ejecución, en el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura media con el sesgo corregido para los 11 meses restantes.

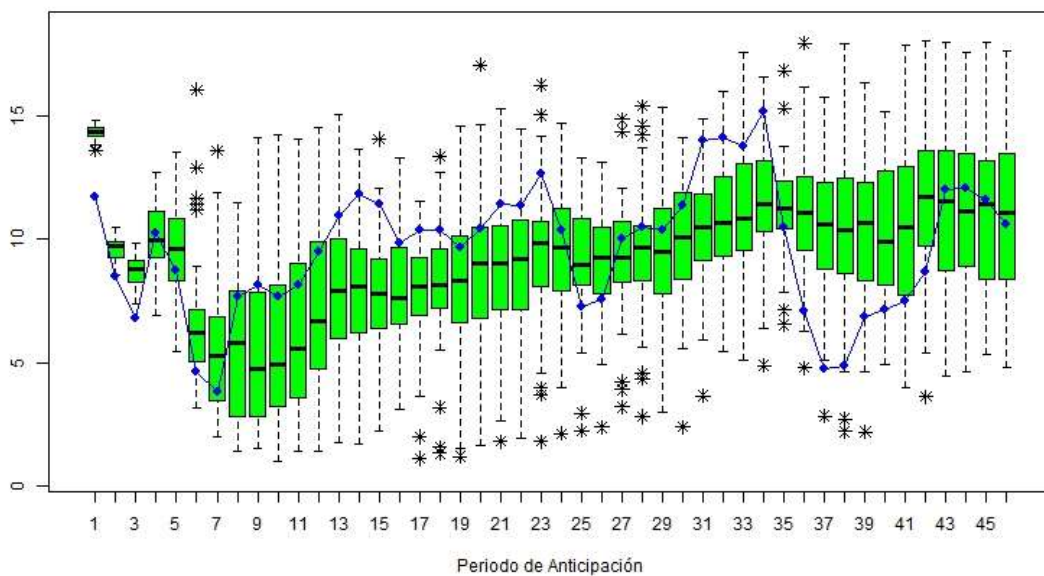


Figura 4-17 Predicciones de temperatura media corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.

Por medio del diagrama de violín que se presenta en la Figura 4-18 se observa la reducción del sesgo de las predicciones, en este caso la mediana de la función de distribución de las observaciones y las predicciones coincide plenamente, así como los valores mínimos y máximos de las mismas.

Adicionalmente, se muestra que la forma de la distribución de densidad de probabilidad de los pronósticos corregidos tiene una forma mucho más aproximada a la de los valores del ERA5 Land para la respectiva celda, con una mayor probabilidad de que los datos se encuentren entre los 5°C y los 15°C tanto en las predicciones como en los valores observados.

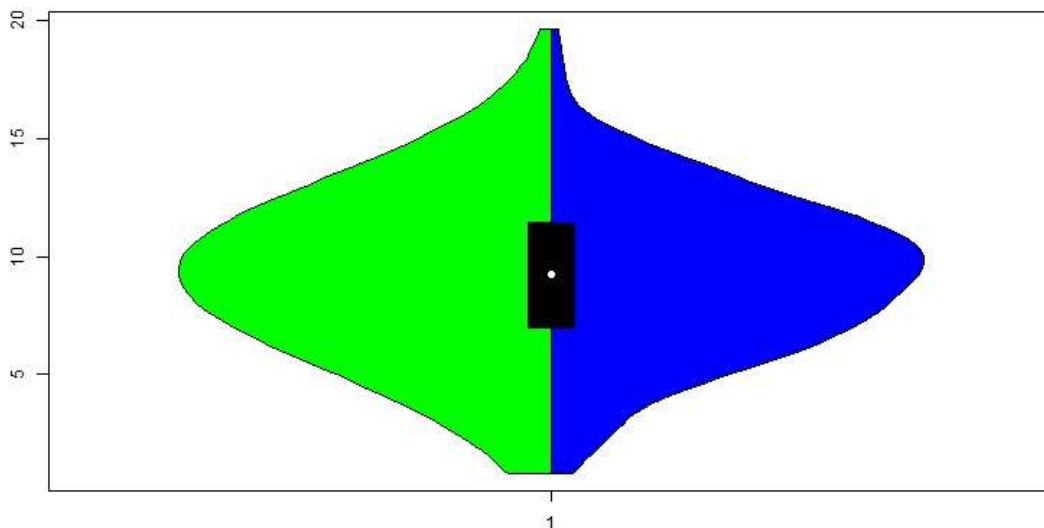


Figura 4-18 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

Con el análisis de calidad representado por medio de los mapas de calor que se encuentran en la Figura 4-19 se observa una clara mejora respecto a las predicciones brutas, con valores con alta proporción de predicciones de calidad en todos los meses y periodos de anticipación, con la excepción del mes de julio, en donde si bien la calidad no es alta, al menos un 50% de las predicciones presentan calidad en toda la demarcación, una mejora respecto a las predicciones brutas. Los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y



diciembre presentan calidades mayores al 50% en las zonas donde las predicciones brutas daban malas calidades de predicción, es decir valores menores al 50%.

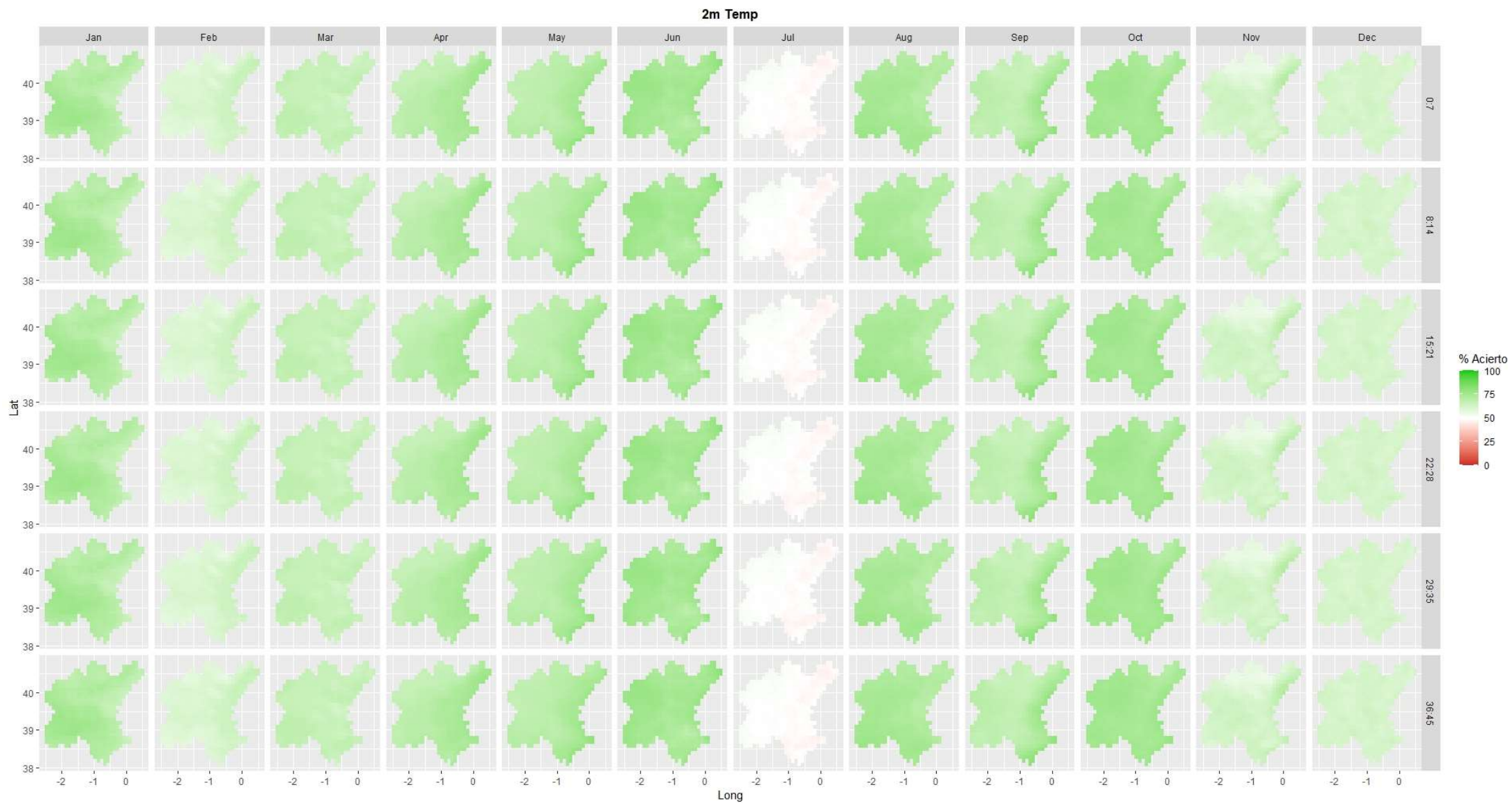


Figura 4-19 Porcentaje de predicciones de temperatura media corregidas por mes con calidad.

4.2.2.3 Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

Por último, para la corrección de sesgo realizada agrupando las predicciones por mes y periodo de anticipación, se presenta en la Figura 4-20 el resultado de esta corrección por medio de un diagrama de cajas y bigotes, para la misma ejecución presentada en las Figuras Figura 4-14 y Figura 4-17, tomando como referencia los valores observados en color azul, y las predicciones en color verde.

Como es posible observar, con esta corrección del sesgo la serie de predicciones reduce aún más la cantidad de datos anómalos. Los datos convergen más entre los caminos de las simulaciones, acotando más los valores máximos y mínimos que se presentan para cada día acercándose la mayoría de las perturbaciones a los valores reales. Adicionalmente, la línea de tendencia que marca la mediana de cada conjunto de simulaciones diarias se encuentra aproxima más a los valores observados, mejorando en principio el comportamiento de las predicciones respecto a los dos conjuntos presentados anteriormente.

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación independientemente del mes de ejecución. En el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura media con la corrección realizada por mes y periodo de anticipación para los 11 meses restantes.

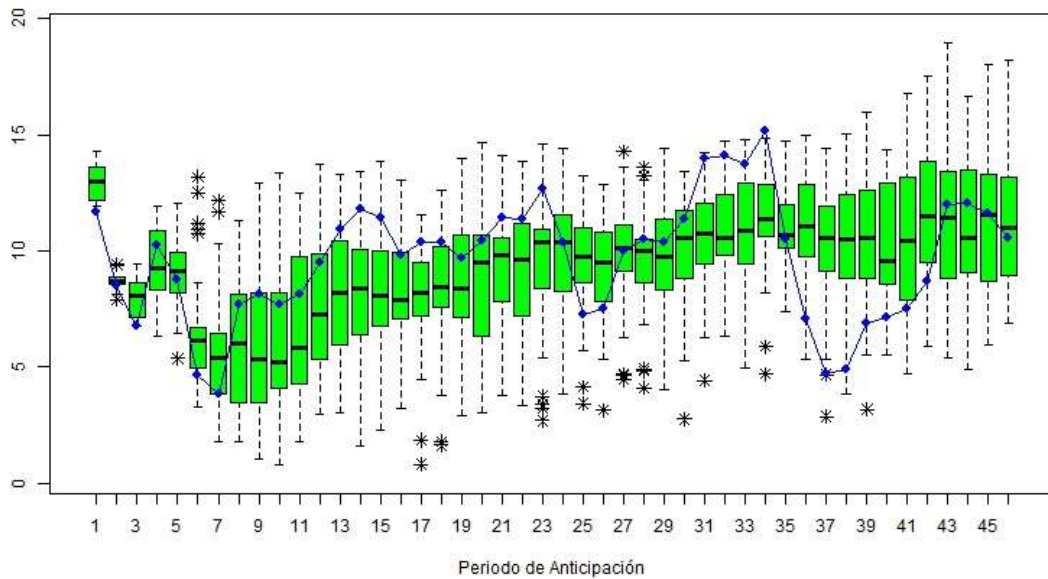


Figura 4-20 Predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.

De la misma manera se presenta el diagrama de violín obtenido para la corrección por mes y periodo de anticipación, en donde, la mediana y el rango intercuartílico se reducen respecto al observado, pero las colas de ambas distribuciones y los valores máximos y mínimos se acotan. Respecto a la forma de la distribución de los pronósticos, se observa que la mayor probabilidad de ocurrencia de los mismos se encuentra claramente acotada entre los valores de 5° y 15° C para la celda de ERA5 Land analizada. El diagrama de violín obtenido para las simulaciones del mes de enero se presenta en la Figura 4-21.

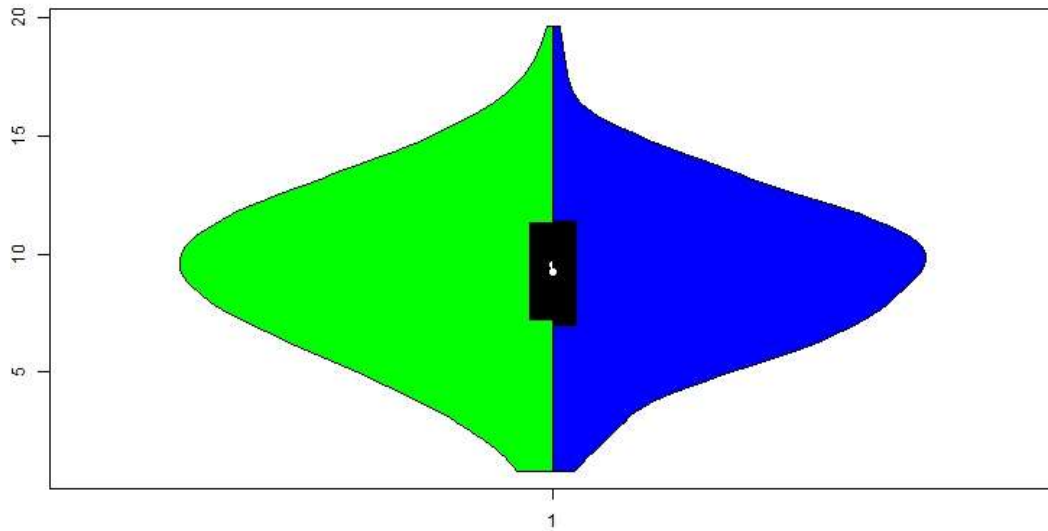


Figura 4-21 Diagrama de violín de predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

Al igual que en el Anexo II se encuentran los diagramas de cajas y bigotes para los 11 meses restantes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

El análisis de calidad presentado en la en la Figura 4-22 se observa que existe una mejora respecto a los dos casos analizados anteriormente, todos los periodos de anticipación para todos los meses del año presentan tonos verdes, lo que indica una calidad alta, mayor al 50%, incluso para el mes de julio el más crítico al tener una peor calidad inicial. En todos los casos se presenta calidad en las zonas identificadas anteriormente (hacia la costa de la Comunidad Valenciana) que presentaban una baja calidad.

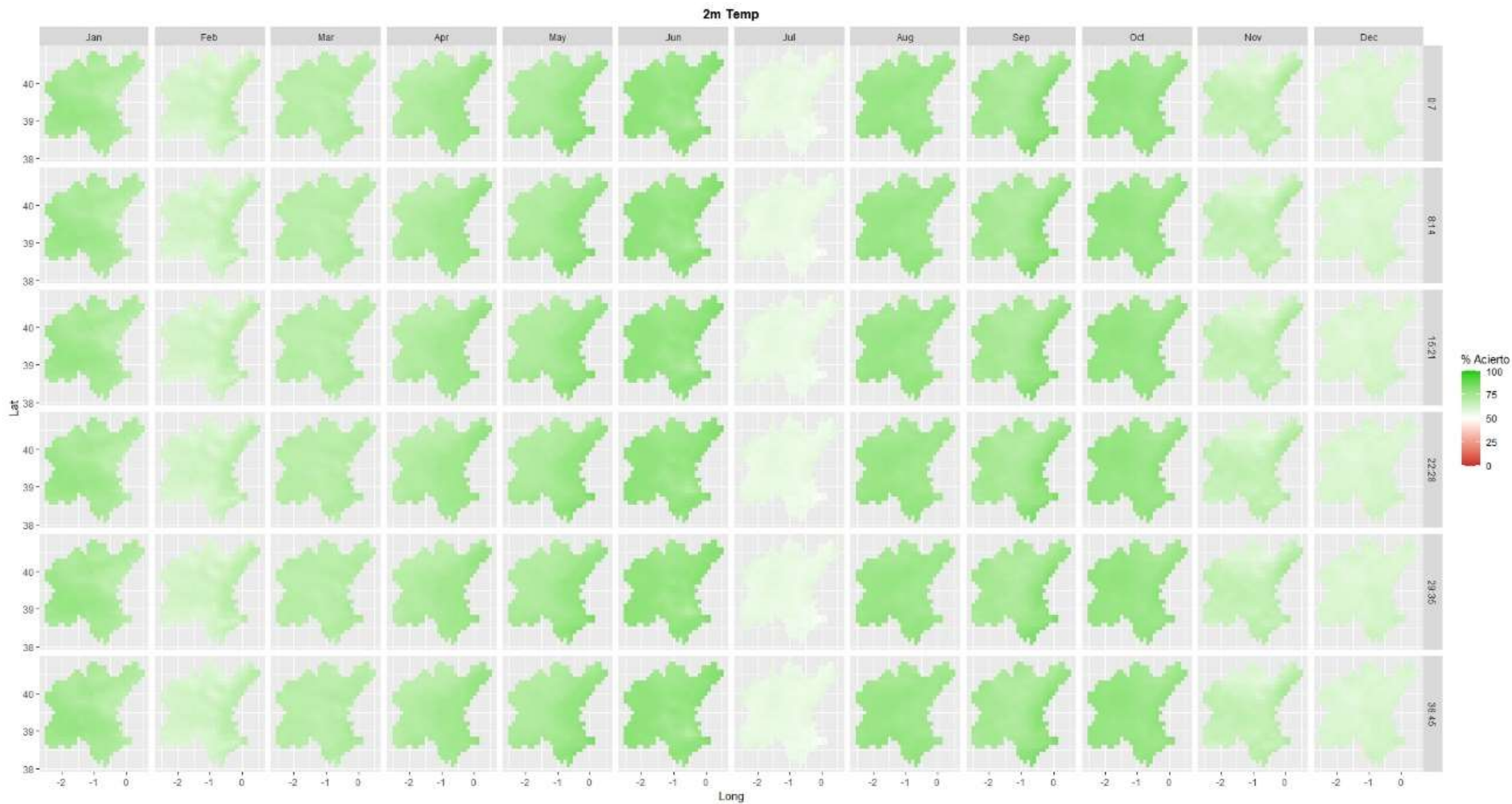


Figura 4-22 Porcentaje de predicciones de temperatura media corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.

Una vez analizadas las predicciones brutas y las predicciones con ambos métodos de correcciones ejecutados, se seleccionan las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación para realizar la obtención de las predicciones hidrológicas con el modelo de TETIS, al presentar una mayor calidad en todos los meses y periodos de anticipación, ganando bastante calidad en meses y zonas donde el caso inicial no presentaban buenos datos.

4.2.3 Temperatura Mínima

La tercera variable meteorológica requerida para la obtención de las predicciones hidrológicas es la temperatura mínima. Al igual que con la temperatura media y la precipitación, se sigue la misma estructura, presentando primero el análisis de las predicciones sin corregir, continuado de las dos correcciones propuestas.

4.2.3.1 Predicciones brutas

Con la temperatura mínima para las predicciones brutas se observa un comportamiento similar al encontrado en las temperaturas medias, como se presenta en la Figura 4-23 para una simulación realizada en el mes de enero con un diagrama de cajas y bigotes en color rojo representando las predicciones y en azul los valores observados.

La distribución de las 51 perturbaciones que se tienen para cada uno de los días presenta su mayor número de valores extremos en valores inferiores a los históricos, pudiendo subestimar las temperaturas más bajas, además de presentar una mayor variabilidad conforme se incrementa el periodo de anticipación, como es de esperarse al perder la influencia de las condiciones atmosféricas iniciales.

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones brutas independientemente del mes de ejecución, como se presenta en el Anexo II, donde se encuentran los diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura mínima sin corregir para los 11 meses restantes.

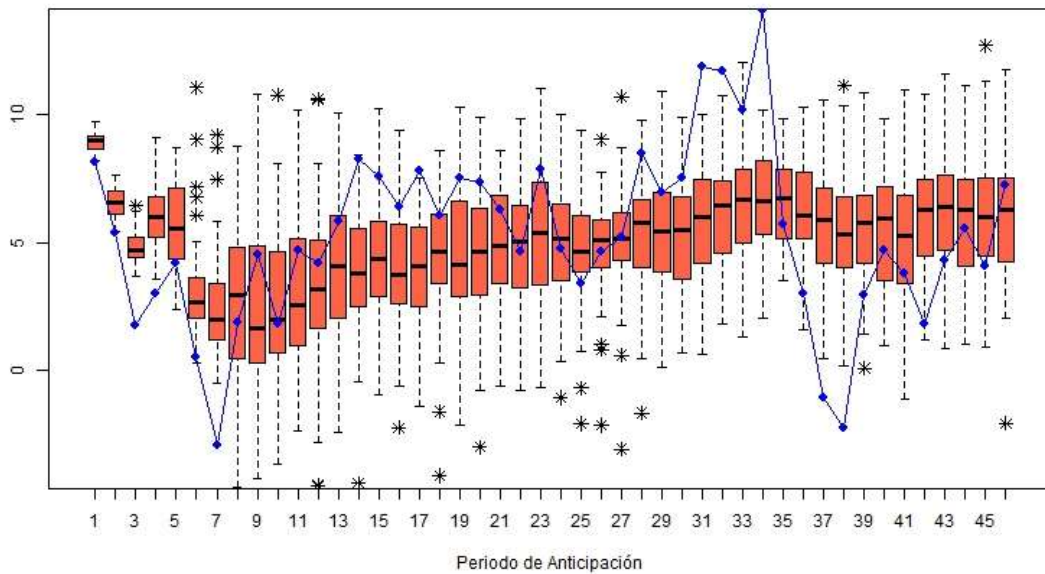


Figura 4-23 Predicciones de temperatura mínima brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.

El sesgo intrínseco que incorporan las predicciones se puede observar de mejor manera por medio del diagrama de violín presentado en la Figura 4-24, en donde las colas de la distribución de las predicciones exageran los valores mínimos y máximos que se miden con ERA5-Land.

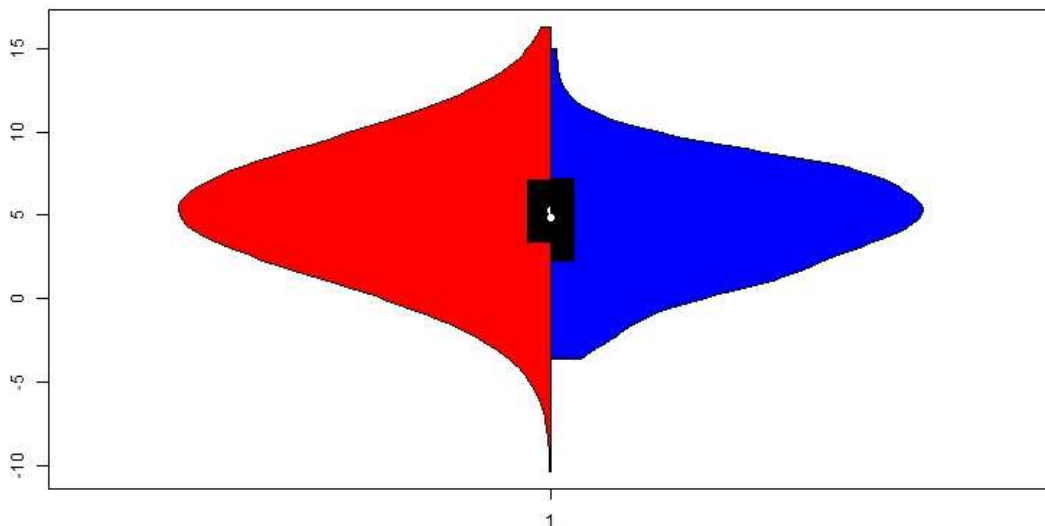


Figura 4-24 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.



De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

Con el análisis de calidad presentado en la Figura 4-25 se observa que los pronósticos tienen alta calidad en toda la demarcación solamente para los periodos mayores de 3 semanas en los meses de abril, mayo, junio, agosto, septiembre y octubre, con excepción de un reducido número de celdas; para los periodos de anticipación menores. Existen una gran mayoría zonas donde la calidad proporcionado por las predicciones es baja, mientras que para los meses de febrero y julio se puede asumir que en ningún caso las predicciones aportan valor al presentan valores menores al 50% en prácticamente la mayoría de la zona de estudio

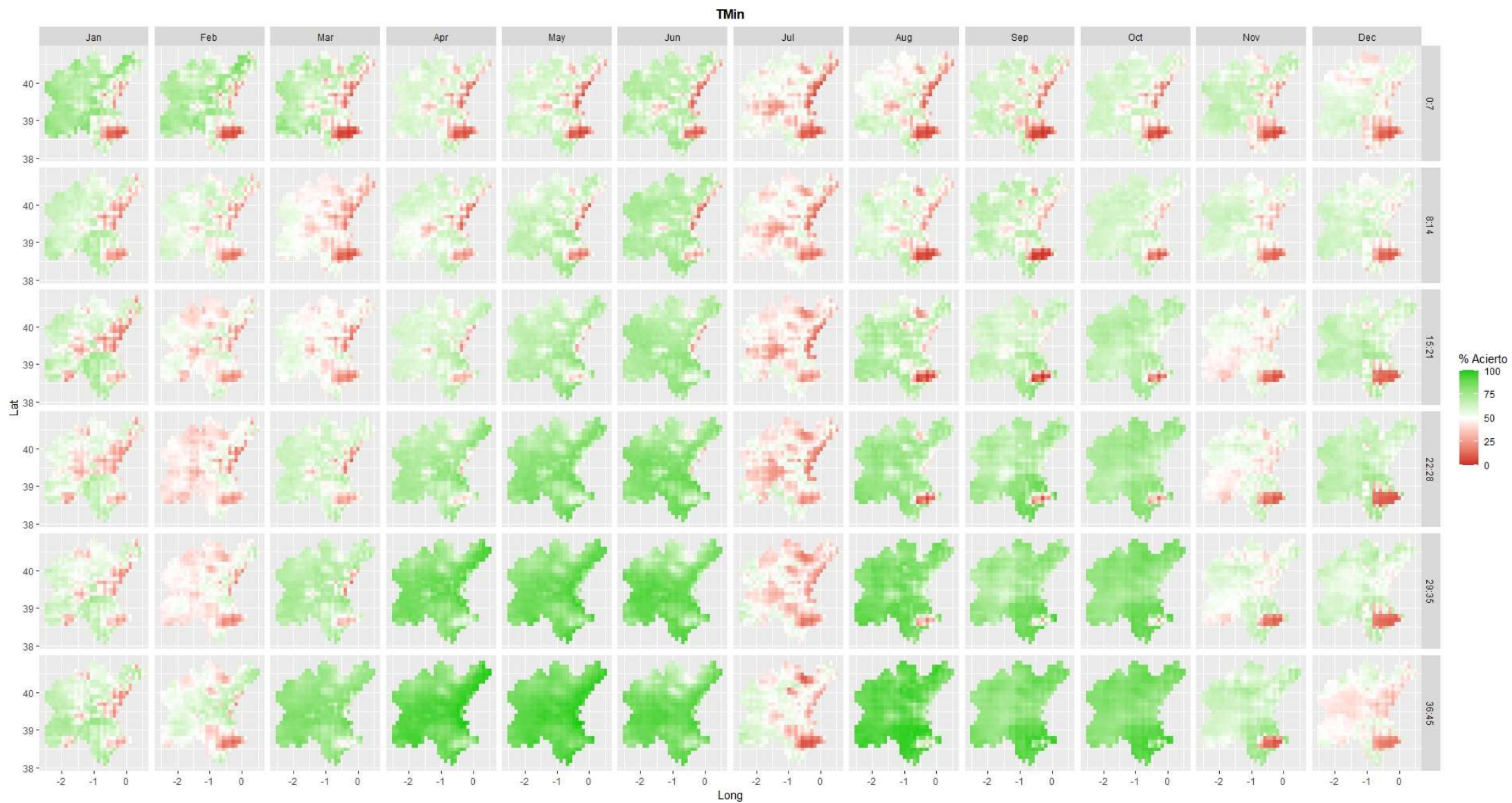


Figura 4-25 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes con calidad.

4.2.3.2 Predicciones corregidas por mes

La distribución diaria de las predicciones abarca casi completamente los valores históricos como se observa en la Figura 4-26. Los valores mínimos y máximos de cada día se limitan, se acercan más a la distribución general y la mediana se aproxima más a los valores históricos.

De igual manera, el rango de las perturbaciones para cada día se reduce y con ello el número de datos anómalos que se presentan, corrigiendo una parte del sesgo con el que cuentan los datos brutos.

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones ya corregidas con independencia del mes de ejecución, en el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones para los 11 meses restantes.

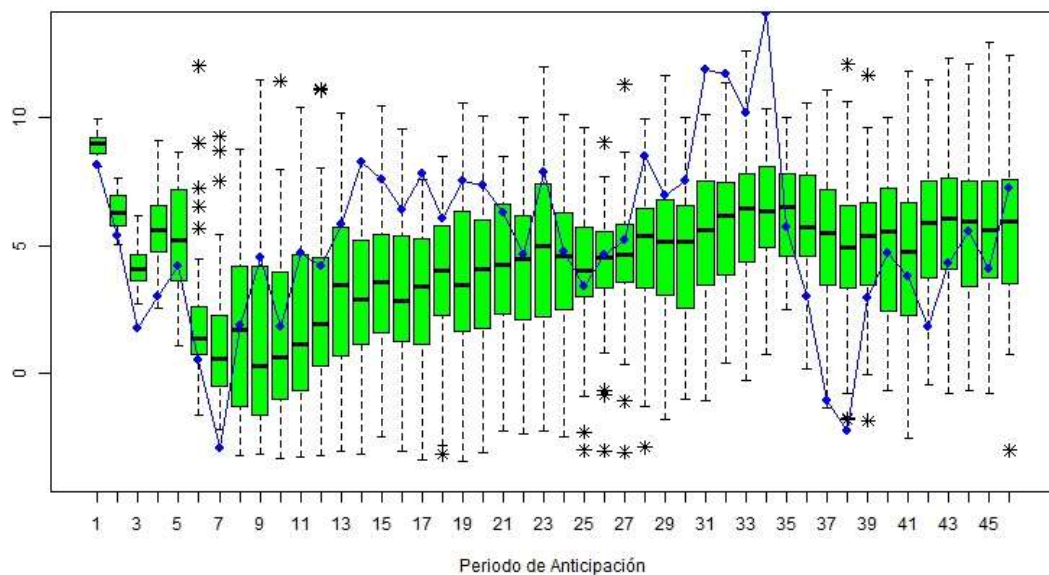


Figura 4-26 Predicciones de temperatura mínima corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.

Con el diagrama de violín para las predicciones corregidas para el mes de enero que se presenta en la Figura 4-27 se observa de mejor manera como la corrección del sesgo permite reducir la amplitud de valores de las predicciones, ajustando los valores mínimos y máximos de la distribución original a los de la función de distribución empírica observada. De igual manera con este proceso se ajusta la mediana y el rango intercuartílico de las prediccio-

nes al observado, aumentando la probabilidad de los valores medios de temperatura.

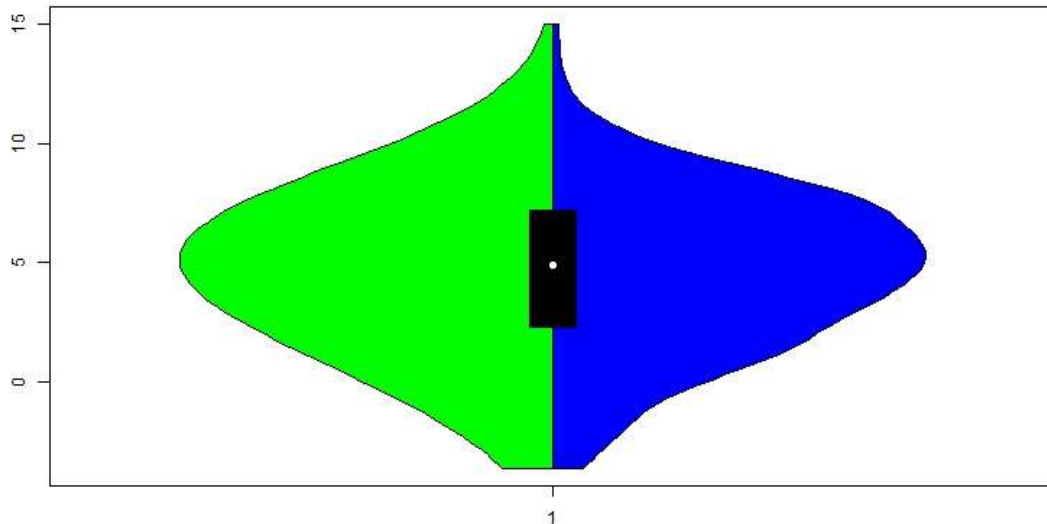


Figura 4-27 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

La corrección del sesgo realizada ha permitido incrementar la calidad de las predicciones en todos los meses para todos los periodos de anticipación y toda el área de estudio, como muestra la Figura 4-28. Todos los meses con la predicción corregida por mes suavizan el comportamiento de las zonas con baja calidad incrementándola, alcanzando en algunos casos porcentajes mayores al 50%. El caso más claro se presenta en el mes de julio, donde ahora al tener el sesgo corregido las zonas que tenían porcentajes de acierto de incluso 0, han aumentado el acierto, a pesar de no alcanzar calidades altas. En este caso. al igual que en el análisis de las predicciones brutas, los periodos de anticipación mayores a 3 semanas para los meses de marzo, abril, mayo, junio, agosto, septiembre y octubre presentan un mayor porcentaje de acierto que periodos cortos, pero todos con una alta calidad.

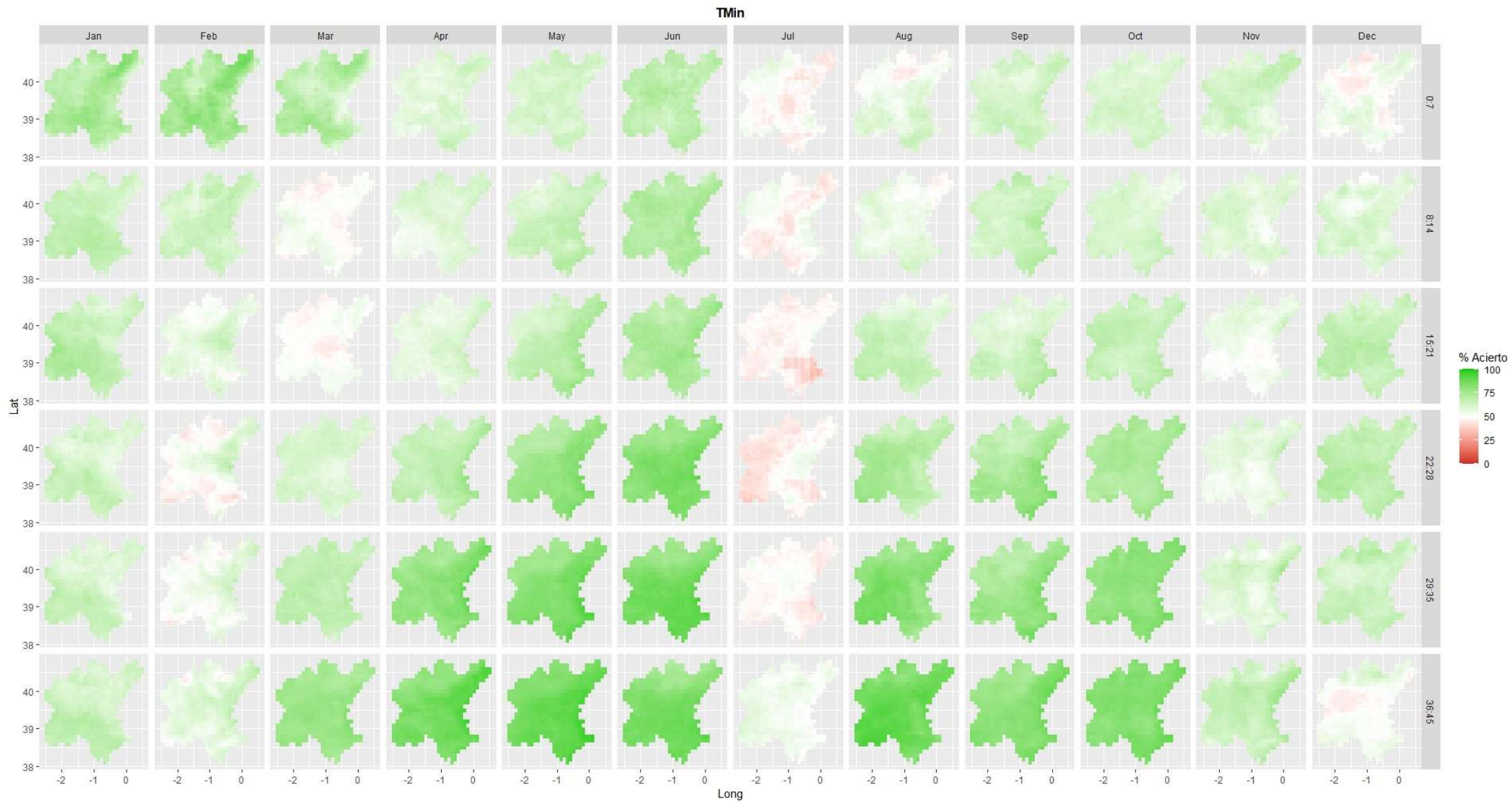


Figura 4-28 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes con calidad.

4.2.3.3 Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

El comportamiento de las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación se presenta en la Figura 4-29, para la misma simulación de enero de las Figuras Figura 4-23 y Figura 4-26, donde para el presente caso la distribución de las predicciones se ajusta de mejor manera a los valores históricos. La amplitud de los valores predichos se reduce con respecto a los casos anteriores incluso en periodos de anticipación altos.

El ajuste se presenta de manera general para todas las predicciones independientemente del mes de ejecución, en el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación para los 11 meses restantes.

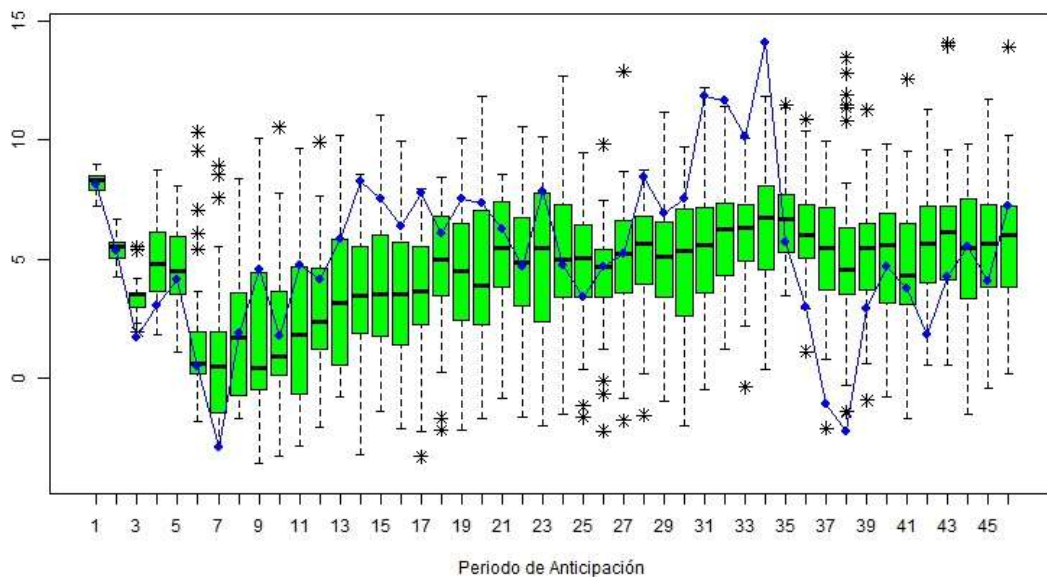


Figura 4-29 Predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.

De igual manera, en la Figura 4-30 se presenta el diagrama de violín del mes de enero para las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación, en donde se observa un mejor ajuste de la campana de la distribución de los valores predichos, los valores mínimos y máximos de las predicciones se ajustan a los observados, además de presentar la mayor probabilidad de los valores acotados entre 0°C y 10°C.

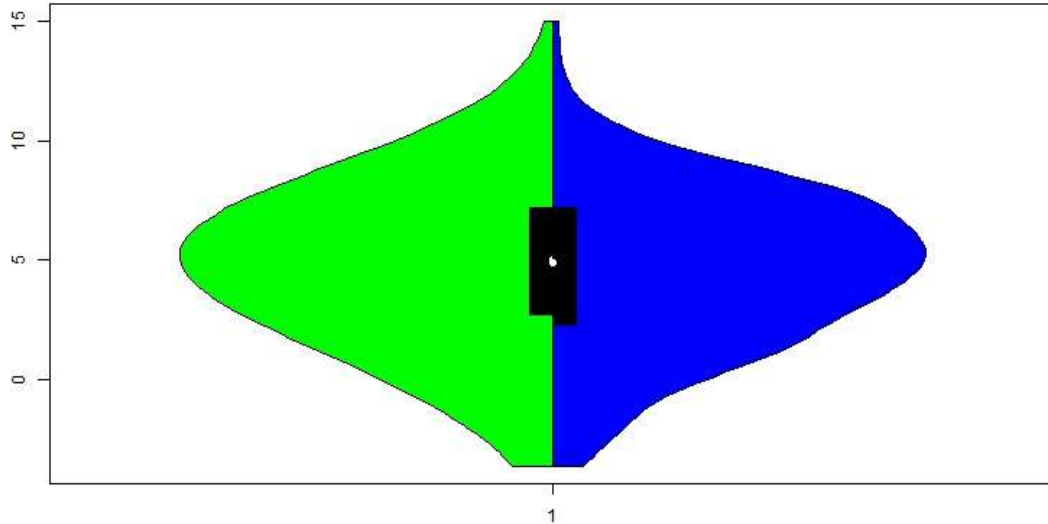


Figura 4-30 Diagrama de violín de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

En la Figura 4-31 se presentan los resultados del análisis de calidad, en donde se representa el porcentaje de calidad (CRPSS con valores mayores a 0) de las predicciones. Como es de esperar, al realizar este tipo de corrección de sesgo se incrementa la calidad para toda la Demarcación Hidrográfica en todos los meses y para todos los periodos de anticipación, logrando porcentajes de acierto mínimo del 50% en zonas de la Demarcación donde anteriormente la calidad era baja. El mes de julio presenta el más claro ejemplo de este aumento de la calidad donde respecto a los casos anteriores el incremento es bastante importante.

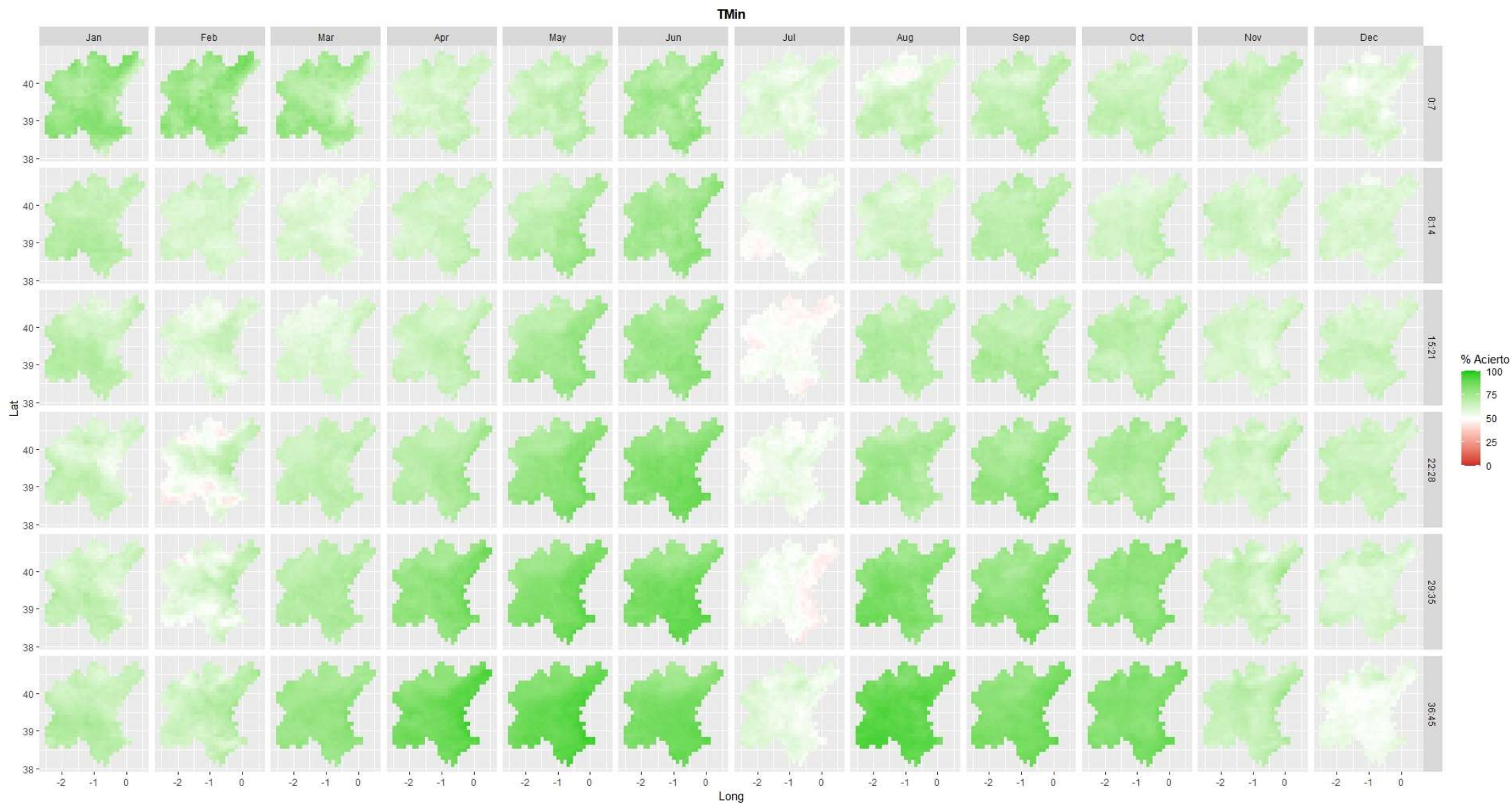


Figura 4-31 Porcentaje de predicciones de temperatura mínima corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.

Con los resultados obtenidos del análisis de las predicciones tanto brutas como corregidas, se han seleccionado las predicciones con la corrección por mes y periodo de anticipación para poder realizar la obtención de las predicciones hidrológicas por medio de TETIS, gracias a que estas predicciones son las que un mayor porcentaje de calidad presentan.

4.2.4 Temperatura Máxima

La cuarta y última variable analizada y requerida para realizar la obtención de las predicciones hidrológicas es la temperatura máxima. Para la presentación de resultados de esta variable se sigue la misma estructura que para las anteriores.

4.2.4.1 Predicciones brutas

En la Figura 4-32 se presenta el comportamiento de las predicciones brutas respecto al histórico en una ejecución del modelo ECMWF para el mes de enero, para una celda. En el gráfico se puede observar una clara tendencia de subestimación de las temperaturas por parte de las predicciones de manera general, con la mayoría de los datos anómalos representando temperaturas menores a las observadas. La distribución de las predicciones en este caso no es más amplia conforme aumenta el periodo de anticipación, parece mantener un rango relativamente constante para todos.

Este comportamiento de subestimación de la temperatura máxima se presenta de manera general para todas las predicciones independientemente del mes de ejecución. En el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para predicciones sin corregir para los 11 meses restantes.

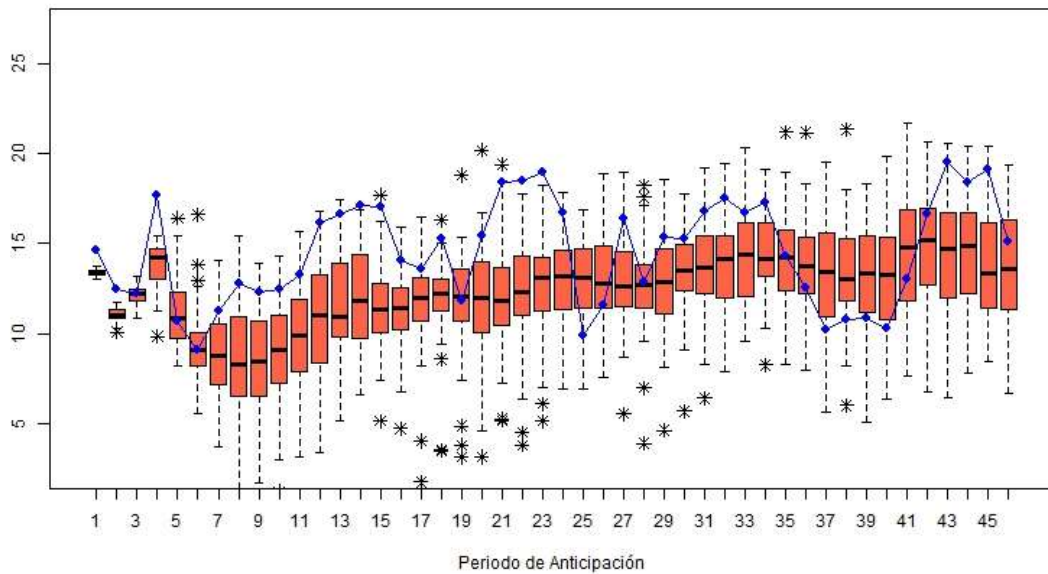


Figura 4-32 Predicciones de temperatura máxima brutas para una ejecución del modelo en el mes de enero.

Con el diagrama de violín que se presenta en la Figura 4-33 se confirma el sesgo que traen las predicciones de temperatura máxima. La distribución de las predicciones está desplazada hacia temperaturas inferiores a las históricas, por lo que para las mismas probabilidades se obtienen valores inferiores no representativos de la realidad

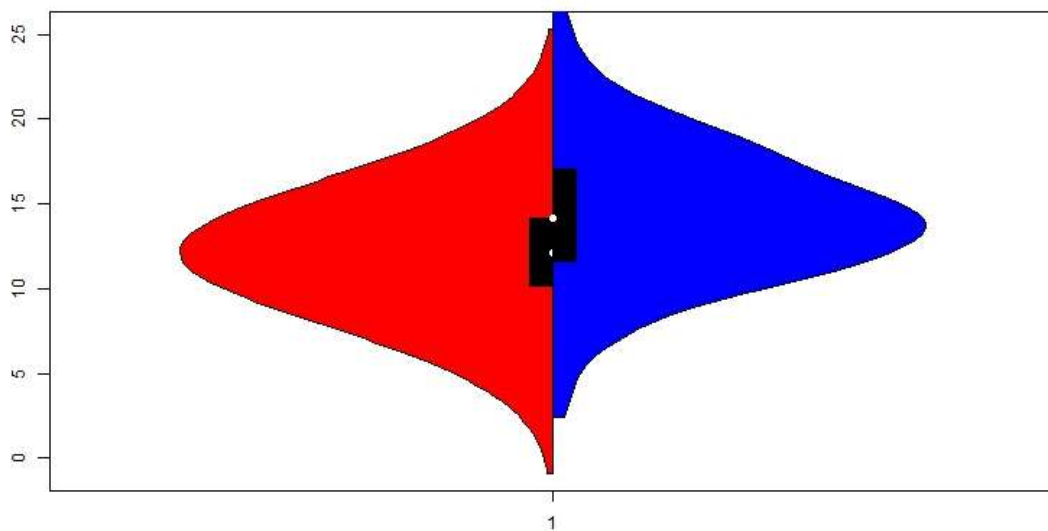


Figura 4-33 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima brutas para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan para las predicciones sin corrección de sesgo se presentan en el Anexo II.

En la Figura 4-34 se observa, en el análisis de la calidad de las predicciones brutas, un comportamiento similar que el que tiene las predicciones de temperatura mínima. Se diferencia claramente una zona hacia la costa de la Comunidad Valenciana con valores de acierto inferiores al resto de la Demarcación Hidrográfica para todos los meses, pero presentando una alta calidad para todos los periodos de anticipación de todos los meses, con excepción de los meses de enero, febrero, marzo, julio, noviembre y diciembre, donde el porcentaje de acierto es bajo para la zona identificada en todos los casos.

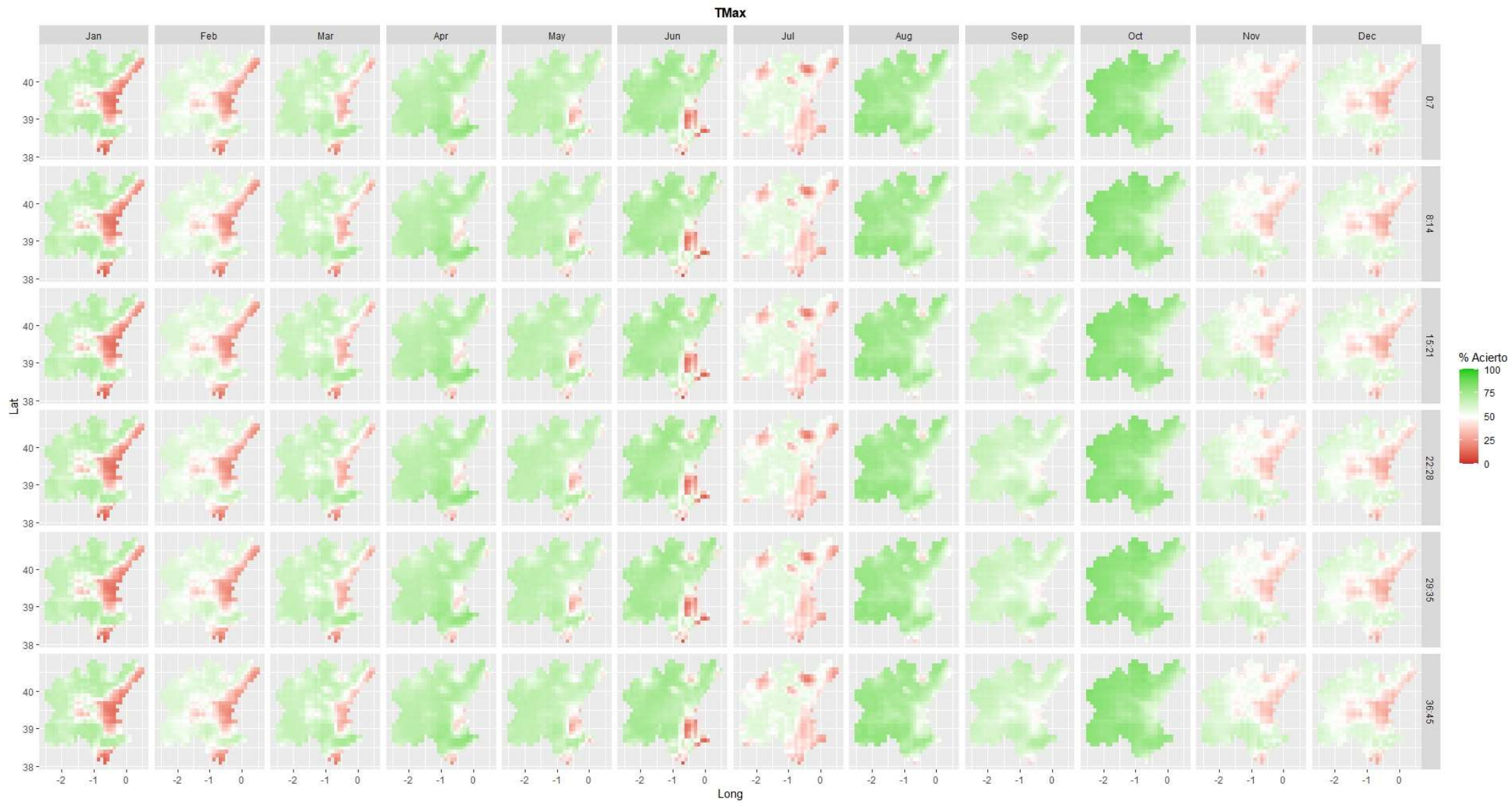


Figura 4-34 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima brutas con calidad.

4.2.4.2 Predicciones corregidas por mes

En la Figura 4-35 se presenta el comportamiento de las predicciones corregidas por mes, en donde es posible observar un mejor ajuste de la distribución de las predicciones. Se ha desplazado todo el conjunto hacia temperaturas más altas abarcando en cada diagrama de cajas los datos históricos, corrigiendo el sesgo del modelo original

Este comportamiento se presenta de manera general para todas las predicciones independientemente del mes de ejecución, en el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para las predicciones corregidas para los 11 meses restantes.

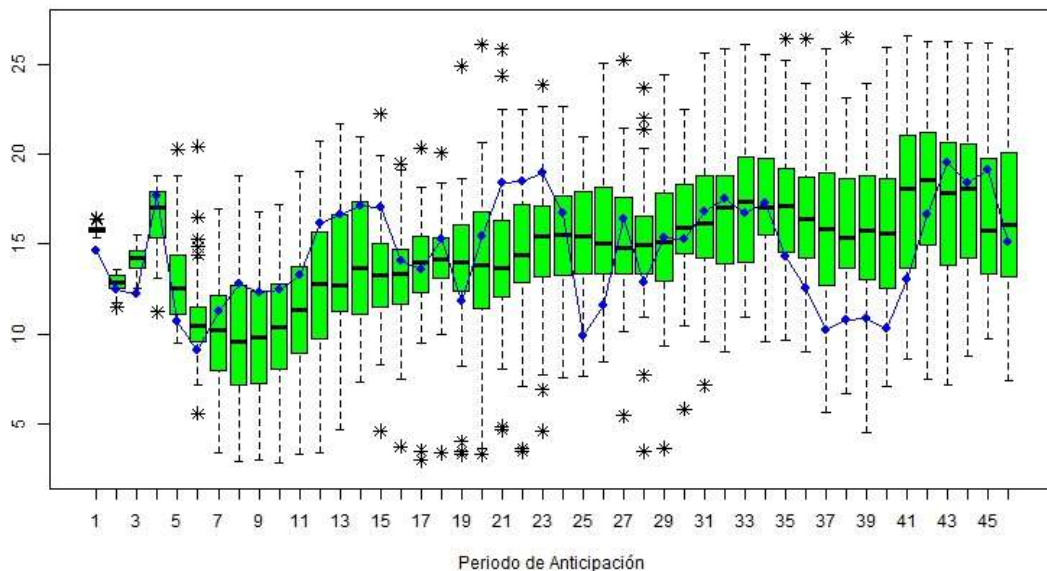


Figura 4-35 Predicciones de temperatura máxima corregidas por mes para una ejecución del modelo en el mes de enero.

De igual manera este comportamiento se evidencia más claramente en el diagrama de violín presentado en la Figura 4-36. En este se observa cómo se ajustan los valores máximos y mínimos de la distribución de las predicciones a los de la distribución de los valores históricos, como los valores de la mediana y el rango intercuartílico.

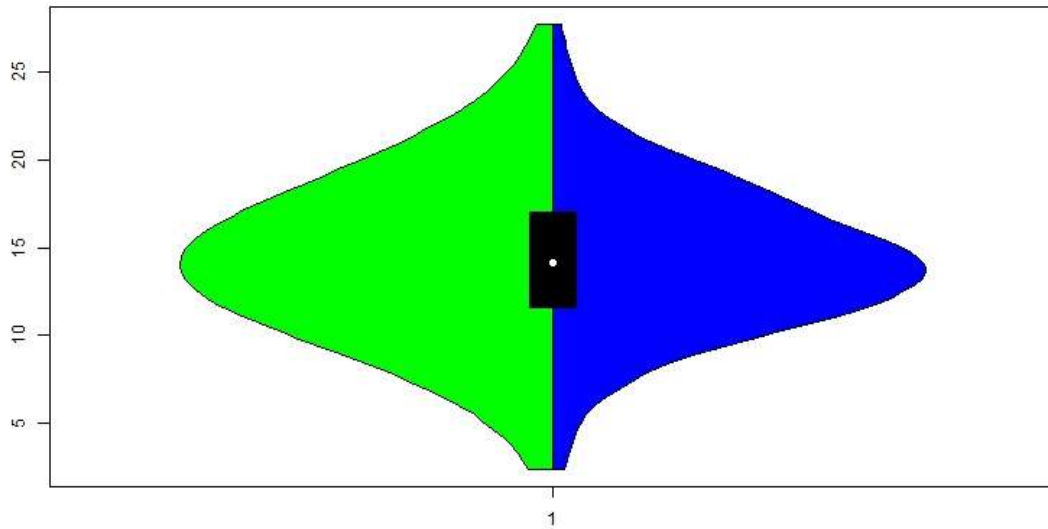


Figura 4-36 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín respectivos para cada mes se presentan en el Anexo II.

Respecto al análisis de calidad, se presentan en la Figura 4-37 los mapas de calor para las predicciones corregidas, en donde respecto al caso de las predicciones brutas se observa un incremento de la calidad en toda el área de la Demarcación Hidrográfica. Todas las zonas en las cuales al calidad era baja han incrementado su porcentaje de acierto. El mes de julio continúa siendo el mes con peor porcentaje de acierto, sin embargo al hacer la corrección se ha logrado suavizar la variabilidad de los valores alcanzando calidades altas para periodos de anticipación de 6 semanas.

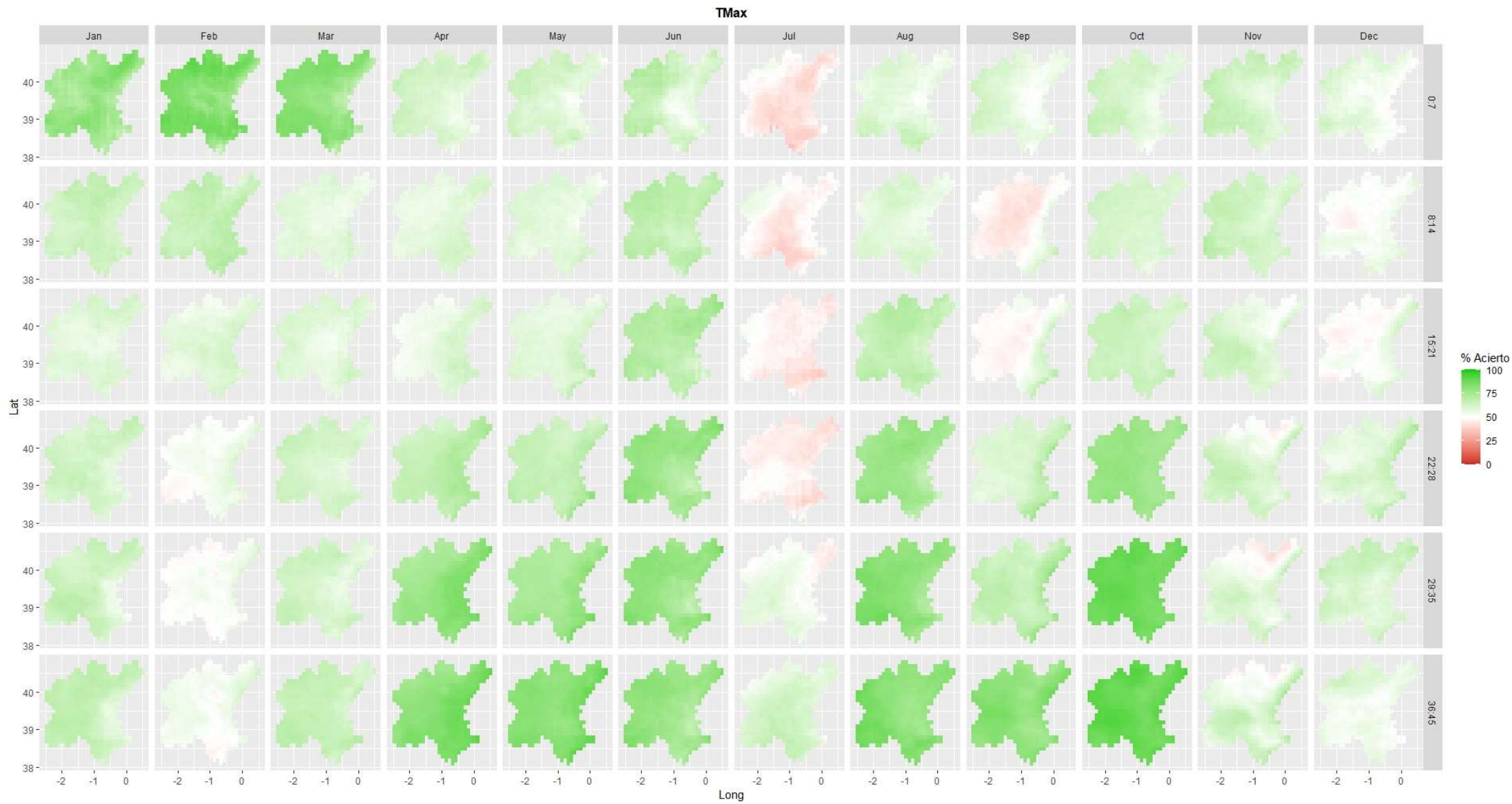


Figura 4-37 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes con calidad.

4.2.4.3 Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

Los resultados obtenidos por medio de la segunda corrección de sesgo se presentan en la Figura 4-38, en donde se puede observar que, para la misma simulación presentada en las Figuras Figura 4-32 y Figura 4-35, tanto el rango de valores que toman las predicciones como el número de valores anómalos se reducen, encontrando en este caso valores más cercanos a los encontrados en los históricos tanto en la distribución como en la mediana.

Este comportamiento del ajuste se presenta de manera general para todas las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación independientemente del mes de ejecución del modelo. En el Anexo II se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones de temperatura media con el sesgo corregido para los 11 meses restantes para la misma celda de estudio.

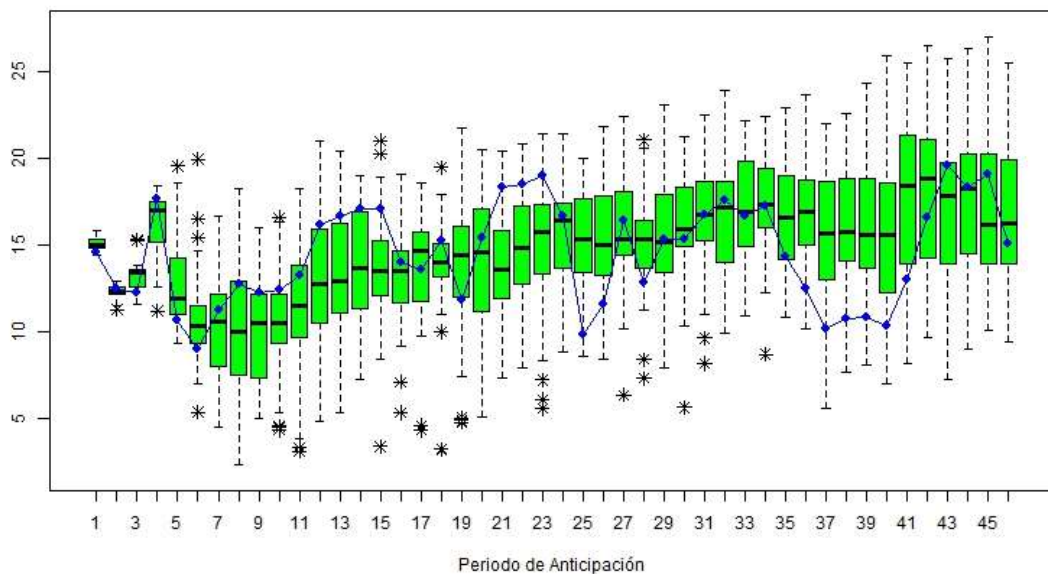


Figura 4-38 Predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación para una ejecución del modelo en el mes de enero.

El ajuste realizado se observa de mejor manera por medio del diagrama de violín presentado en la Figura 4-39, donde se observa que se acotan los valores máximos y mínimos de las predicciones a los valores históricos, además de incrementar la probabilidad de ocurrencia de valores entre los 10°C y 20°C, como sucede en la distribución de datos históricos.

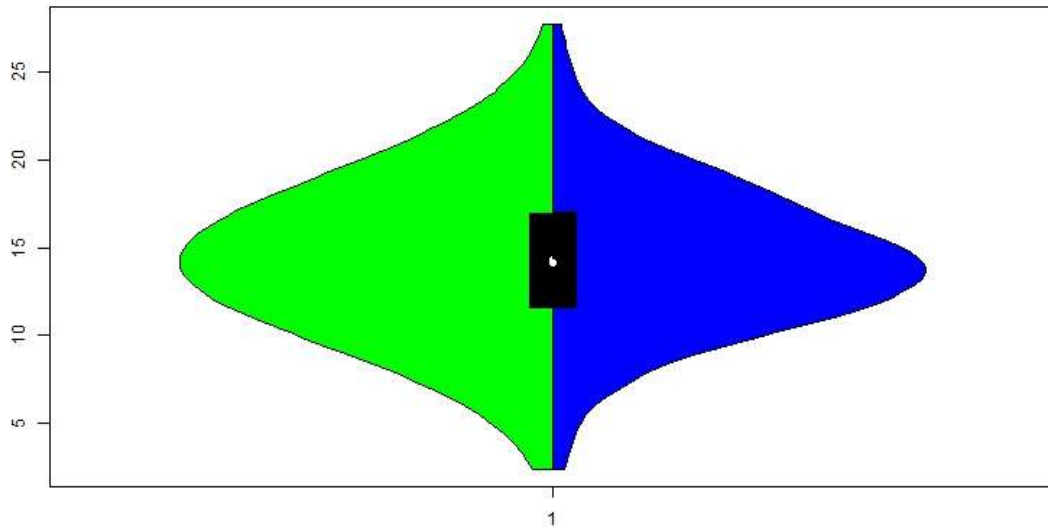


Figura 4-39 Diagrama de violín de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación para todas la ejecuciones del modelo en el mes de enero.

De la misma manera que con los diagramas de cajas y bigotes, los diagramas de violín de la celda estudiada se presentan en el Anexo II para cada mes uno de los meses restantes.

En la Figura 4-40 se presentan los resultados obtenidos para el análisis de calidad de las predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación. Respecto a los resultados presentados en las Figuras Figura 4-34 y Figura 4-37 se observa un incremento significativo del porcentaje de acierto, en toda la Demarcación Hidrográfica para todos los periodos de anticipación y todos los meses es posible encontrar calidad por encima del 50%, alcanzando calidad altas en periodos de anticipación de hasta seis semanas principalmente en los meses de abril, mayo, junio, agosto y octubre. Para el mes de julio, el mes en el que peor comportamiento tenían las predicciones brutas, no se encuentran valores de acierto por debajo del 50% en ninguna zona, por lo cual la corrección del sesgo realizada por mes y periodo de anticipación ha permitido corregir la distribución de los valores.

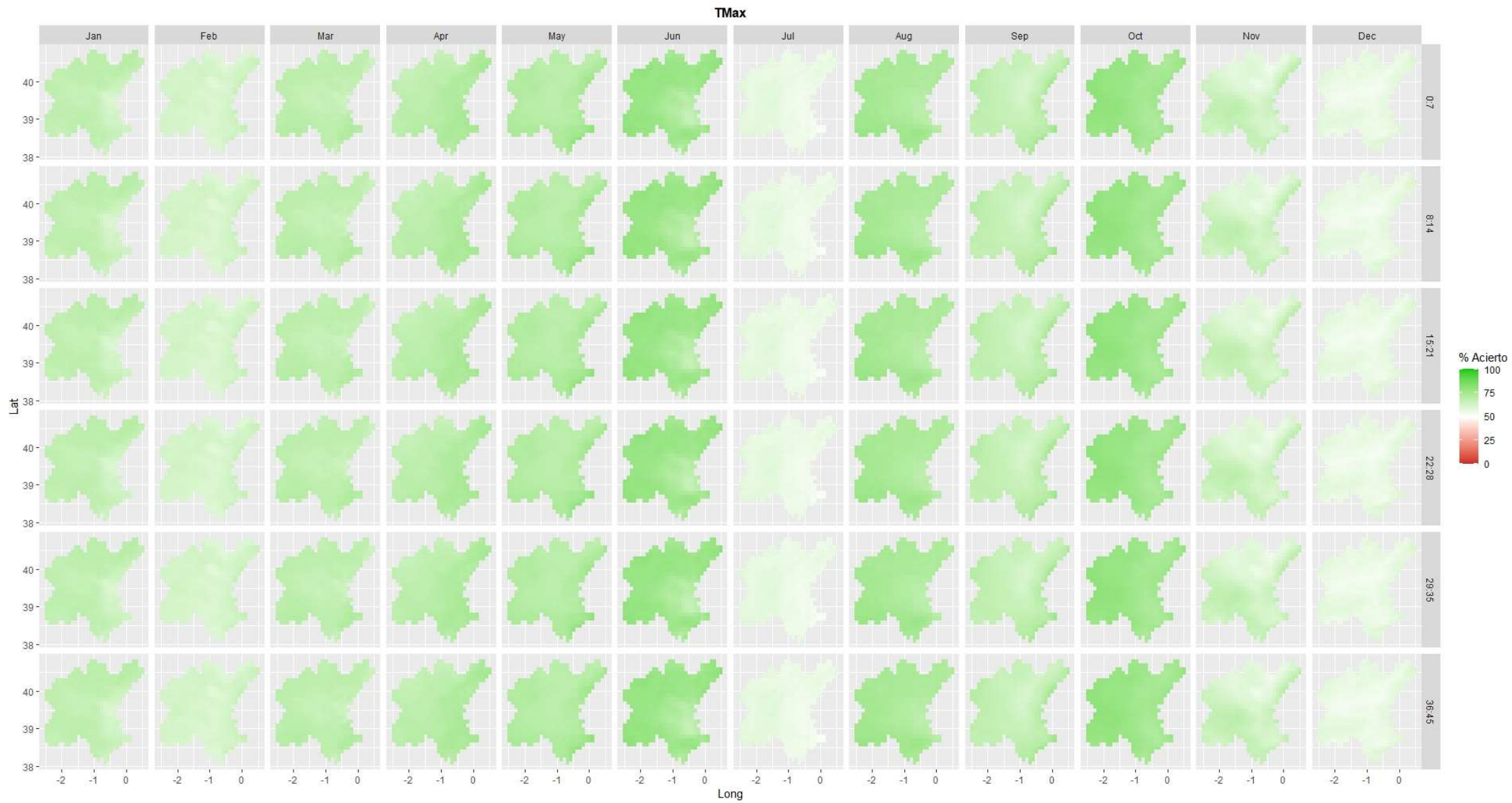


Figura 4-40 Porcentaje de predicciones de temperatura máxima corregidas por mes y periodo de anticipación con calidad.

Una vez se obtienen los resultados del análisis de calidad de las predicciones brutas y corregidas, se ha seleccionado el conjunto de las predicciones con la corrección del sesgo por mes y periodo de anticipación, con el fin de obtener las predicciones de carácter hidrológico por medio del acople con TETIS, gracias a que las predicciones corregidas de esta manera son las que un mayor porcentaje de acierto general tienen.

4.3 ANÁLISIS DE PREDICCIONES HIDROLÓGICAS

Seleccionadas las predicciones que se van a utilizar para la estimación de las predicciones hidrológicas, se procede con la estimación de las series de evapotranspiración requeridas por TETIS, para cada una de las 625 simulaciones que se van a realizar.

Posterior a este procedimiento se obtiene el abanico de predicciones de caudal de entrada para cada uno de los embalses de interés y se analiza su calidad, de manera análoga al análisis de las predicciones meteorológicas. Para cada embalse en primer lugar se presenta un diagrama de cajas y bigotes representando la distribución del conjunto de 51 miembros de las predicciones para la primera simulación realizada el 4 de enero de 2016, en donde se observa la distribución de los 51 miembros del conjunto de simulaciones, para posteriormente enseñar un mapa de calor a modo de resumen con el cual se representa el porcentaje de acierto de las predicciones con respecto a los valores obtenidos de caudales de entrada a régimen natural obtenidos con TETIS.

4.3.1 Alarcón

En este caso se presenta en la Figura 4-41 el diagrama de cajas y bigotes de color rojo la distribución de las predicciones obtenidas para la simulación del modelo ECMWF ejecutada el 4 de enero de 2016, con los valores obtenidos con TETIS de entradas al embalse. En esta simulación se puede observar que, para periodos de anticipación cortos, cercanos a la fecha de ejecución del modelo de predicción, los valores predichos se encuentran muy cerca entre sí y a su vez de los valores observados, mientras que conforme se incrementa el número de días de anticipación la distribución amplía su rango y presenta incluso valores anómalos, al igual que sucedía con las predicciones meteorológicas.

Todas las predicciones obtenidas presentan un comportamiento similar: un aumento del rango de los valores y de outliers conforme incrementa el periodo de anticipación.

En el Anexo III se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones realizadas en los 11 meses restantes para diferentes años.

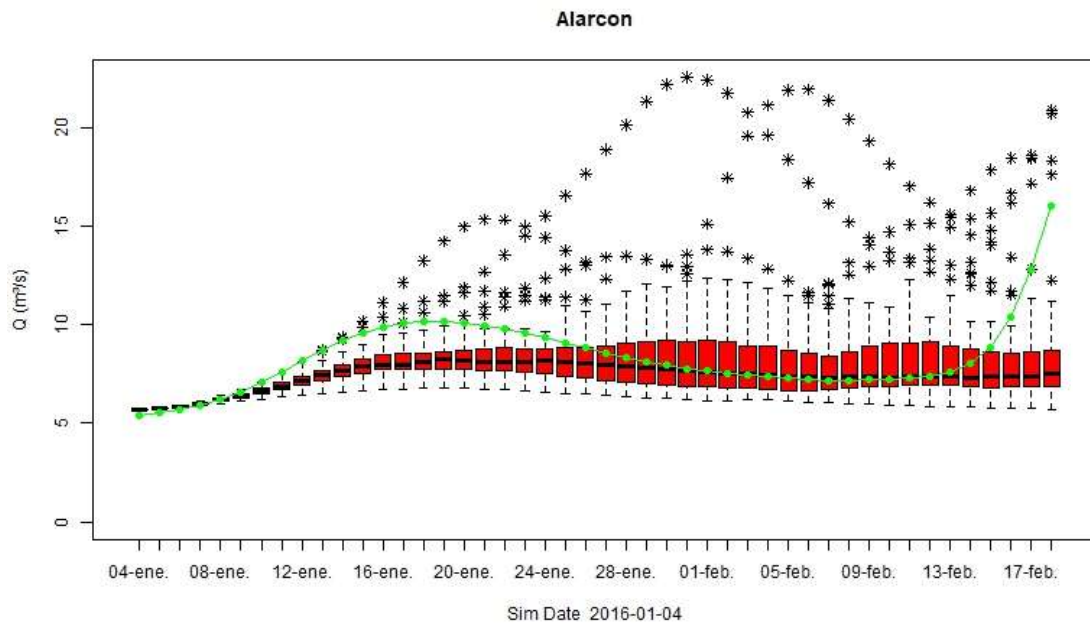


Figura 4-41 Predicciones de entradas a Alarcón para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.

Respecto al análisis de calidad, en la Figura 4-42 se presenta el mapa de calor con el porcentaje de calidad media de las predicciones durante el periodo de estudio para todos los meses del año y los seis periodos de anticipación analizados.

El análisis de calidad refleja un alto porcentaje de calidad para todos los meses y periodos de anticipación, con valores mayores al 50% en todos los casos, siendo los meses de enero, febrero y marzo para periodos mayores a tres semanas de anticipación los que menor calidad presentan, con valores alrededor del 50%.

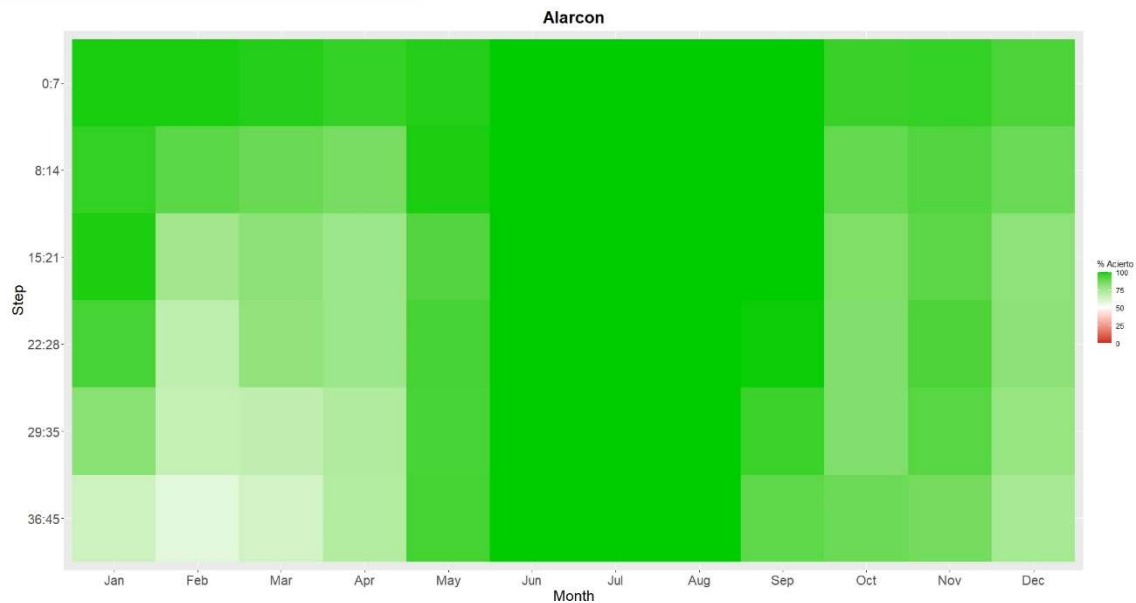


Figura 4-42 Porcentaje de predicciones de entradas a Alarcón con calidad.

4.3.2 Bellús

El diagrama de cajas y bigotes para la simulación de las predicciones del 4 de enero de 2016 se presenta en la Figura 4-43, donde se observa un comportamiento similar al de las simulaciones para Alarcón. Periodos de anticipación cortos presentan valores predichos cercanos a los observados. A medida que se incrementa el número de días de anticipación la distribución amplía su rango y se encuentran valores anómalos

Todas la predicciones obtenidas presentan un comportamiento similar, un aumento del rango de los valores y de outliers conforme incrementa el periodo de anticipación.

En el Anexo III se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones realizadas en los 11 meses restantes para diferentes años.

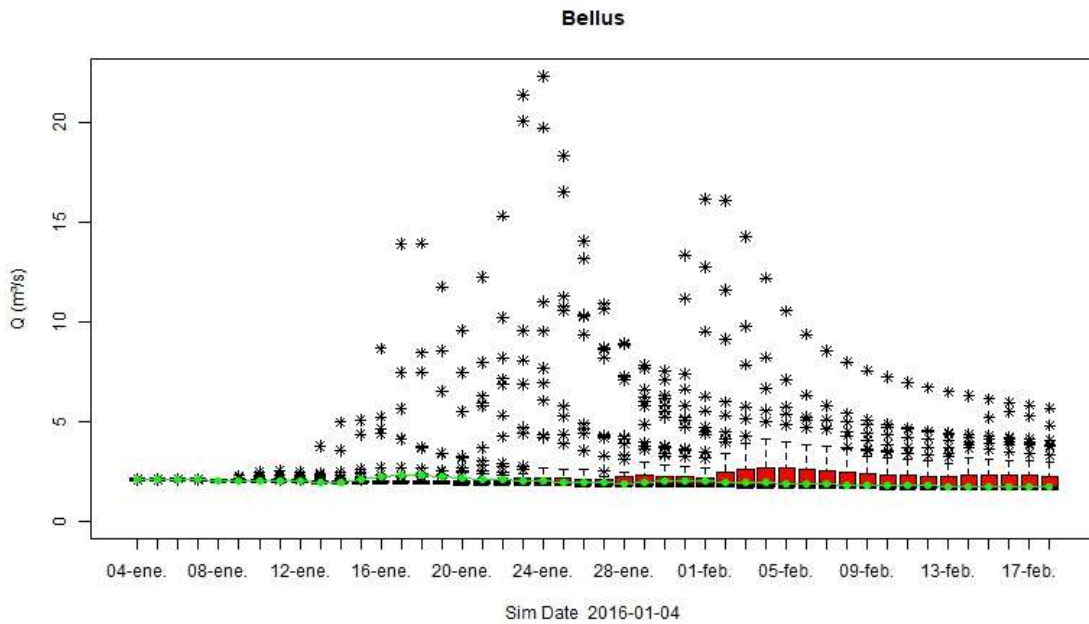


Figura 4-43 Predicciones de entradas a Bellús para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.

En la Figura 4-44 se presenta el mapa de calor con los resultados para las aportaciones al embalse de Bellús. En este análisis se refleja una alta calidad para todos los meses y periodos de anticipación analizados, con porcentajes de acierto mayores al 50% en todos los casos. El menor porcentaje de calidad se encuentra para el mes de diciembre para periodos de anticipación de seis semanas.

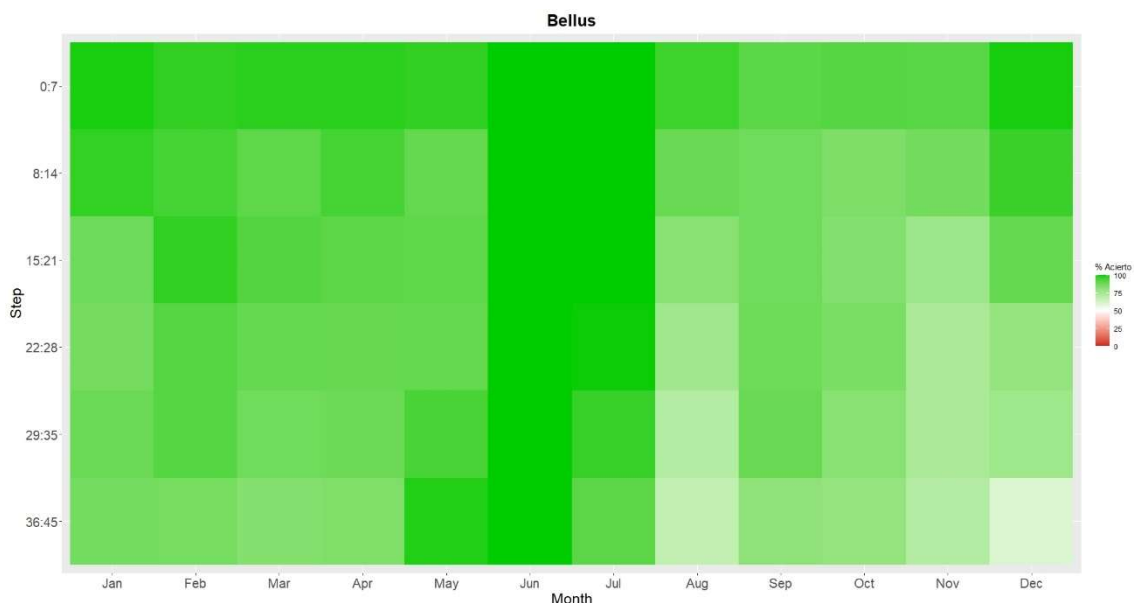


Figura 4-44 Porcentaje de predicciones de entradas a Bellús con calidad.

4.3.3 Contreras

En la Figura 4-45 se encuentra el diagrama de cajas y bigotes para la simulación de las predicciones del 4 de enero de 2016, donde el rango de las predicciones incrementa con el aumento del periodo de anticipación, encontrando valores anómalos.

Todas las predicciones obtenidas presentan un comportamiento similar: al incrementarse el periodo de anticipación, aumenta el rango de valores de las predicciones.

En el Anexo III se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones realizadas en los 11 meses restantes para diferentes años.

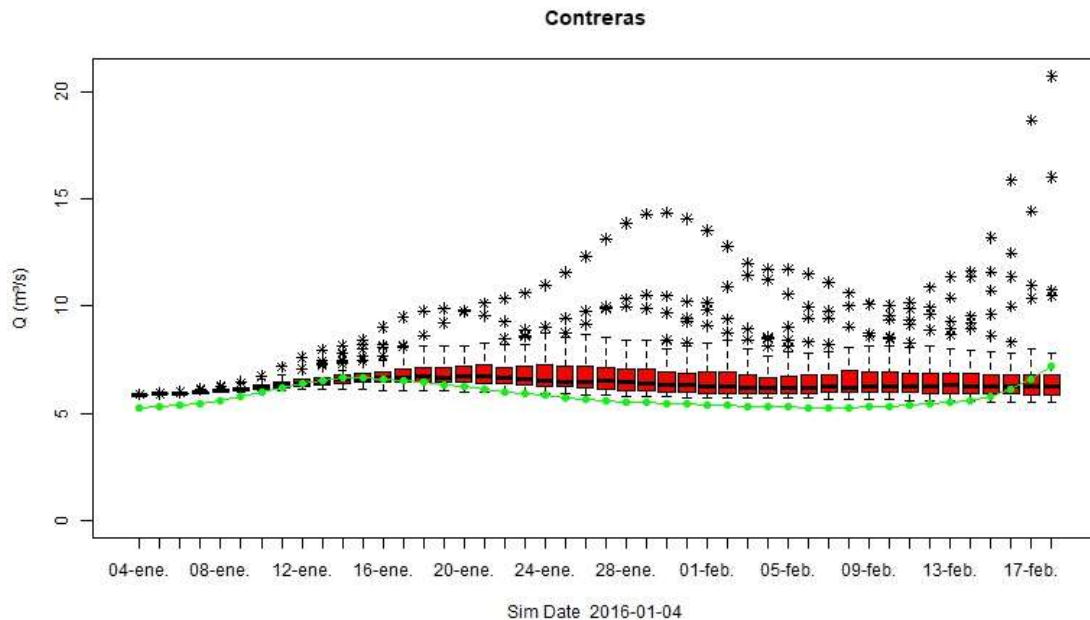


Figura 4-45 Predicciones de entradas a Contreras para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.

La calidad encontrada para las predicciones para el embalse de Contreras se encuentra en la Figura 4-46. La calidad de las predicciones para todos los periodos de anticipación es bastante alta. Los meses de febrero, marzo y octubre son los que presentan valores más bajos para periodos de anticipación mayores a 21 días, pero se encuentran todos por encima del 50% incluso para anticipaciones de hasta 6 semanas.

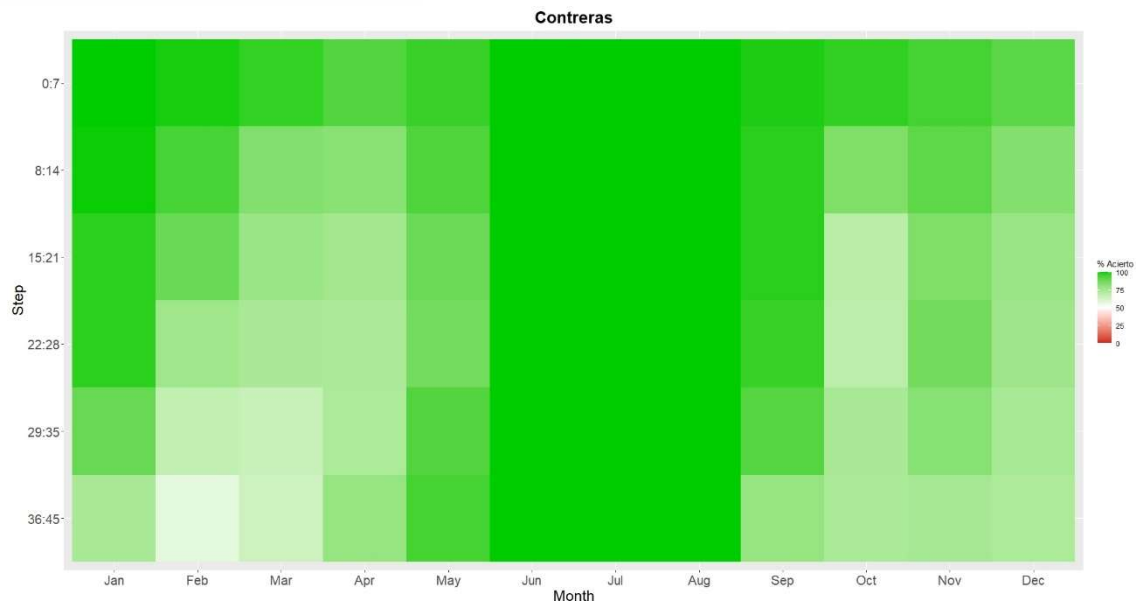


Figura 4-46 Porcentaje de predicciones de entradas a Contreras con calidad.

4.3.4 Forata

En la Figura 4-47 el diagrama de cajas y bigotes para la predicciones con fecha de ejecución del 4 de enero de 2016. En este caso, al igual que en los anteriores embalses, los valores cercanos a la fecha de ejecución del modelo se encuentran con una distribución más cercana entre ellos y a los valores históricos, que se incrementa al aumentar el periodo de anticipación.

En el Anexo III se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones realizadas en los 11 meses restantes para diferentes años.

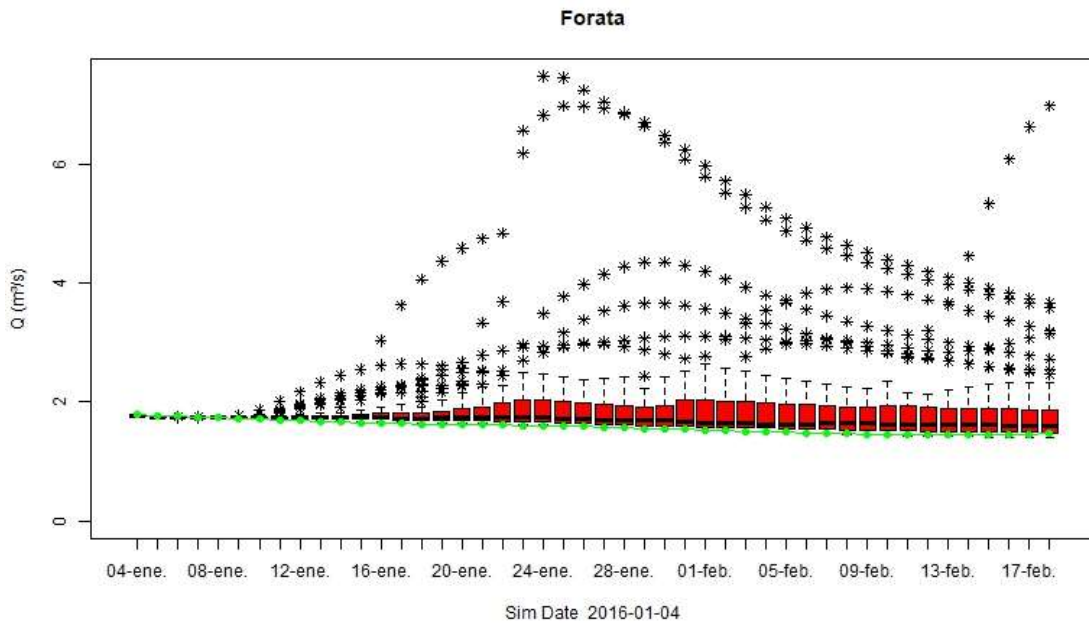


Figura 4-47 Predicciones de entradas a Forata para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.

El análisis de calidad presentado en la Figura 4-48 refleja una alta calidad para las predicciones en todo el periodo de estudio para todos los meses y periodos de anticipación. Los meses que peor comportamiento tienen son los de marzo, abril, noviembre y diciembre, para periodos de anticipación mayores a 4 semanas, pero con aciertos mayores al 50%.

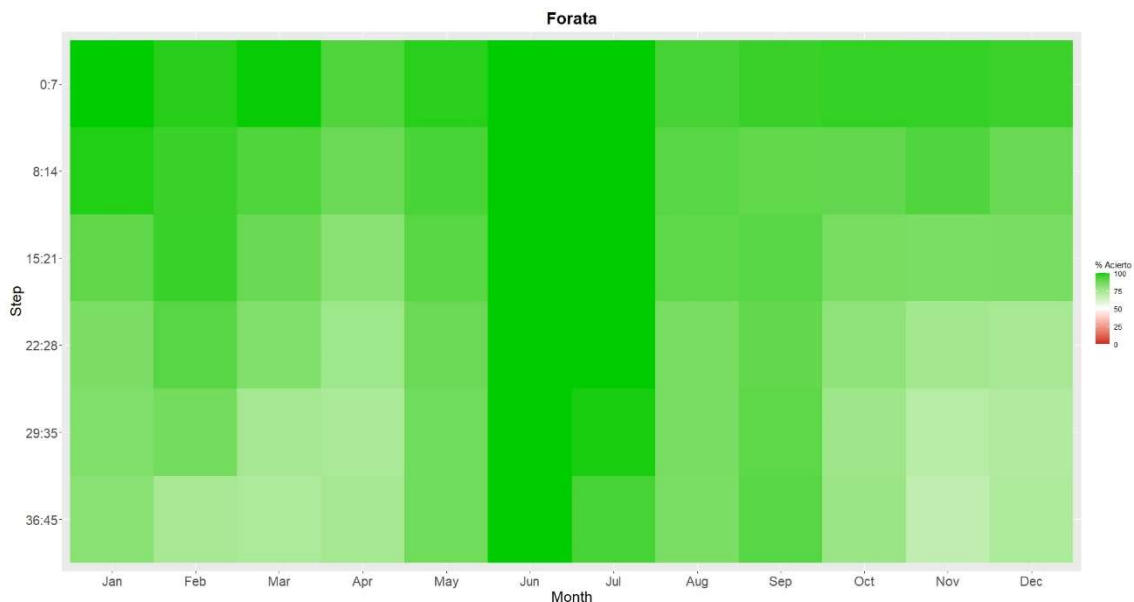


Figura 4-48 Porcentaje de predicciones de entradas a Forata con calidad.

4.3.5 Tous

En la Figura 4-49 se presenta el diagrama de cajas y bigotes para las predicciones obtenidas para la simulación realizada el 4 de enero de 2016. Los valores predichos por el modelo se encuentran, para periodos de anticipación cortos, cerca de los valores observados para la entrada de Tous, que se van alejando conforme el periodo de anticipación es mayor, pero manteniendo una clara tendencia hacia los valores reales obtenidos con TETIS.

En el Anexo III se presentan diagramas de cajas y bigotes para simulaciones realizadas en los 11 meses restantes para diferentes años.

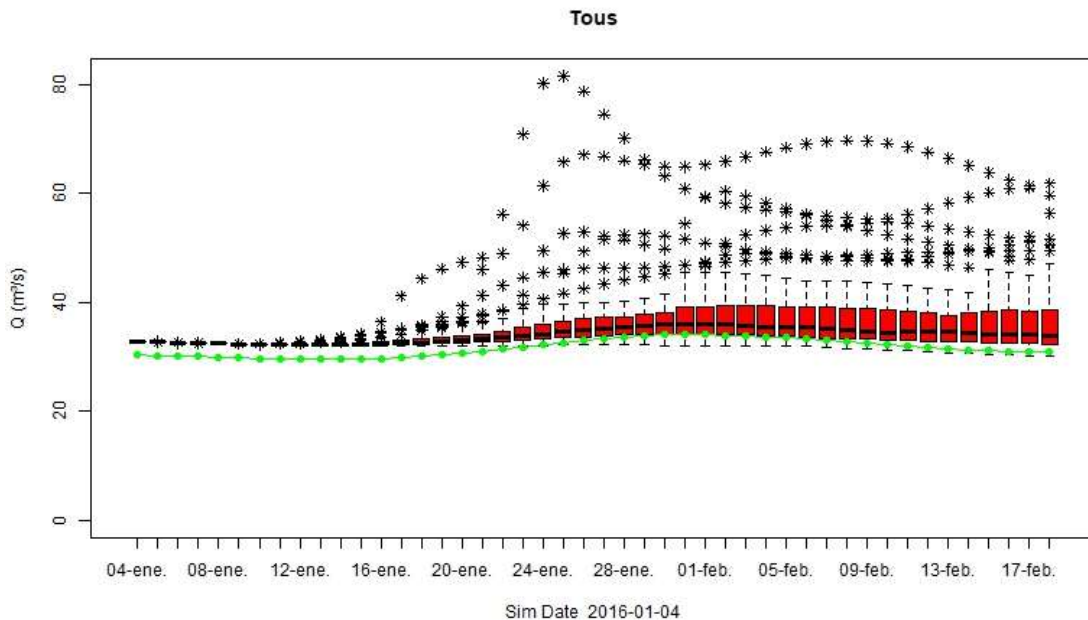


Figura 4-49 Predicciones de entradas a Tous para la ejecución del modelo el 4 de enero de 2016.

De igual manera que para los cuatro embalses anteriores las calidades de las predicciones son altas: todos los periodos de anticipación para todos los meses simulados presentan una calidad alta, bastante superior al 50% como se puede observar en la Figura 4-50, donde el mes con las calidades más bajas, abril para periodos de anticipación mayores a 3 semanas, cuenta con porcentajes de acierto mayores al 50%.

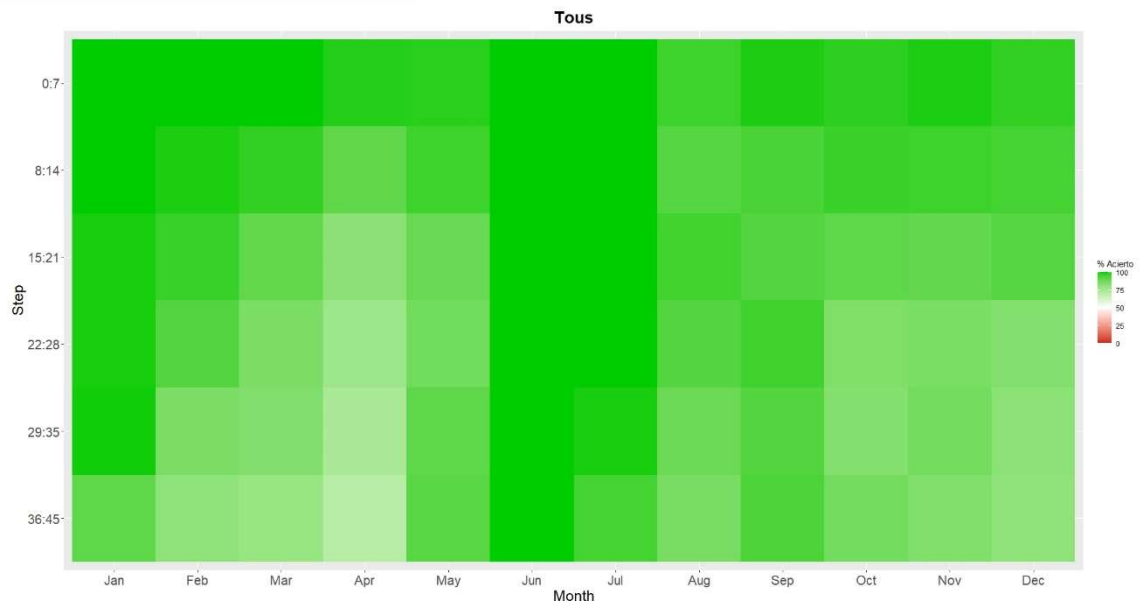


Figura 4-50 Porcentaje de predicciones de entradas a Tous con calidad.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado la capacidad de predicción de predicciones corregidas del modelo ECMWF del proyecto de investigación S2S, para ello, se ha utilizado la métrica estadística del CRPSS tomando como referencia el periodo comprendido entre 2016–2021 para la cuenca del río Júcar (inferiendo que la calidad de estas se mantendrá en el futuro).

Los resultados obtenidos muestran que las predicciones a la escala subestacional para las variables meteorológicas de temperatura media, mínima, máxima cuentan con un sesgo de representación de las temperaturas reales, por lo cual es necesario realizar una corrección de este para poder incrementar la calidad de las predicciones.

La metodología de corrección por mes y periodo de anticipación para la temperatura permitió corregir el sesgo con el que cuentan las predicciones brutas, con lo cual ha aumentado la calidad de estas para toda la Demarcación Hidrográfica del Júcar (superior al 50%) incluso para periodos de anticipación lejanos de hasta seis semanas.

En el caso de la precipitación, la predicción tiene una mayor complejidad al ser un fenómeno discreto en ocurrencia y continuo en intensidad, por lo que la calidad general para periodos de anticipación lejanos no es muy alta. Sin embargo, al realizar la corrección del sesgo, es posible mejorar levemente la calidad de las predicciones. Toda la Demarcación cuenta con calidad para los periodos de hasta dos semanas, manteniendo la calidad en todo el periodo de anticipación en los meses de abril, mayo, junio y septiembre, mientras que, para los otros meses las mayores calidades se presentan hacia la costa de la Comunitat Valenciana.

Por medio del modelo hidrológico desarrollado en TETIS se han podido obtener simulaciones a régimen natural para cinco embalses del sistema de explotación del Júcar para el periodo 2016–2021. El acople del modelo hidrológico de TETIS con el modelo de predicciones corregidas ha permitido obtener el comportamiento de las predicciones de aportaciones en régimen natural a los cinco embalses de interés en la cuenca del Júcar, encontrando una alta calidad de las predicciones hasta para 45 vista desde la ejecución del modelo para todos.

Los embalses de Alarcón y Contreras presentan las calidades más bajas para periodos de anticipación mayores a cuatro semanas para los meses de enero, febrero y marzo, pero las más altas para los meses de verano de junio, julio y agosto, por lo que teniendo como uso principal la regulación y el abastecimiento, lograr estas calidades en la época de mayores presiones es de gran utilidad.

Los embalses de Bellús y Forata son los que presentan mayores calidades en las predicciones para todos los meses y periodos de anticipación, especialmente importante en ambos para poder planear de mejor manera los desembalses gracias a su uso en riego. Para Forata, toma también importancia en la gestión del riesgo frente avenidas.

En el caso de Tous, teniendo en mente su uso frente avenidas, es de gran importancia tener calidades altas de los pronósticos para periodos de anticipación largos para las épocas de lluvia, como es el presente caso, teniendo las calidades más altas para este embalse para los meses comprendidos entre noviembre y marzo.

La alta calidad de los pronósticos hidrológicos a escala subestacional puede ser una herramienta por utilizar en la gestión de embalses, permitiendo anticipar eventos de crecidas o aportaciones bajas con semanas de anterioridad con un alto porcentaje de acierto.

El uso conjunto de sistemas de predicción estacional ya existentes con modelos de predicción subestacionales puede permitir la creación de un sistema continuo de predicción para la ayuda de gestión de embalses, ayudando a la toma de decisiones sobre el proceso de llenado y suministro del embalse, así como una definición de resguardos estacionales basados en la meteorología de cada año y periodo, ajustándose a la incremental variabilidad climática que se viene presentando en los últimos años.

5.1 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con base en el trabajo desarrollado se recomienda continuar con estudios sobre la incorporación de predicciones subestacionales en la gestión del agua, como una herramienta más para hacer frente a los efectos adversos que los fenómenos extremos y la variabilidad climática generan en los sistemas de explotación existentes y en las actividades socioeconómicas que de-



penden de los recursos hídricos, por medio de la incorporación de modelos de gestión de recursos hídricos, la incorporación de otros modelos de predicción y la corrección del sesgo por otros métodos diferentes al quantile mapping.

BIBLIOGRAFÍA

- Berrios Peña, M. I. (2011). *Análisis de escalabilidad espacial para un modelo conceptual de producción de escorrentía* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/12741>
- Brunet, G., Shapiro, M., Hoskins, B., Moncrieff, M., Dole, R., Kiladis, G. N., Kirtman, B., Lorenc, A., Mills, B., Morss, R., Polavarapu, S., Rogers, D., Schaake, J., & Shukla, J. (2010). Collaboration of the Weather and Climate Communities to Advance Subseasonal-to-Seasonal Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1397–1406. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3013.1>
- Bussi, G. (2010, mayo 27). *Calibración de un modelo conceptual distribuido del ciclo de sedimentos. Aplicación a la cuenca experimental de Goodwin Creek (EEUU)*. <https://docplayer.es/94696043-Calibracion-de-un-modelo-conceptual-distribuido-del-ciclo-de-sedimentos-aplicacion-a-la-cuenca-experimental-de-goodwin-creek-eeuu.html>
- Confederación Hidrográfica Del Júcar. (2019). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar Revisión de tercer ciclo (2021–2027) Documentos Iniciales*.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022a). *Anejo 6 Sistemas de explotación y balances*.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022b). *Funciones*. <https://www.chj.es/es-es/Organismo/Funciones/Paginas/Funciones.aspx>
- DIHMA. (2001). *Un modelo de predicción de crecidas para SAIH de la confederación hidrográfica del Tajo*.
- ECMWF Model – S2S – ECMWF Confluence Wiki*. (s. f.). Recuperado 14 de julio de 2022, a partir de <https://confluence.ecmwf.int/display/S2S/ECMWF+Model#ECMWFModel-Detailedmodeldescription>
- Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and

- temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401–419. <https://doi.org/10.2166/WCC.2020.261>
- Ficchì, A., Raso, L., Dorchies, D., Pianosi, F., Malaterre, P.–O., van Overloop, P.–J., & Jay–Allemand, M. (2016). Optimal Operation of the Multireservoir System in the Seine River Basin Using Deterministic and Ensemble Forecasts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(1), 05015005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000571](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000571)
- Gascón, E. (2021). *Predicciones meteorológicas Aplicaciones a diferentes escalas temporales*.
- Graham, R. M., Browell, J., Bertram, D., & White, C. J. (2022). The application of sub–seasonal to seasonal (S2S) predictions for hydropower forecasting. *Meteorological Applications*, 29(1), e2047. <https://doi.org/10.1002/MET.2047>
- Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida. (2021). *DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS*. <http://lluvia.dihma.upv.es/>
- Grupo INCLAM. (2020, enero 20). *Presa en explotación: normativas y prácticas en esta fase de la vida de la presa | iAguA*. <https://www.iagua.es/noticias/grupo-inclam/presa-explotacion-normativas-y-practicas-esta-fase-vida-presa>
- Gudmunson, L. (2016). *CRAN – Package qmap*. <https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/index.html>
- Gupta, R., Bhattarai, R., & Mishra, A. (2019). Development of climate data bias corrector (CDBC) tool and its application over the agro–ecological zones of India. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/W11051102>
- Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2000). Long–range climate forecasting and its use for water management in the Pacific Northwest region of North America. *Journal of Hydroinformatics*, 2(3), 163–182. <https://doi.org/10.2166/HYDRO.2000.0015>
- Huang, Z., Zhao, T., Xu, W., Cai, H., Wang, J., Zhang, Y., Liu, Z., Tian, Y., Yan, D., & Chen, X. (2022). A seven–parameter Bernoulli–Gamma–Gaussian model to calibrate subseasonal to seasonal precipitation forecasts. *Jour–*

nal of Hydrology, 610, 127896.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.127896>

IDEAM. (s. f.–a). *Conceptos básicos de cambio climático*. Recuperado 12 de octubre de 2022, a partir de <http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas>

IDEAM. (s. f.–b). *MODELACIÓN HIDROLÓGICA*. Recuperado 7 de enero de 2023, a partir de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

IDEAM. (2018). *Protocolo De Modelación Hidrológica e Hidráulica*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf

Kabat, P., Schulze, R. E., Hellmuth, M. E., & Veraart, J. A. (2003). *Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper*. www.waterandclimate.org

Lavers, D. A., Ramos, M. H., Magnusson, L., Pechlivanidis, I., Klein, B., Prudhomme, C., Arnal, L., Crochemore, L., Hurk, B. van den, Weerts, A. H., Harrigan, S., Cloke, H. L., Richardson, D. S., & Pappenberger, F. (2020). A vision for hydrological prediction. *Atmosphere*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/atmos11030237>

Li, W., Duan, Q., Miao, C., Ye, A., Gong, W., & Di, Z. (2017). A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting. En *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 4, Issue 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1246>

Merryfield, W. J., Baehr, J., Batté, L., Becker, E. J., Butler, A. H., Coelho, C. A. S., Danabasoglu, G., Dirmeyer, P. A., Doblas-Reyes, F. J., Domeisen, D. I. V., Ferranti, L., Ilynia, T., Kumar, A., Müller, W. A., Rixen, M., Robertson, A. W., Smith, D. M., Takaya, Y., Tuma, M., ... Yeager, S. (2020). Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6), E869–E896. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0037.1>

Instrucción de Planificación Hidrológica, BOE 229 (2008).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Normas de explotación de la presa*.

<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/gestion-seguridad-presas/normas.aspx>

- Mishra, N. (2015). *Skill Assessment of Seasonal Temperature and Precipitation Forecast over Europe* [Barcelona Graduate School of Economics (BGSE)]. www.imprex.eu
- Mladek, R. (2021, noviembre 2). *ECMWF model description*. <https://confluence.ecmwf.int/display/S2S/ECMWF+Model>
- Organización Meteorológica Mundial. (s. f.). *Preguntas frecuentes – Clima / Organización Meteorológica Mundial*. Recuperado 20 de diciembre de 2022, a partir de <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- Orozco Medina, I. (2014). Modelación parsimoniosa y espacialmente distribuida de los procesos de acumulación y fusión de la nieve [Universitat Politècnica de València]. En *Riunet*. <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/36035>
- Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). Guía Práctica sobre la Modelización Hidrológica y el Modelo HEC-HMS. En *Información tecnológica* (Vol. 29, Issue 4).
- Pasquato, M., Medici, C., & Francés, F. (2011). Aplicación de un modelo conceptual distribuido de vegetación dinámica a una cuenca semiárida del sureste de España. *Estudios En La Zona No Saturada Del Suelo: Volumen X, 2011, ISBN 978-84-694-6642-1, Págs. 59-64, X: ZNS11*, 59-64. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8517628>
- Pendergrass, A. G., Meehl, G. A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., Agha-Kouchak, A., Bonfils, C. J. W., Gallant, A. J. E., Hoerling, M., Hoffmann, D., Kaatz, L., Lehner, F., Llewellyn, D., Mote, P., Neale, R. B., Overpeck, J. T., Sheffield, A., Stahl, K., Svoboda, M., ... Woodhouse, C. A. (2020). Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nature Climate Change* 2020 10:3, 10(3), 191-199. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0709-0>
- Peñuela, A., Hutton, C., & Pianosi, F. (2020). Assessing the value of seasonal hydrological forecasts for improving water resource management: insights from a pilot application in the UK. *Hydrology and Earth System*

Sciences, 24(12), 6059–6073. <https://doi.org/10.5194/hess-24-6059-2020>

Pronósticos Climáticos / CIIFEN. (s. f.). Recuperado 11 de julio de 2022, a partir de <https://ciifen.org/pronosticos-climaticos/>

Ramos Fernández, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida* [Tesis Doctoral, Uniersitat Politècnica de València]. www.editorial.upv.es

Rubio Viñas, J. M. (2013). Origen y desarrollos actuales de la predicción meteorológica. *Encuentro Multidisciplinares*.

Rubio–Martin, A., Macian–Sorribes, H., Lopez–Perez, E., Garcia–Prats, A., Manzano–Juarez, J., Jimenez–Bello, M. A., & Pulido–Velazquez, M. (2021). Forecasting groundwater pumping cap in an overexploited Mediterranean aquifer using seasonal meteorological forecasts from Copernicus Climate Change Service. *EGU21*. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU21-12273>

Ruiz–Ochoa, M. A., Vargas–Corredor, Y. A., Orduz–Amaya, L. P., Torres–Corredor, J. S., Ruiz–Ochoa, M. A., Vargas–Corredor, Y. A., Orduz–Amaya, L. P., & Torres–Corredor, J. S. (2022). Variabilidad climática en la planificación hídrica de la cuenca del río Cravo Sur (Casanare, Colombia). *Información Tecnológica*, 33(4), 117–124. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000400117>

Ruiz–Pérez, G., Koch, J., Manfreda, S., Caylor, K., & Francés, F. (2017). Calibration of a parsimonious distributed ecohydrological daily model in a data–scarce basin by exclusively using the spatio–temporal variation of NDVI. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6235–6251. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-6235-2017>

Sánchez–García, E., Abia, I., Domínguez, M., Voces, J., Sánchez, J. C., Navascués, B., Rodríguez–Camino, E., Garrido, M. N., García, M. C., Pastor, F., Dimas, M., Barranco, L., & Portal, C. R. del. (2022). Apoyo a la gestión de embalses – Agencia Estatal de Meteorología – AEMET. Gobierno de España. *Climate Services*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100281>

Vitart, F., & Brown, A. (2019). *Pronósticos subestacionales a estacionales: hacia una predicción sin discontinuidad* | Organización Meteorológica Mun–

dial. Boletín de La OMM 68 (1) – 2019.
<https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/pron%C3%B3sticos-subestacionales-estacionales-hacia-una-predicci%C3%B3n-sin-discontinuidad>

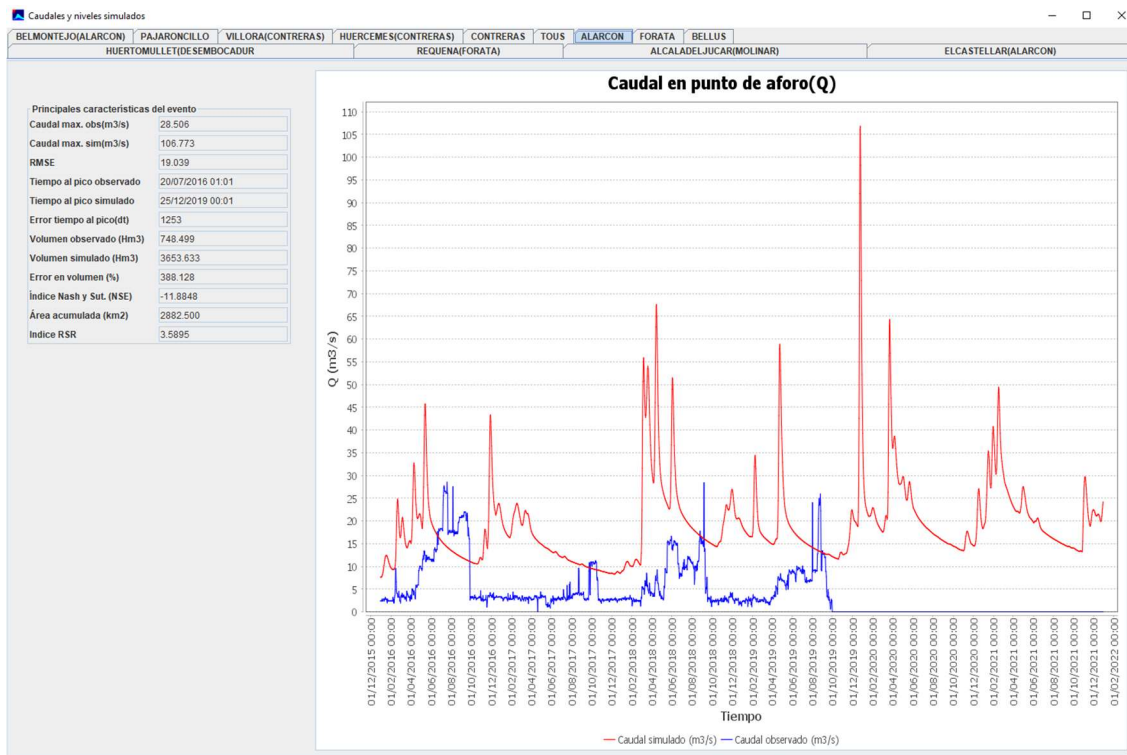
- Vitart, F., & Robertson, A. W. (2018). The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. *Npj Climate and Atmospheric Science* 2018 1:1, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0013-0>
- White, C. J., Carlsen, H., Robertson, A. W., Klein, R. J. T., Lazo, J. K., Kumar, A., Vitart, F., Coughlan de Perez, E., Ray, A. J., Murray, V., Bharwani, S., MacLeod, D., James, R., Fleming, L., Morse, A. P., Eggen, B., Graham, R., Kjellström, E., Becker, E., ... Zebiak, S. E. (2017). Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Meteorological Applications*, 24(3), 315–325. <https://doi.org/10.1002/MET.1654>
- White, C. J., Domeisen, D. I. v., Acharya, N., Adefisan, E. A., Anderson, M. L., Aura, S., Balogun, A. A., Bertram, D., Bluhm, S., Brayshaw, D. J., Browell, J., Büeler, D., Charlton-Perez, A., Chourio, X., Christel, I., Coelho, C. A. S., DeFlorio, M. J., Monache, L. D., Giuseppe, F. di, ... Wilson, R. G. (2022). Advances in the Application and Utility of Subseasonal-to-Seasonal Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(6), E1448–E1472. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0224.1>
- White, C. J., Franks, S. W., & McEvoy, D. (2015). Using subseasonal-to-seasonal (S2S) extreme rainfall forecasts for extended-range flood prediction in Australia. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 370, 229–234. <https://doi.org/10.5194/PIAHS-370-229-2015>
- World Meteorological Organization. (2021). *Guidelines on Ensemble Prediction System Postprocessing*.



ANEXOS

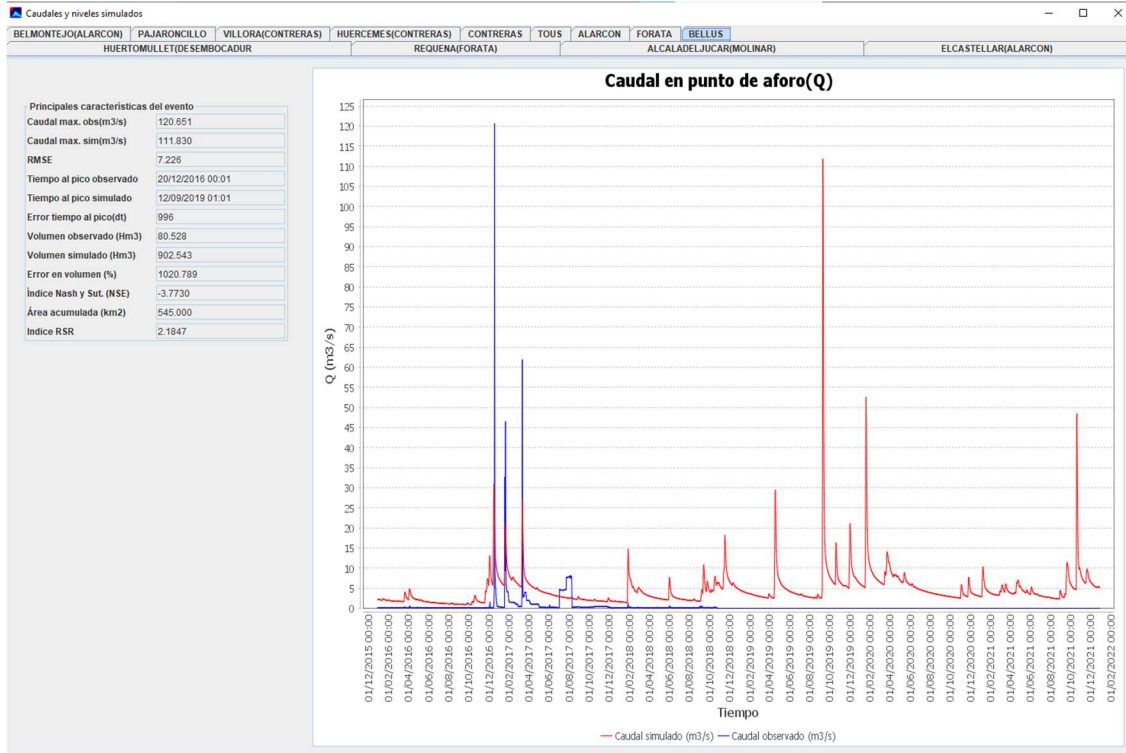
ANEXO I HIDROGRAMAS PARA EMBALSES DE INTERÉS

Alarcon

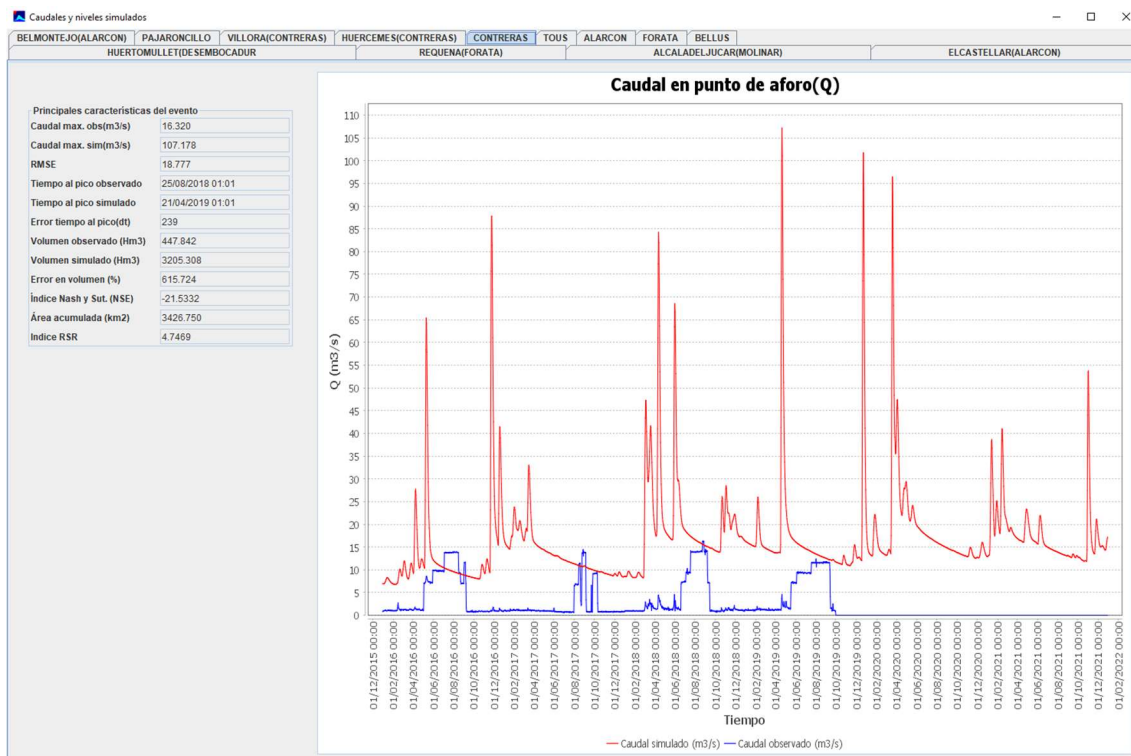




Bellús

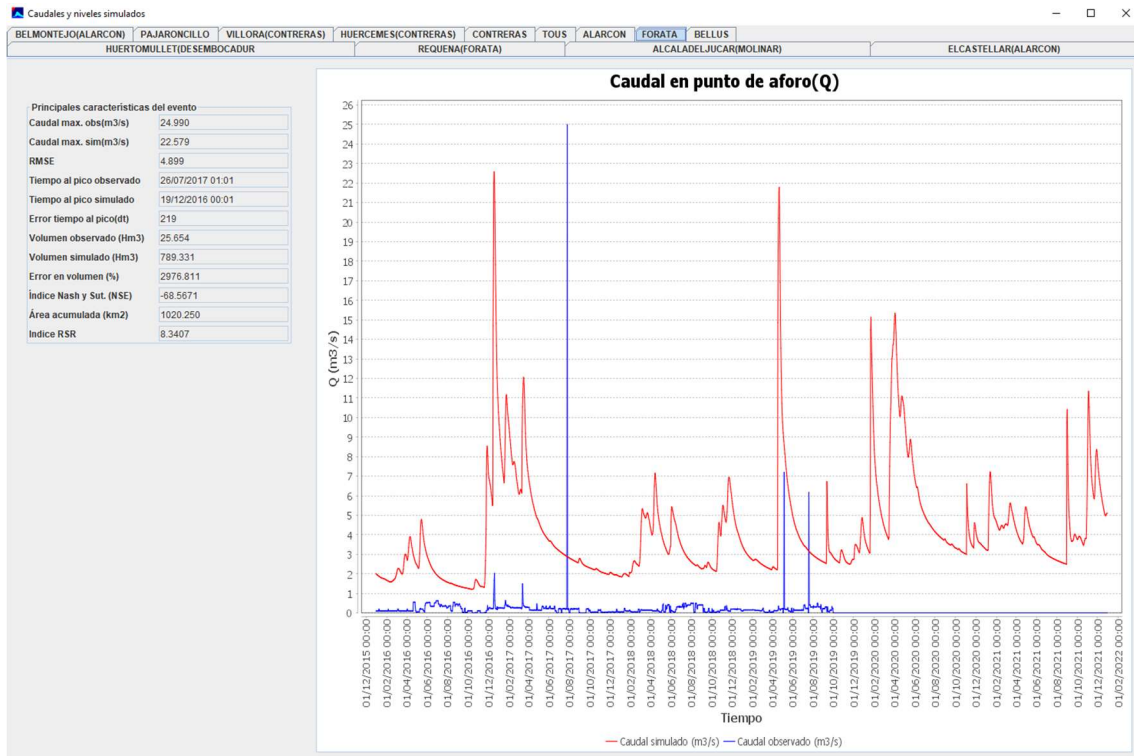


Contreras

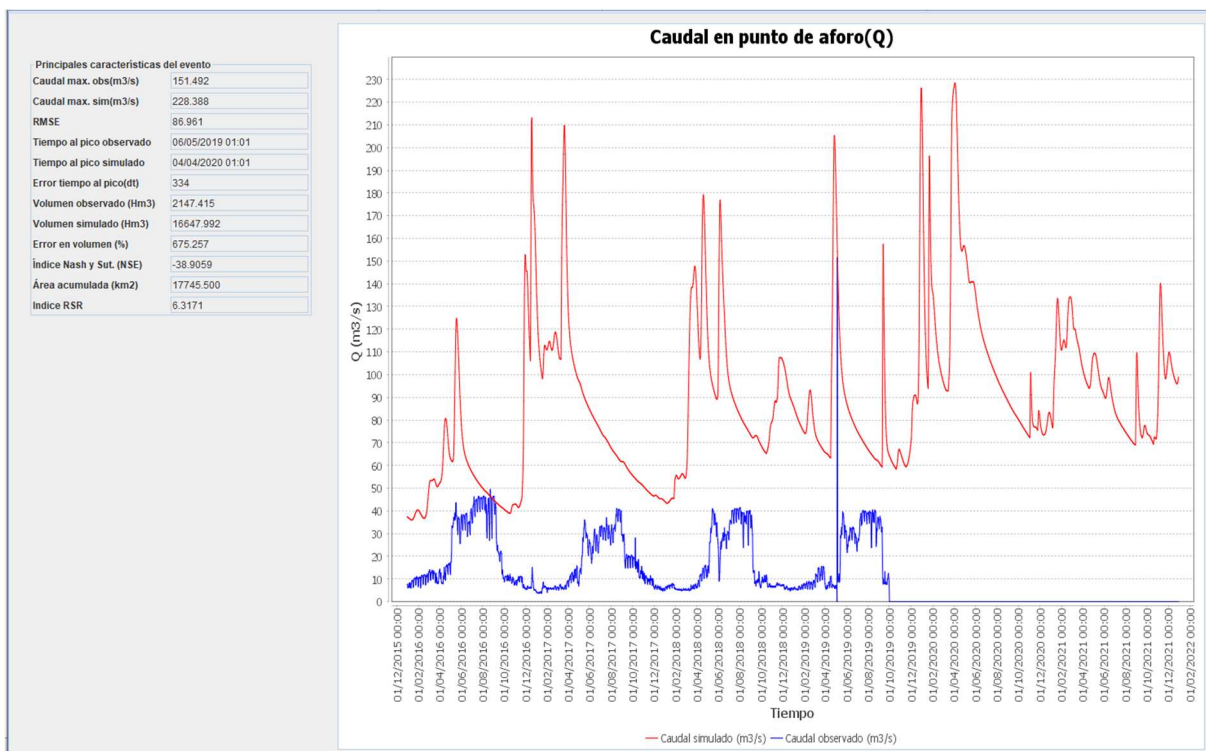




Forata



Tous

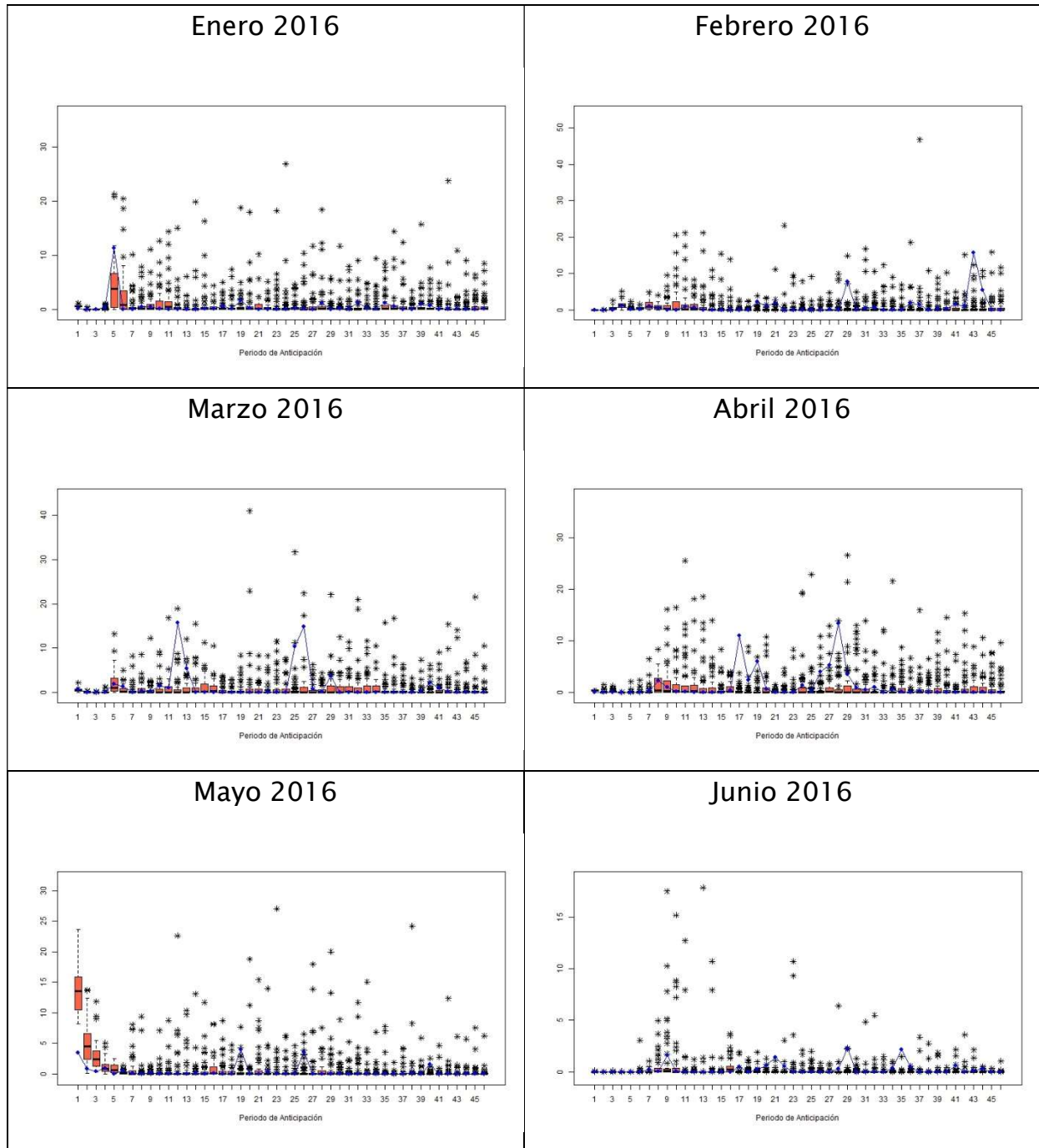


ANEXO II DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES, Y DIAGRAMAS DE VIOLÍN PARA VARIABLES METEOROLÓGICAS

Precipitación

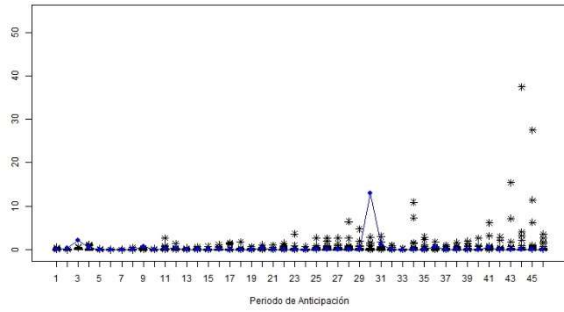
Predicciones brutas

- Diagramas de cajas y bigotes

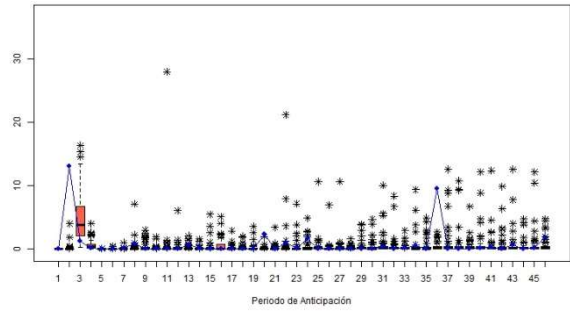




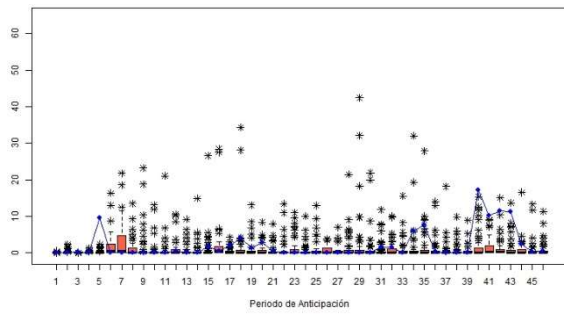
Julio 2016



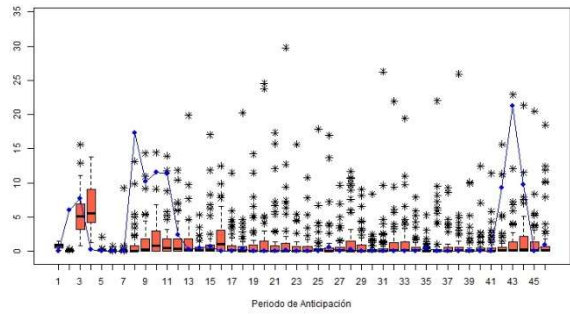
Agosto 2016



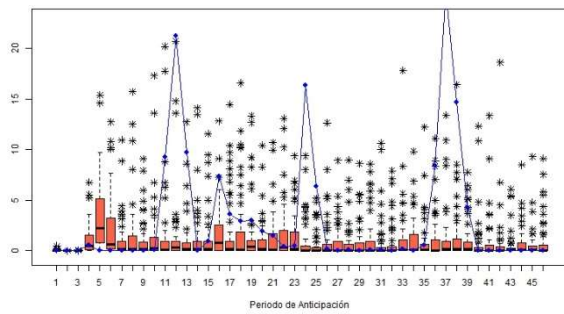
Septiembre 2016



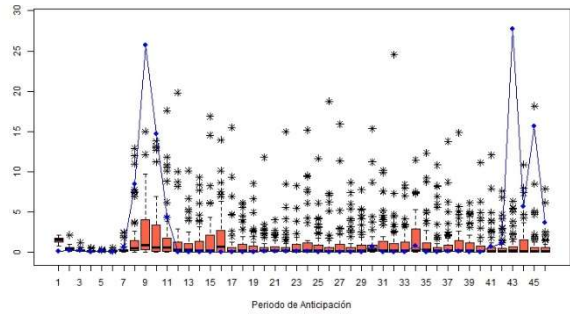
Octubre 2016



Noviembre 2016

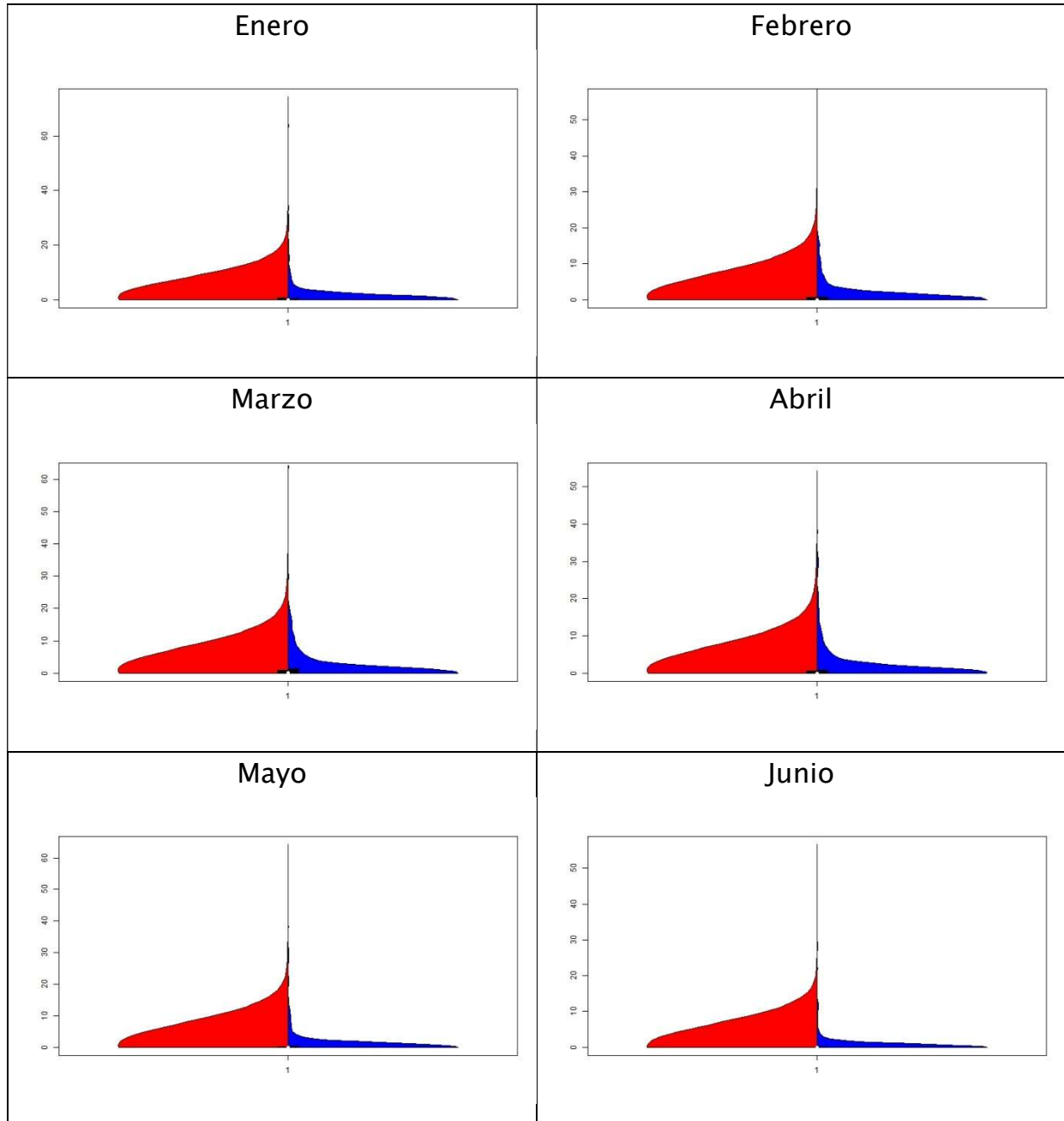


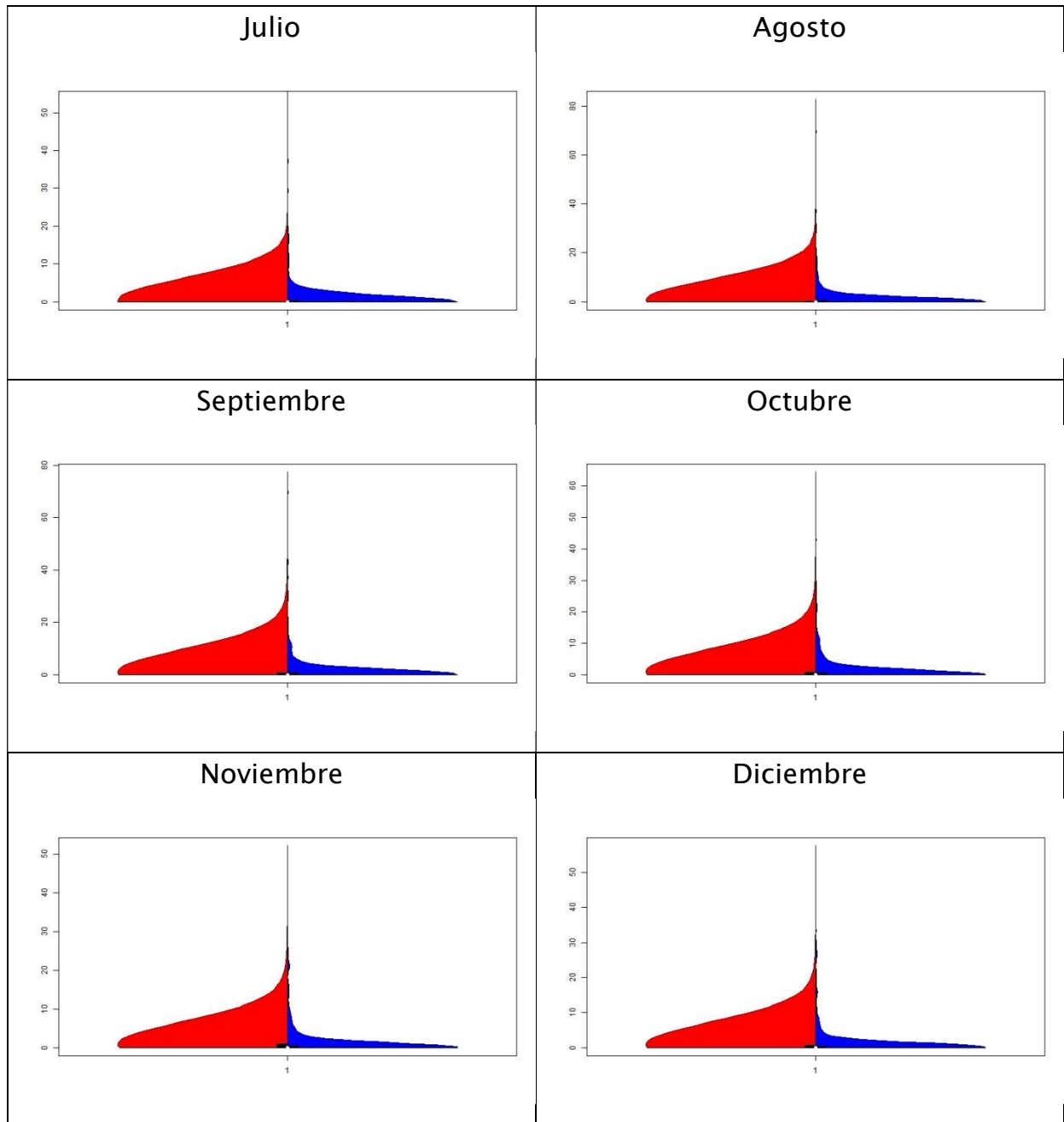
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

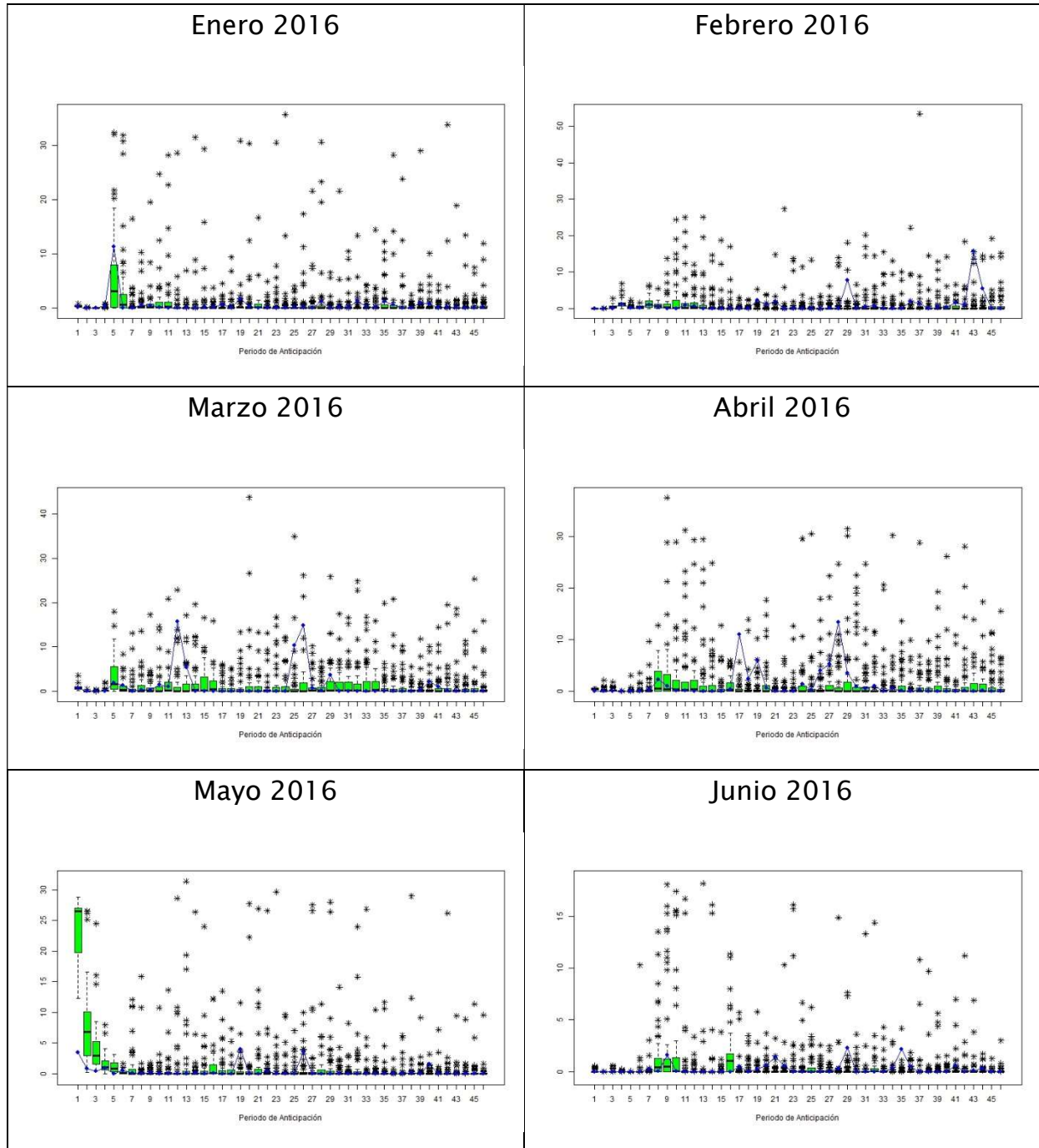






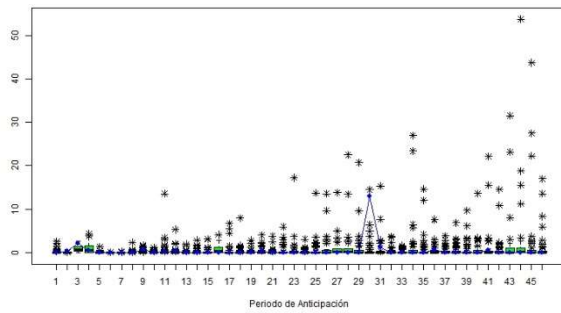
Predicciones corregidas por mes

- Diagramas de cajas y bigotes

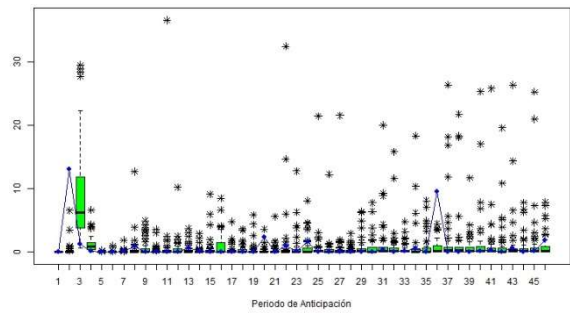




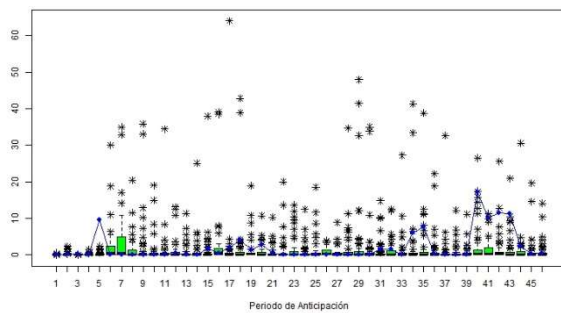
Julio 2016



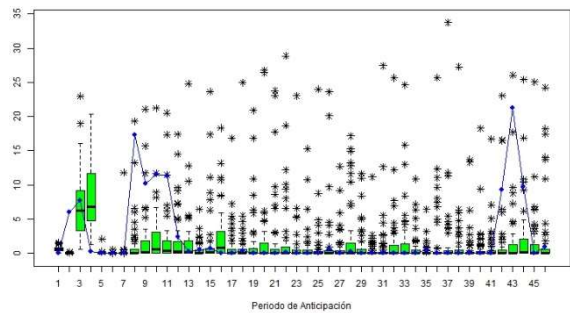
Agosto 2016



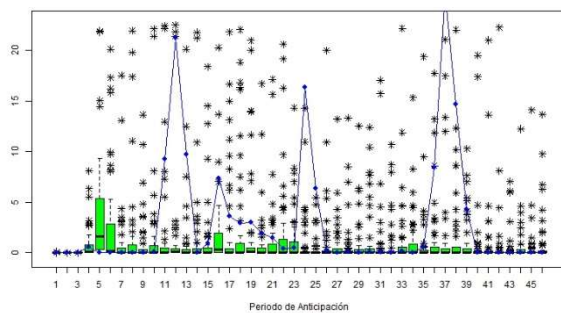
Septiembre 2016



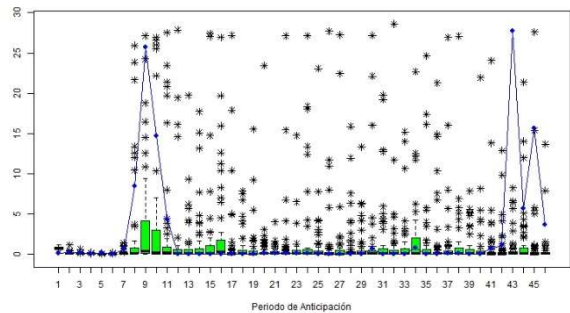
Octubre 2016



Noviembre 2016

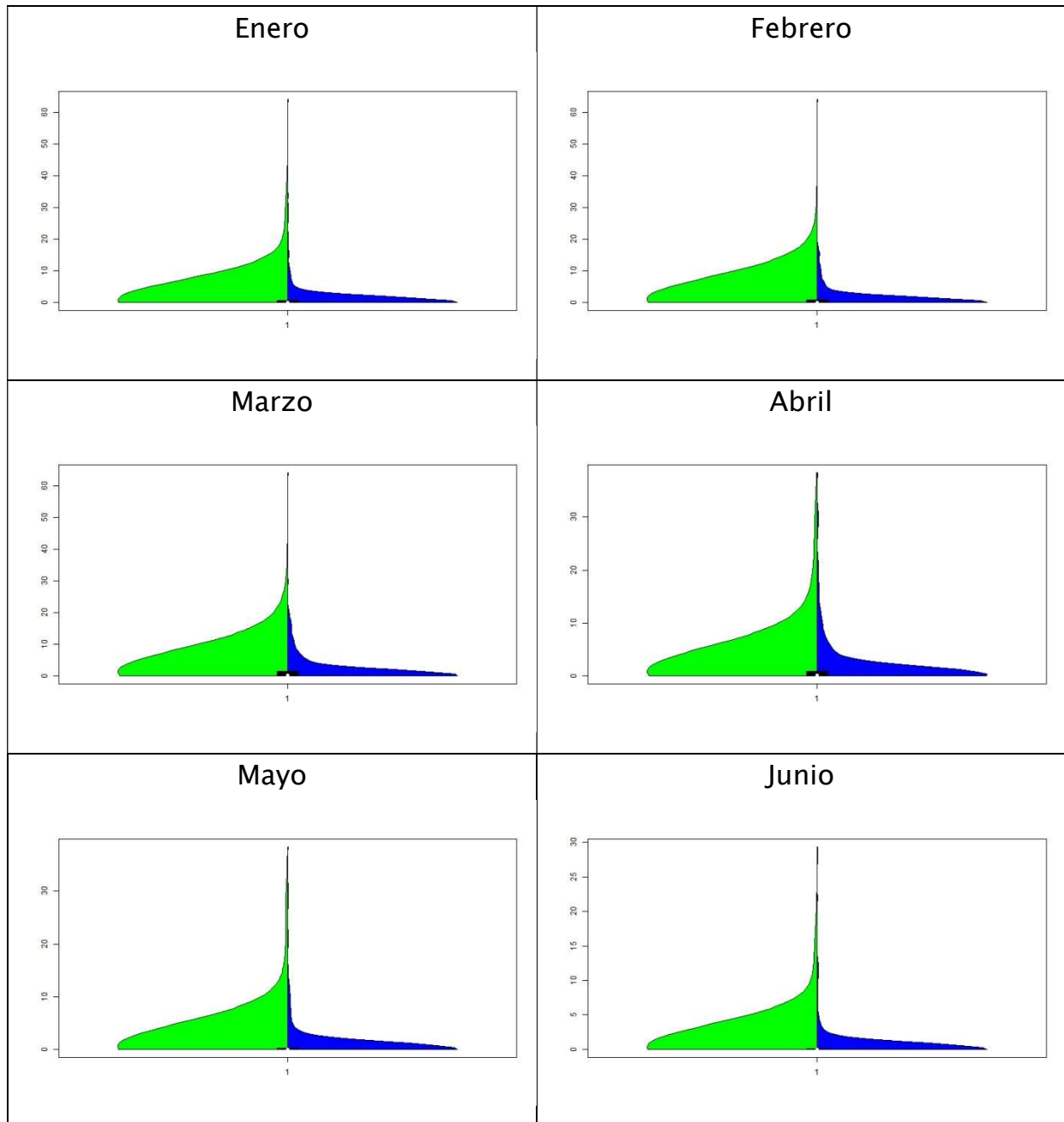


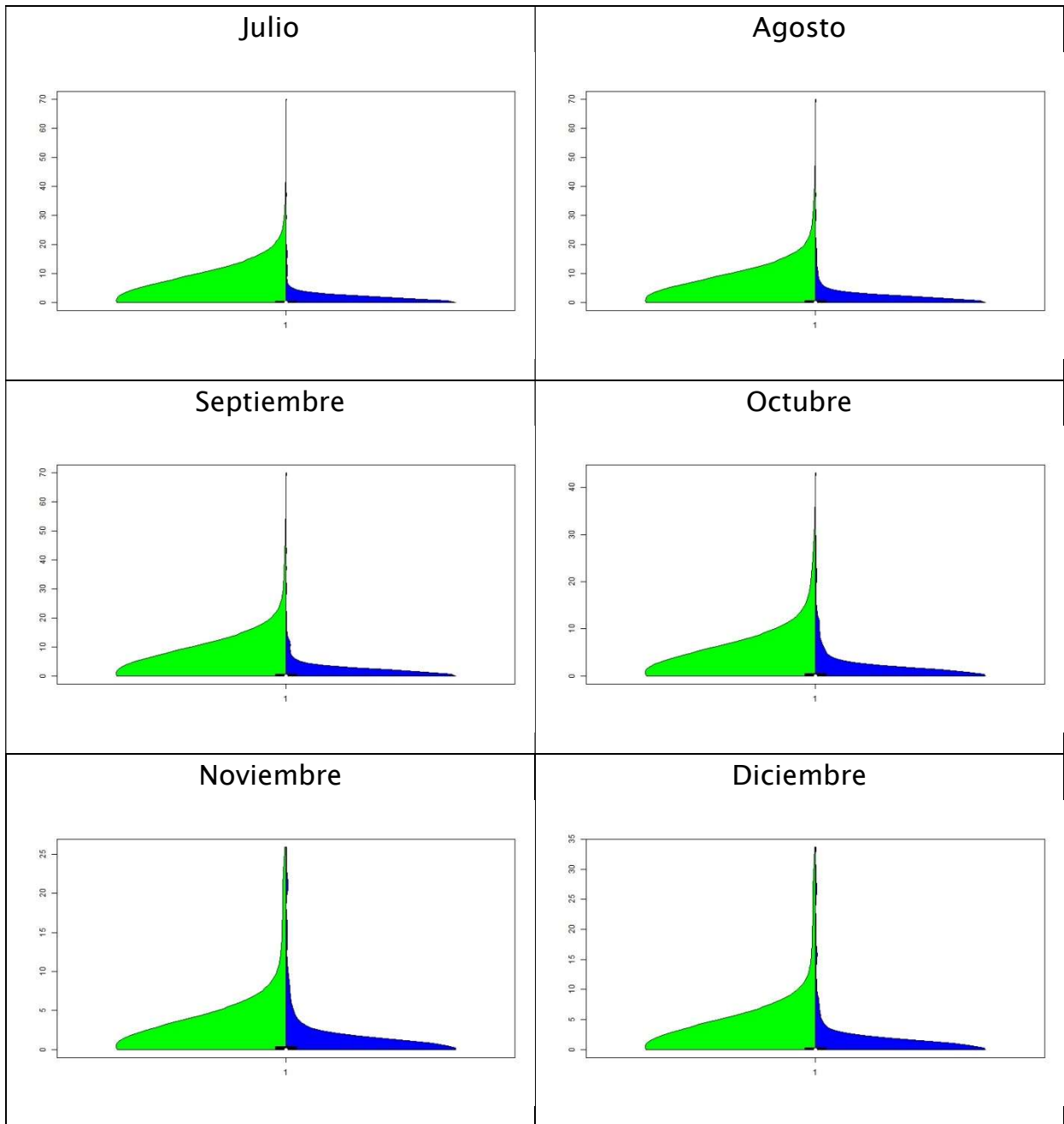
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

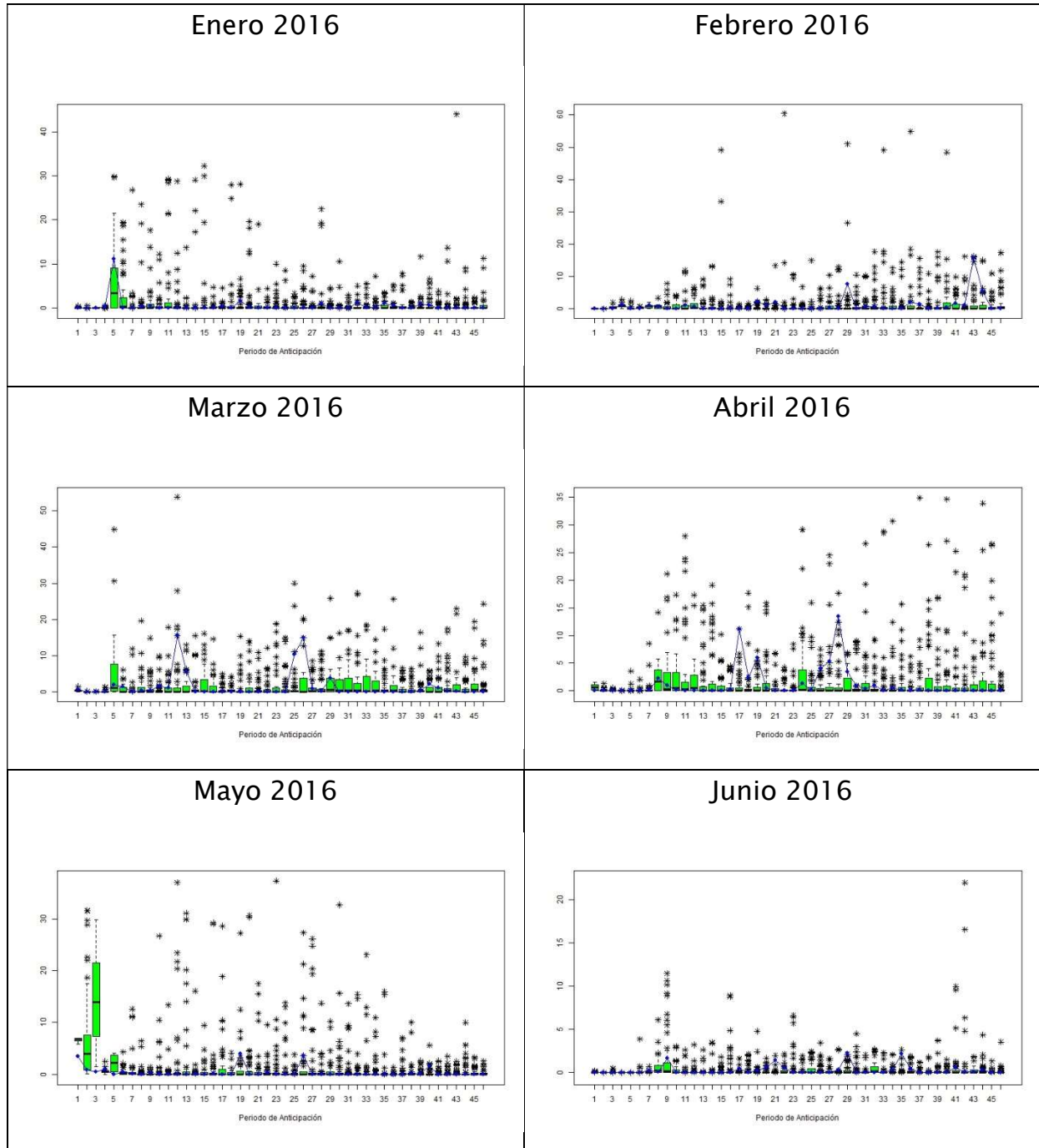






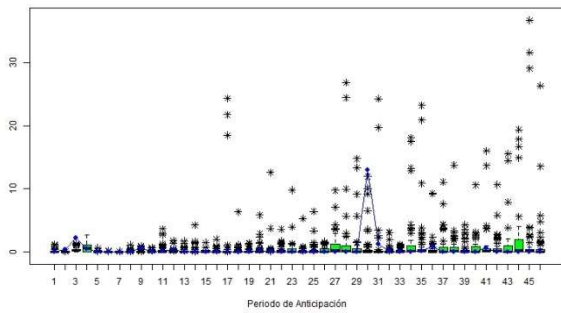
Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

- Diagramas de cajas y bigotes

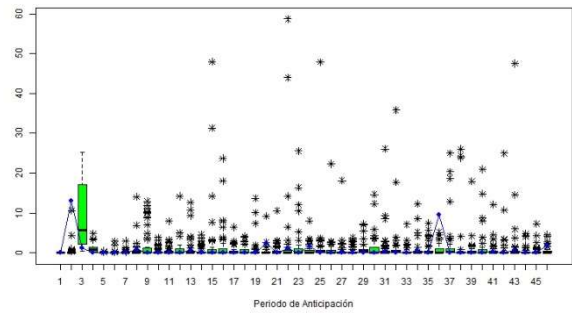




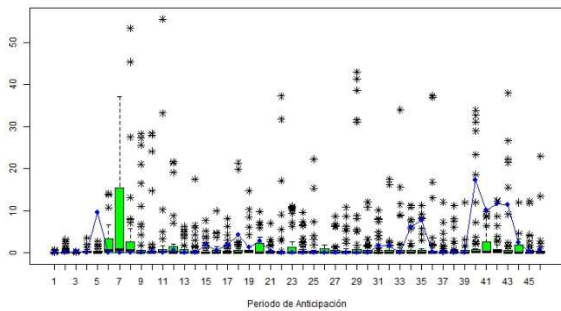
Julio 2016



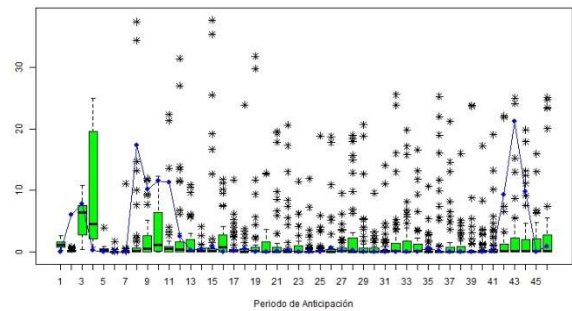
Agosto 2016



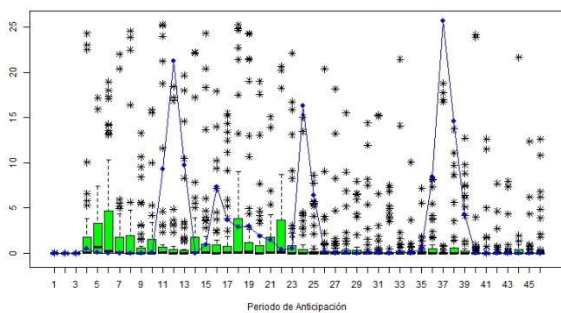
Septiembre 2016



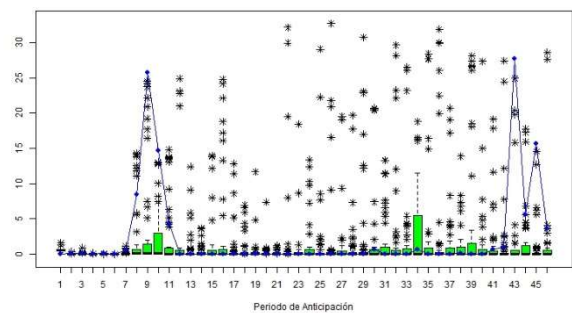
Octubre 2016



Noviembre 2016

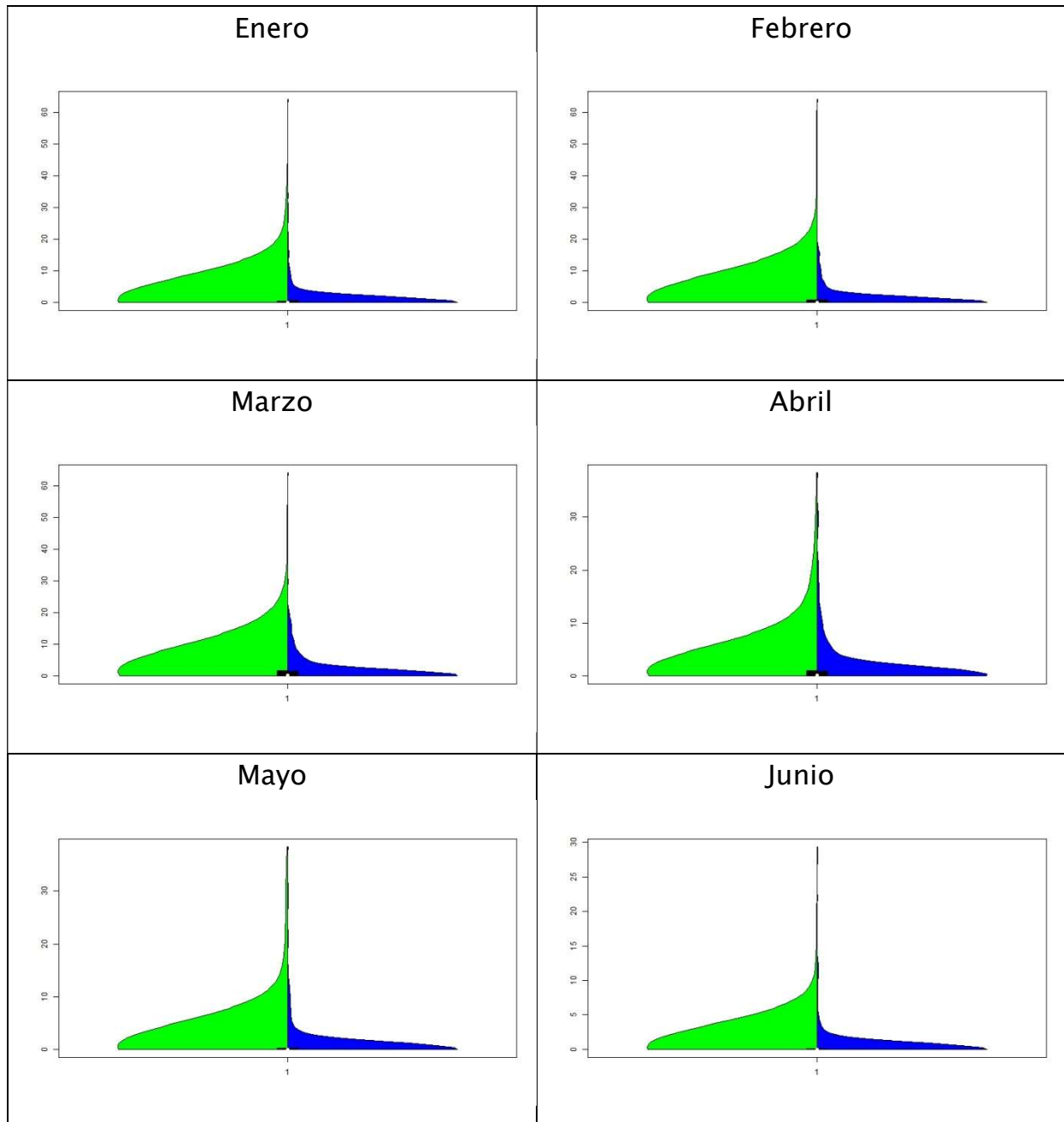


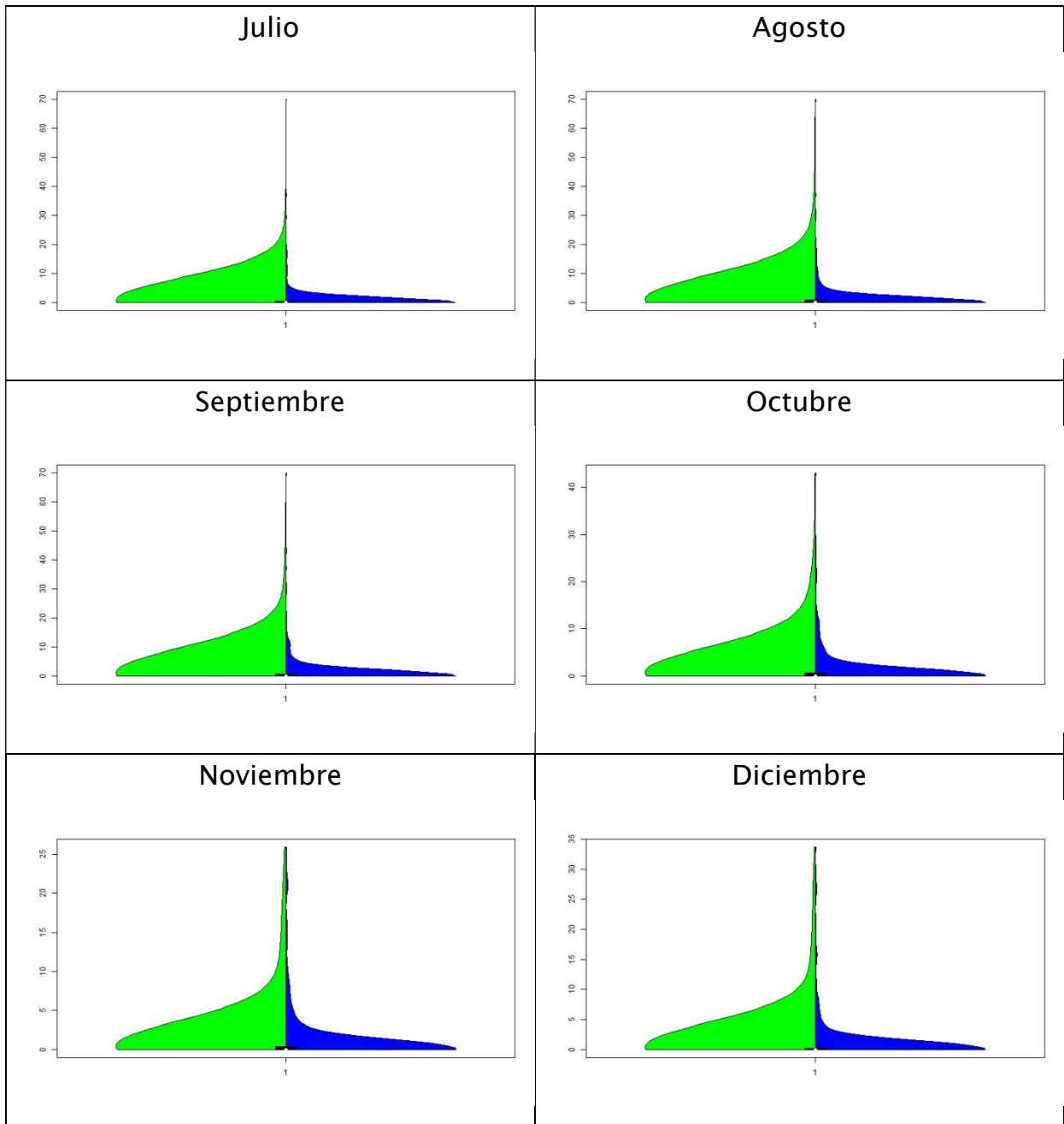
Diciembre 2016





- Diagramas de violín



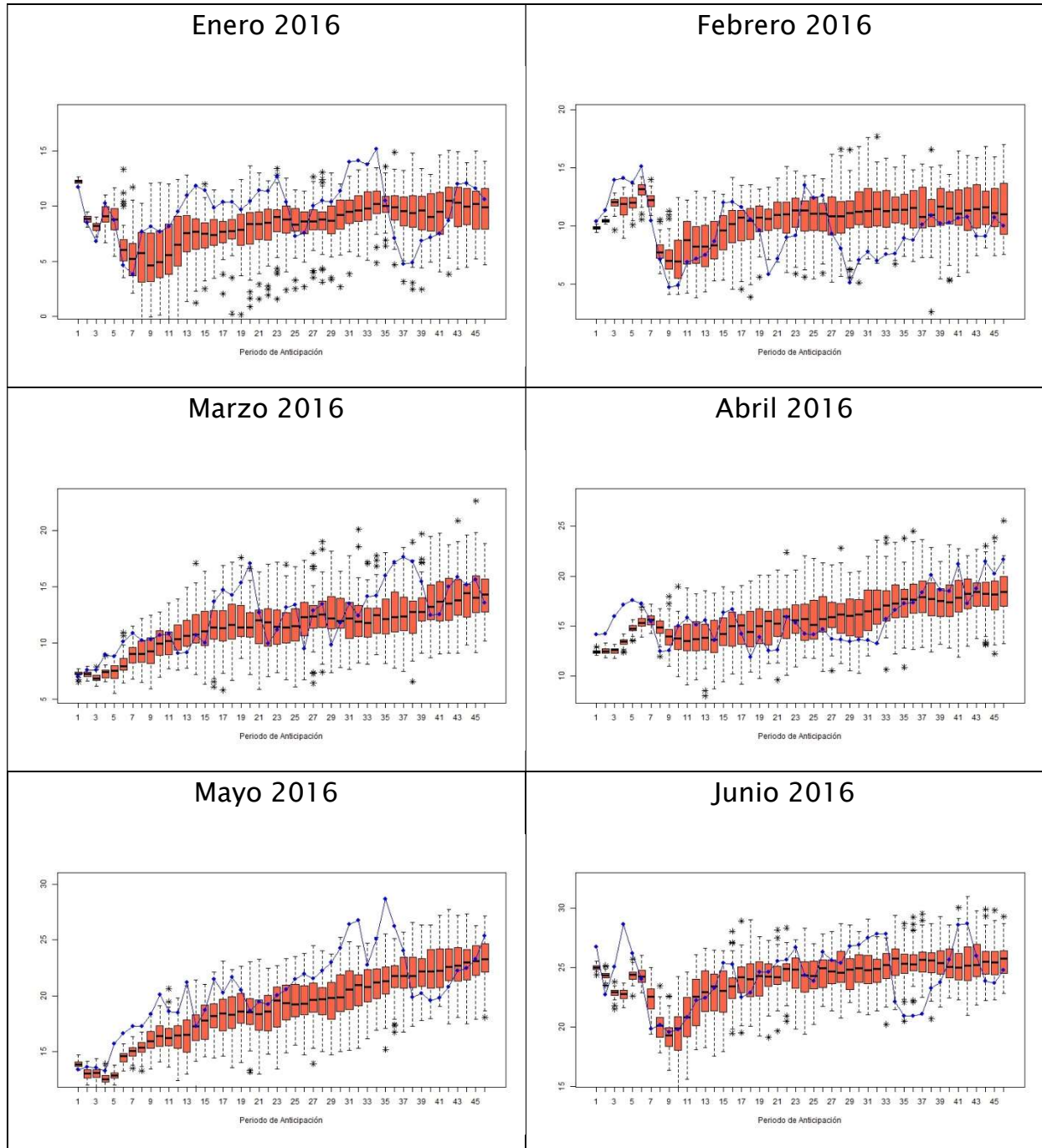




Temperatura Media

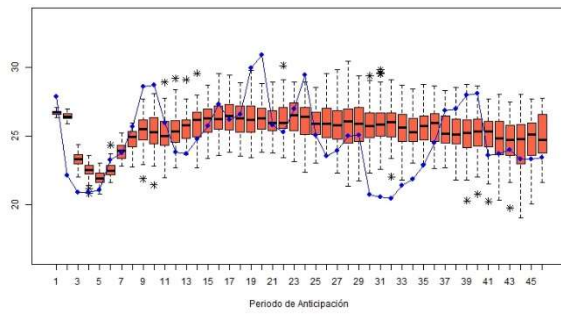
Predicciones brutas

- Diagramas de cajas y bigotes

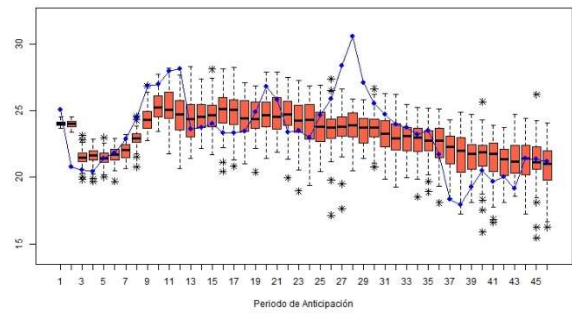




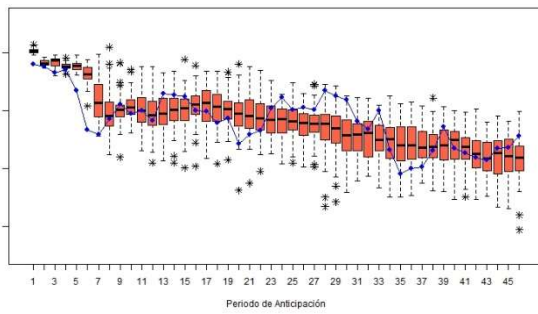
Julio 2016



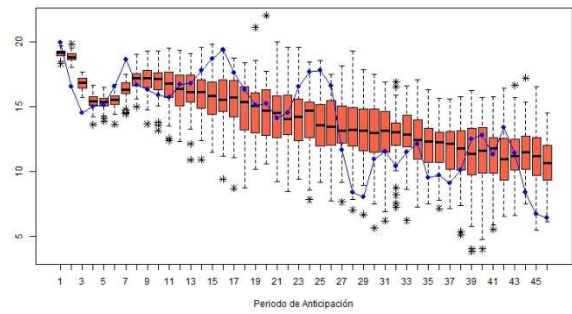
Agosto 2016



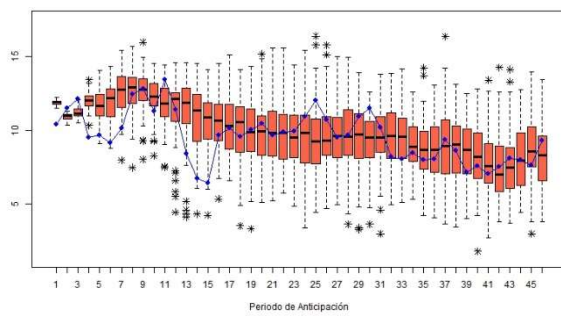
Septiembre 2016



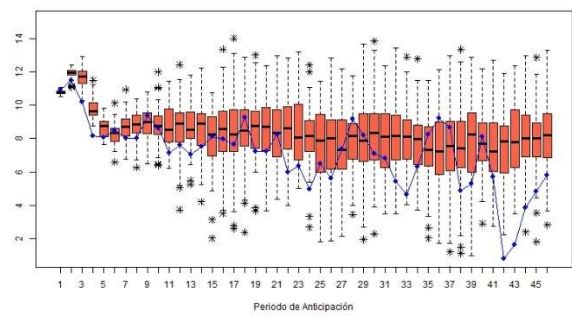
Octubre 2016



Noviembre 2016

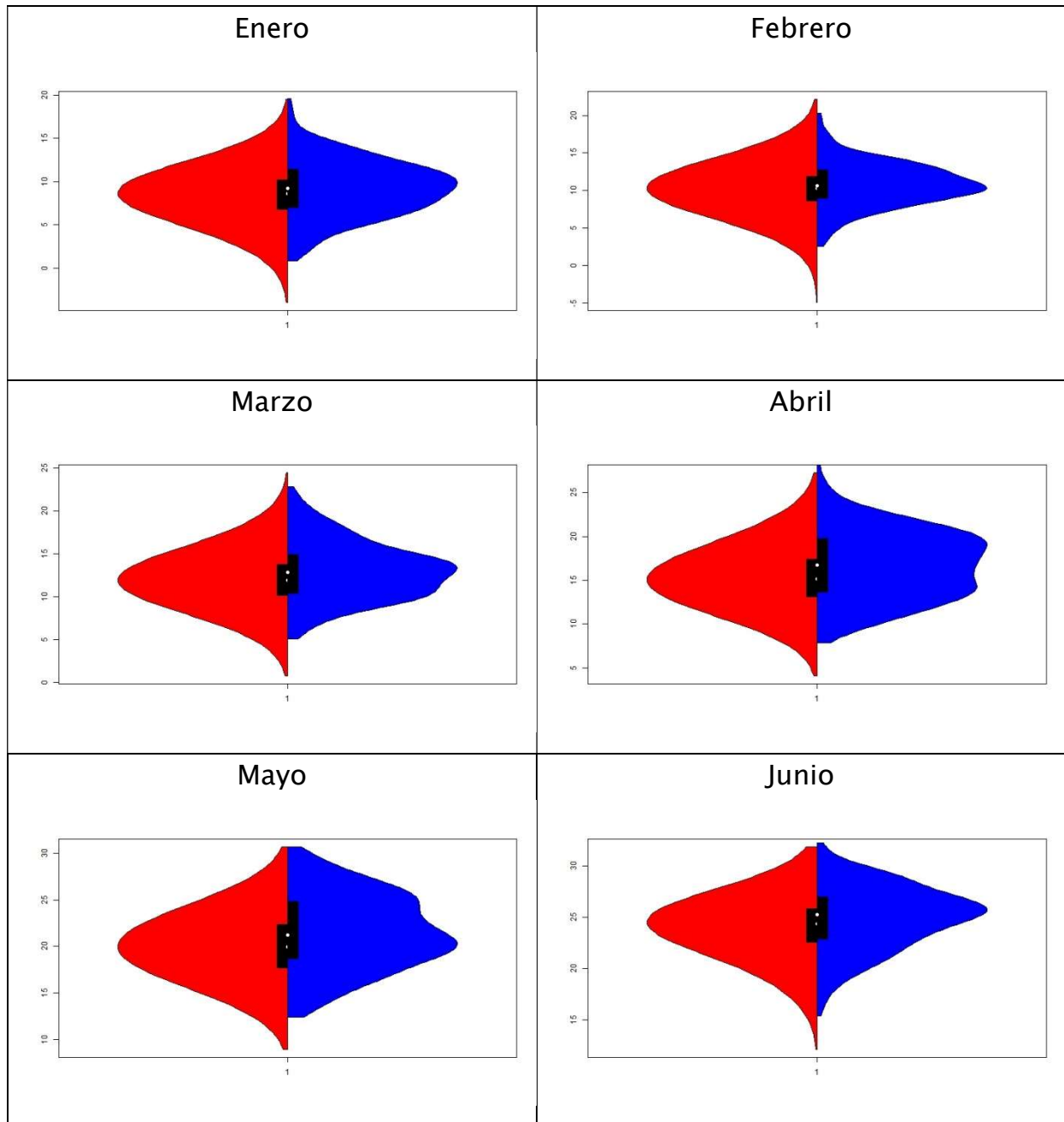


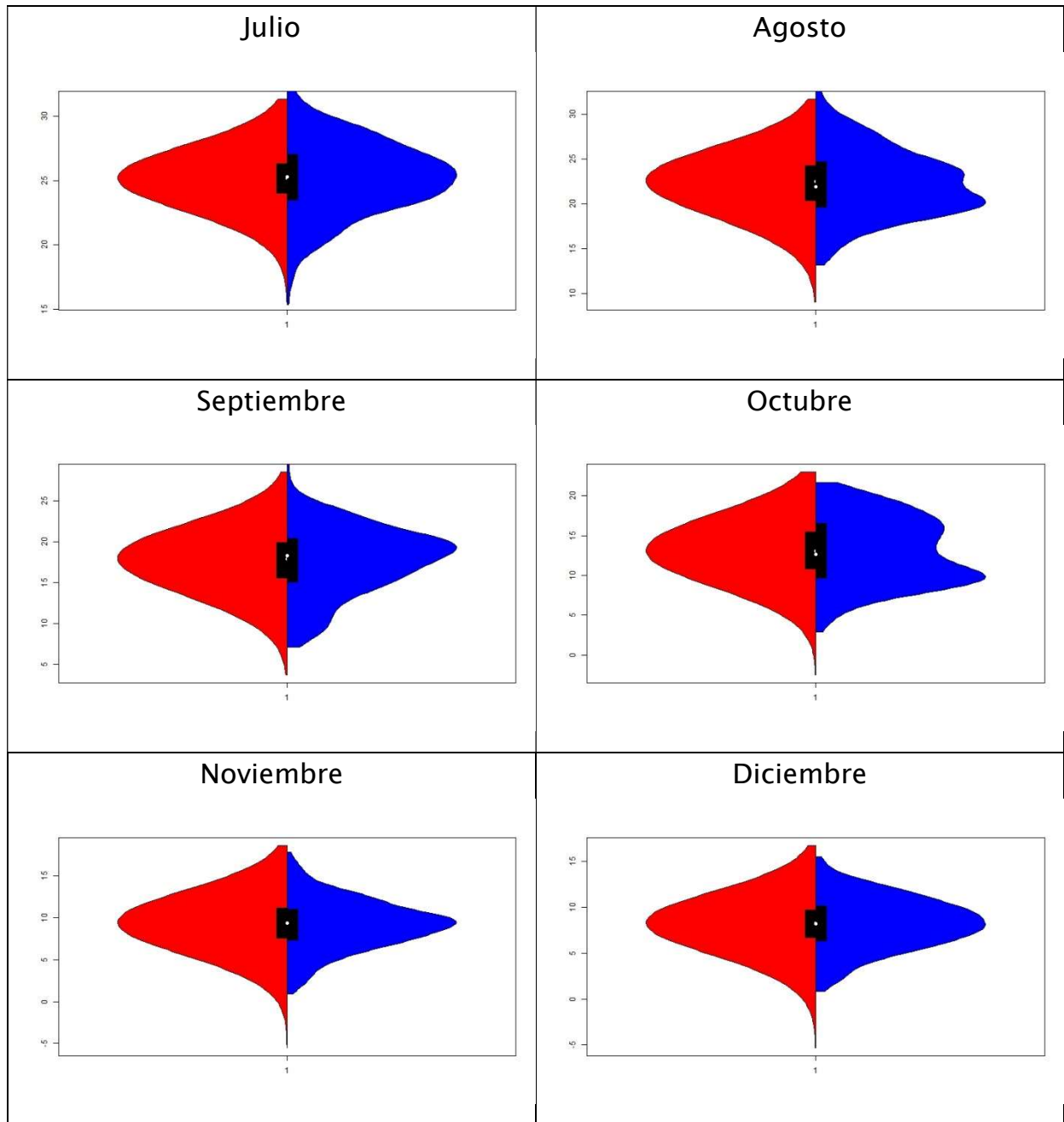
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

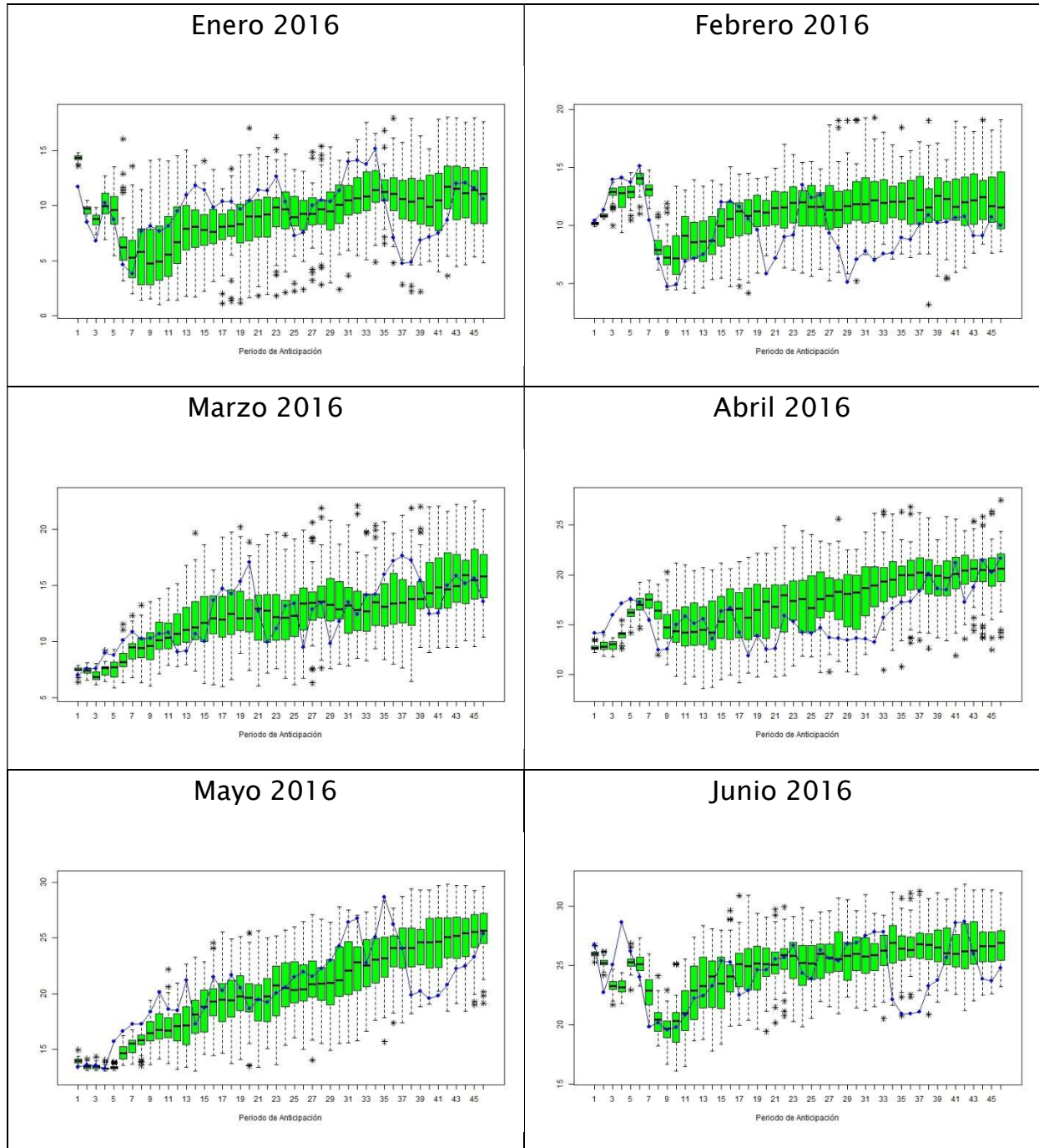






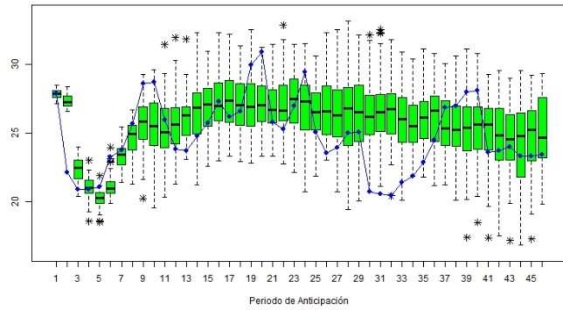
Predicciones corregidas por mes

- Diagramas de cajas y bigotes

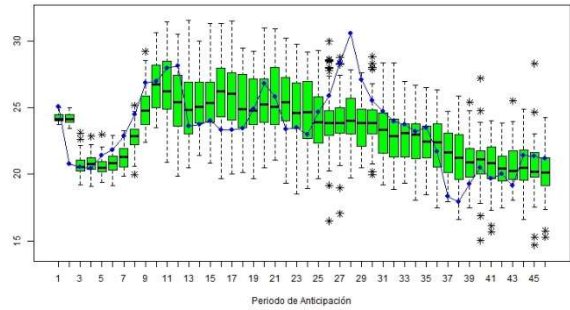




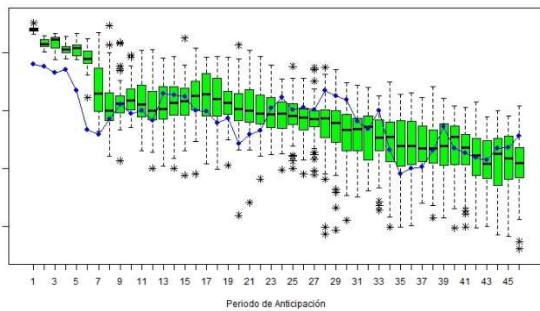
Julio 2016



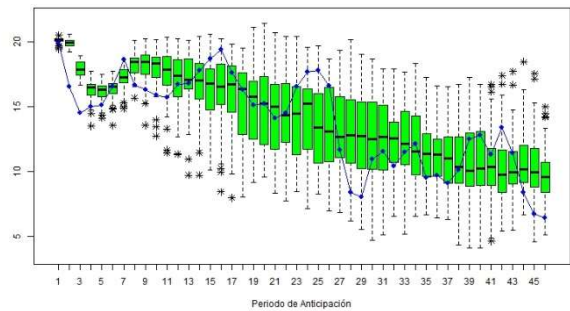
Agosto 2016



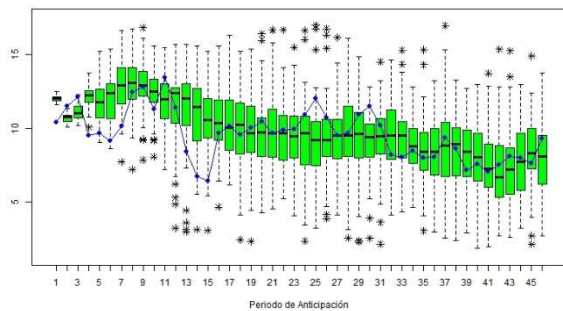
Septiembre 2016



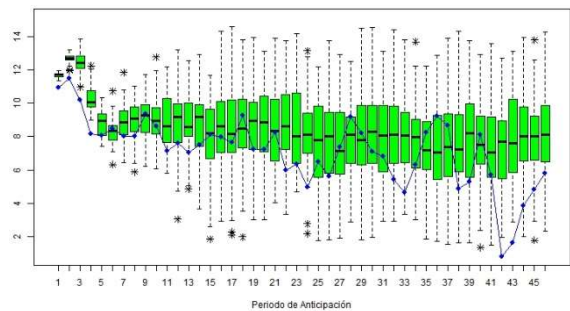
Octubre 2016



Noviembre 2016

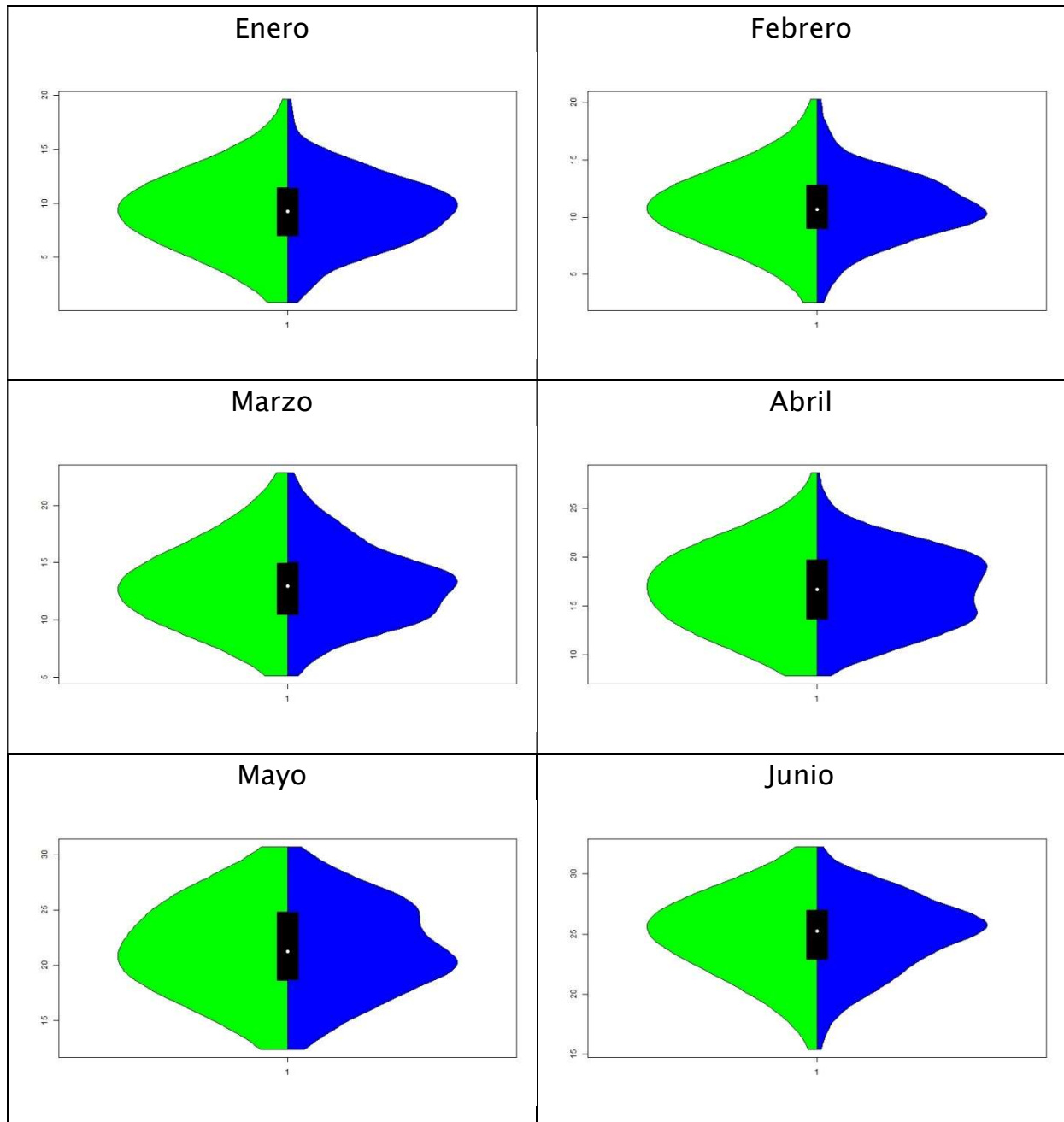


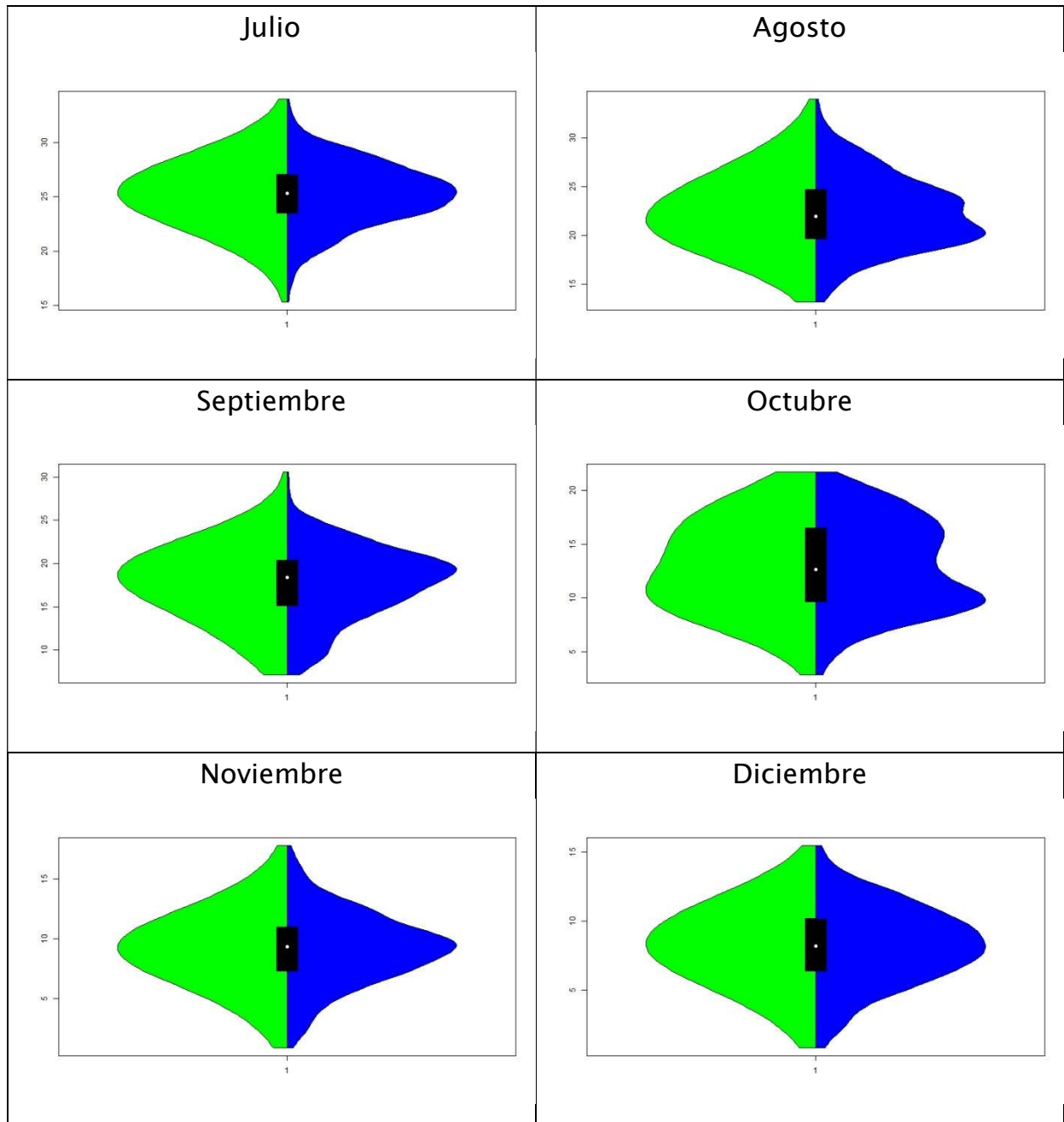
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

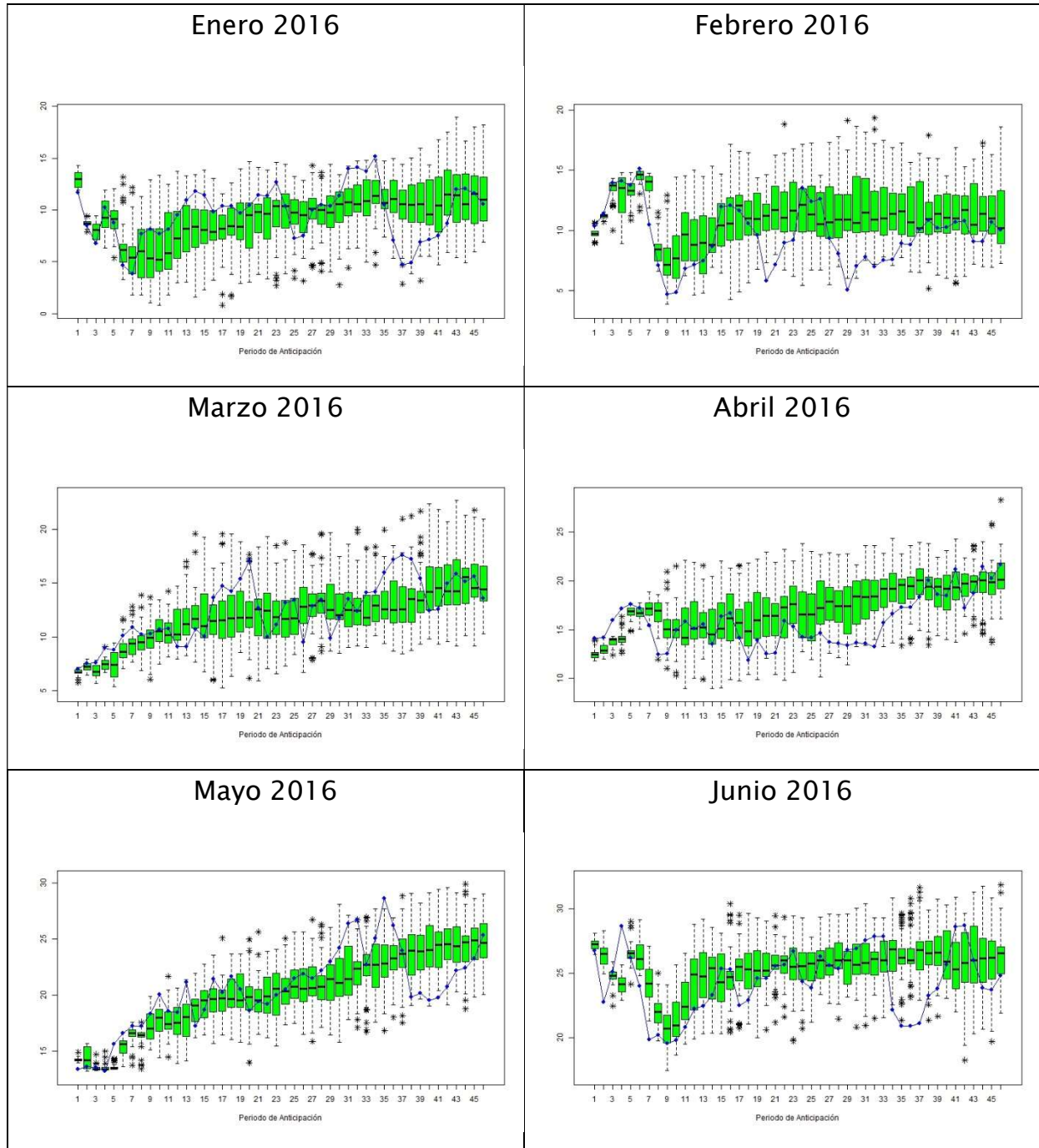






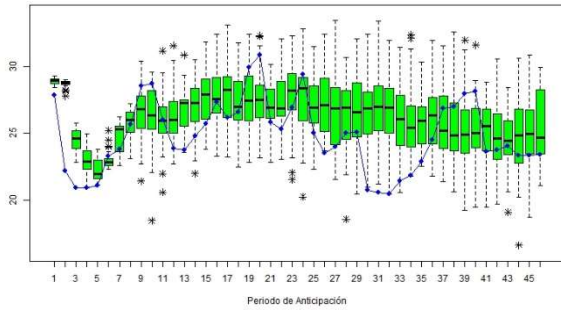
Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

- Diagramas de cajas y bigotes

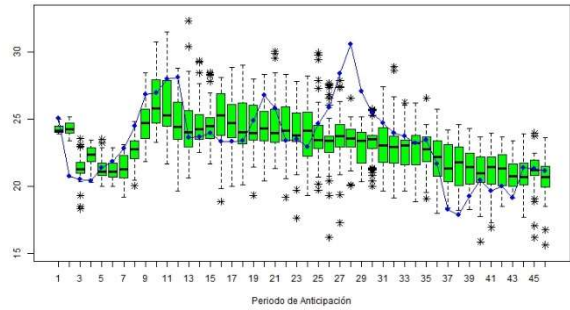




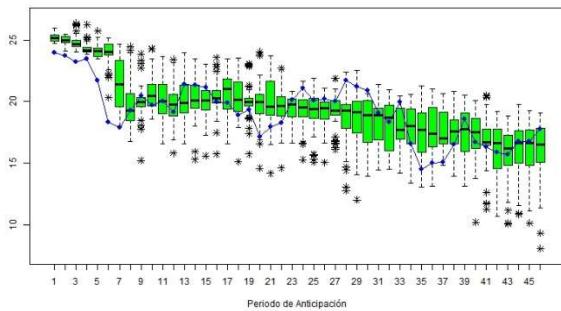
Julio 2016



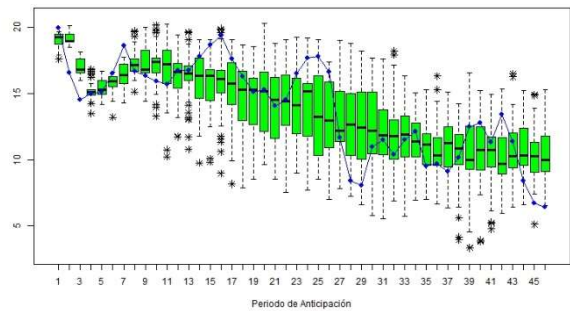
Agosto 2016



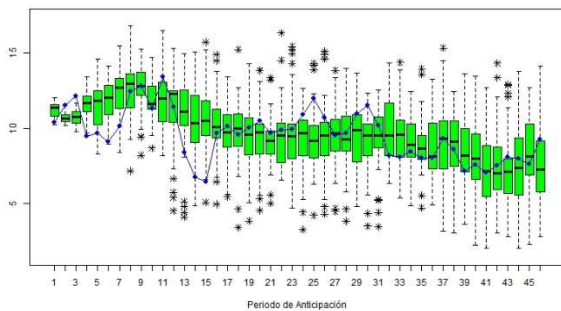
Septiembre 2016



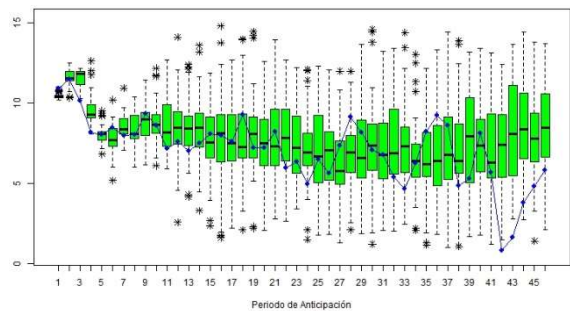
Octubre 2016



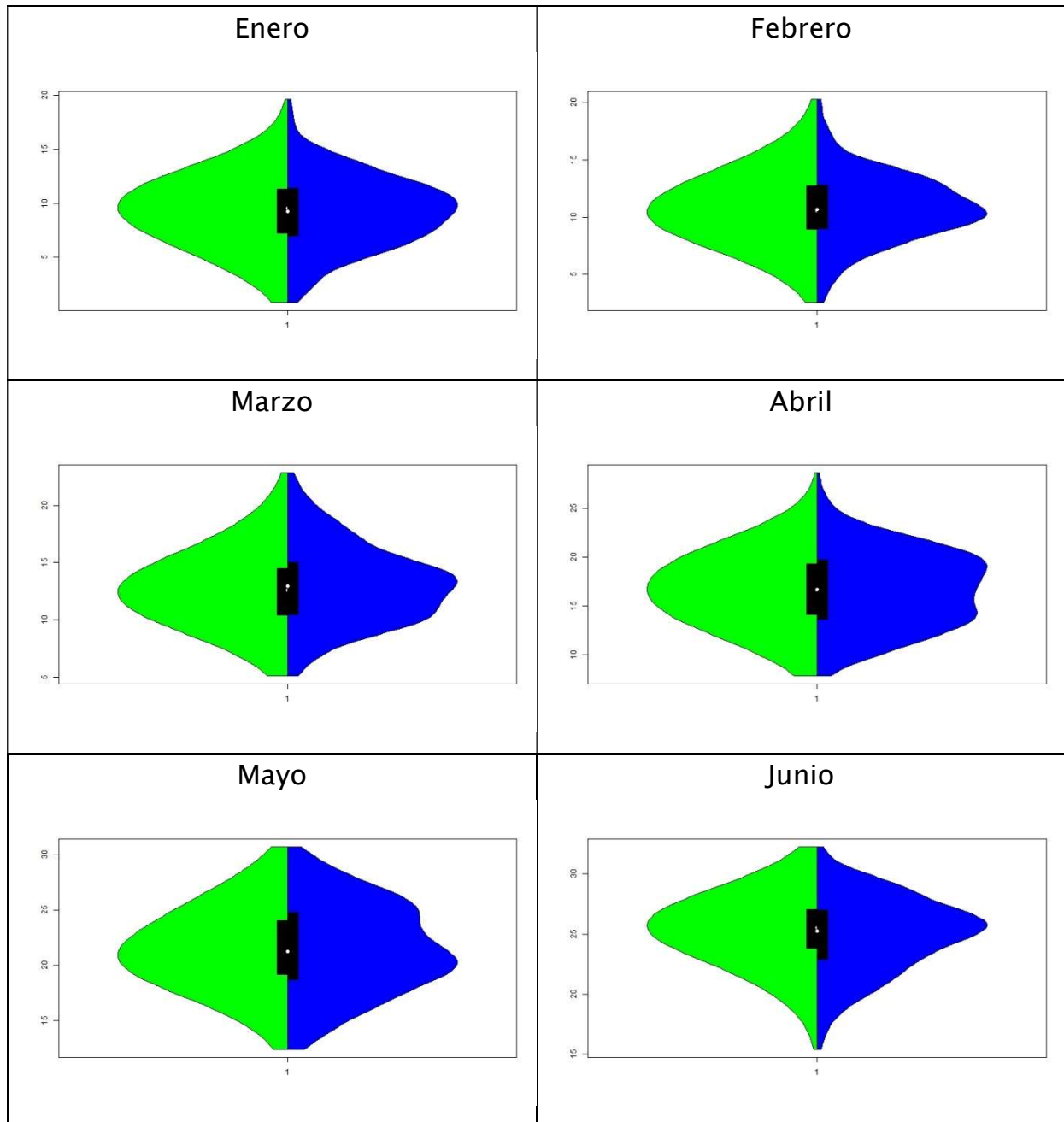
Noviembre 2016

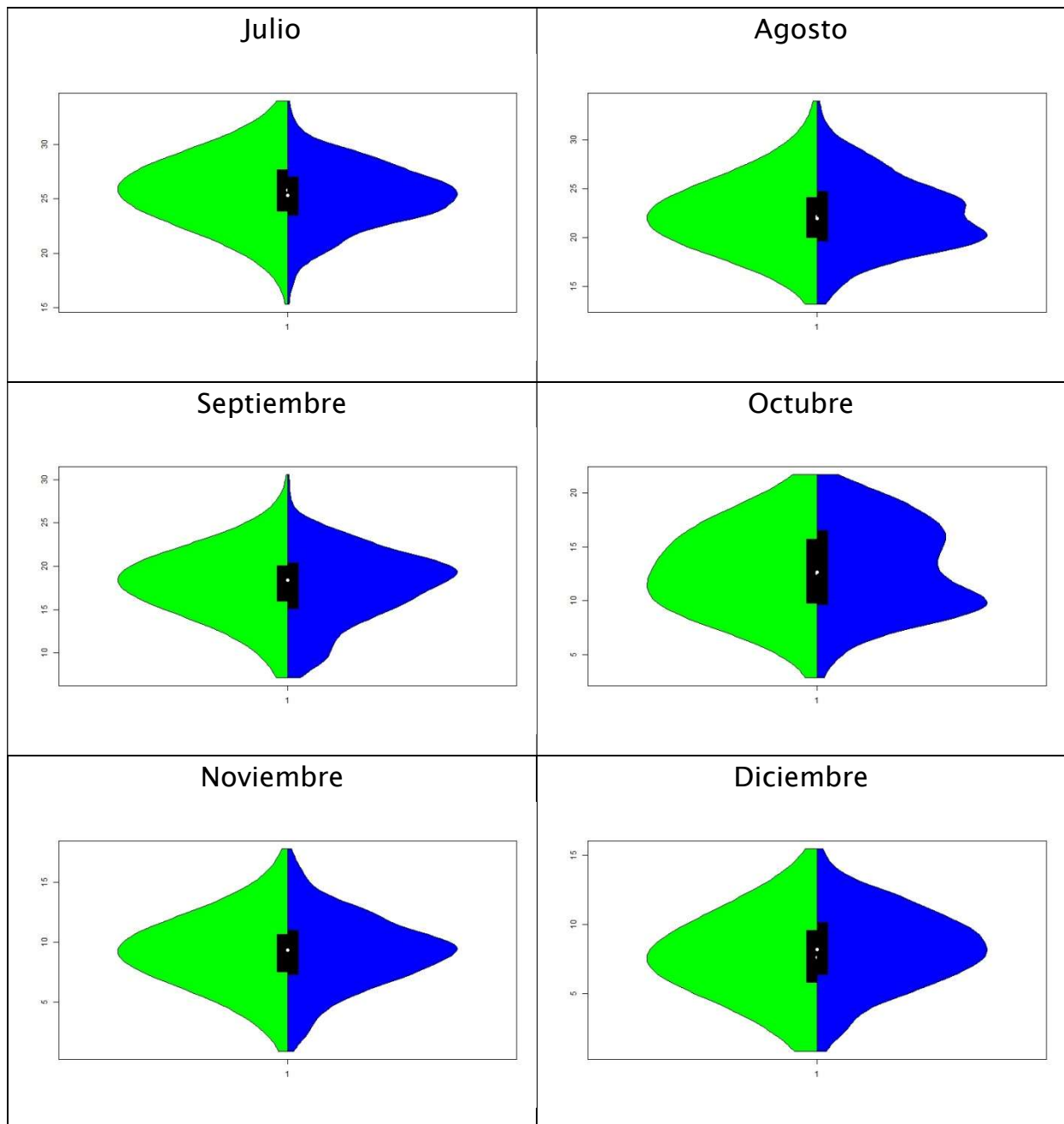


Diciembre 2016



- Diagramas de violín



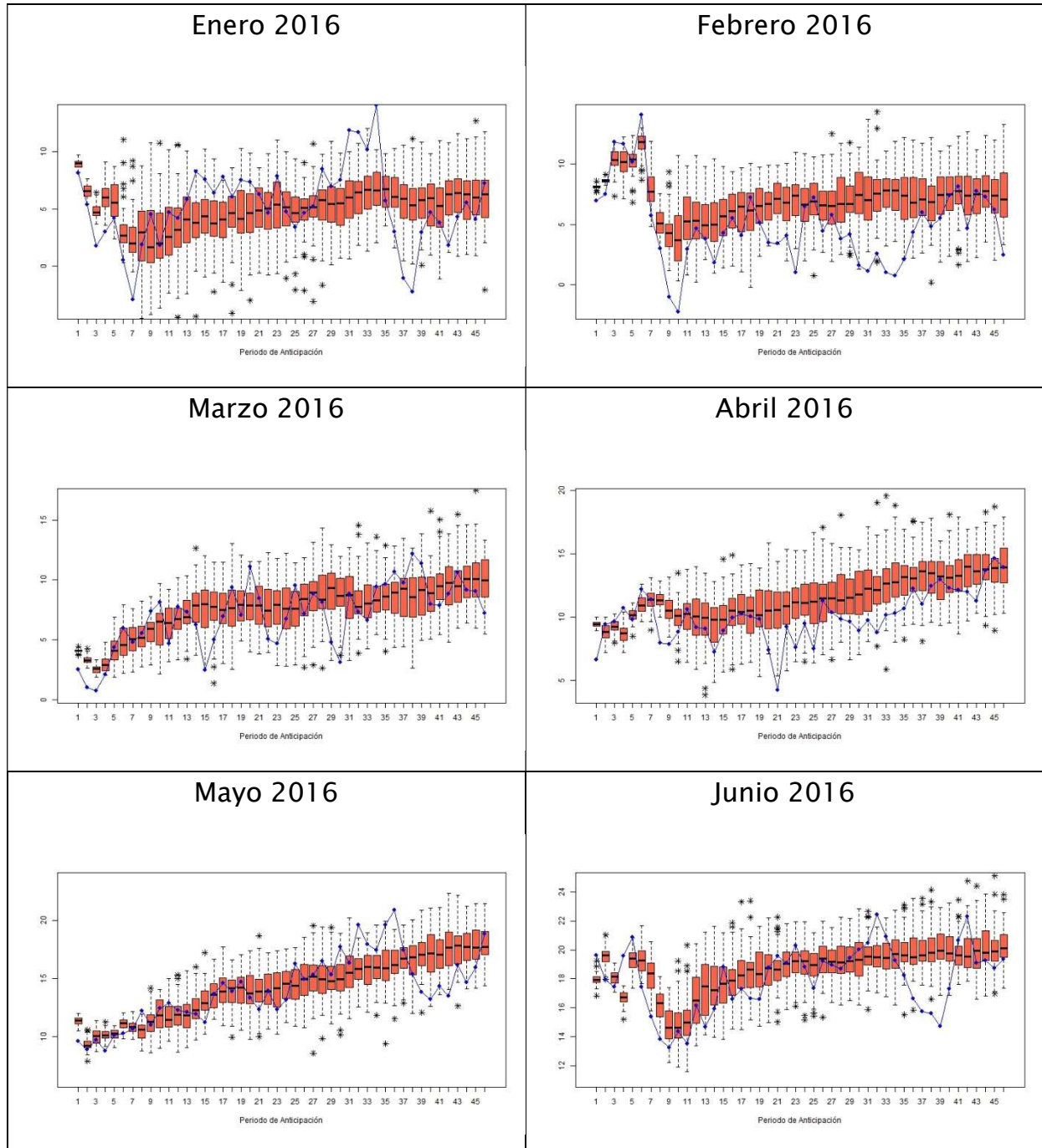




Temperatura Mínima

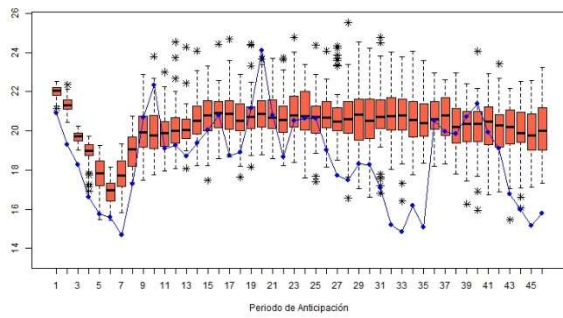
Predicciones brutas

- Diagramas de cajas y bigotes

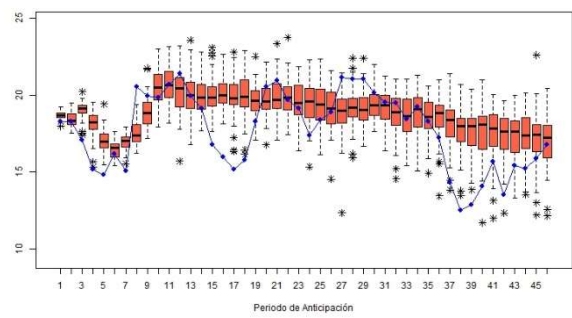




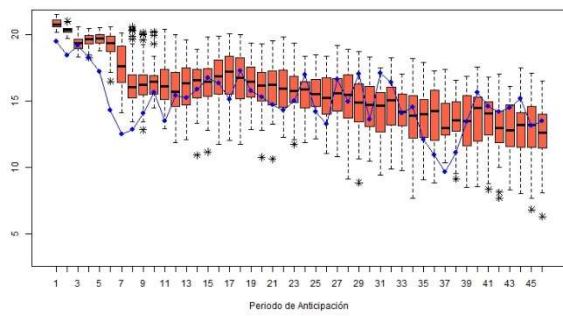
Julio 2016



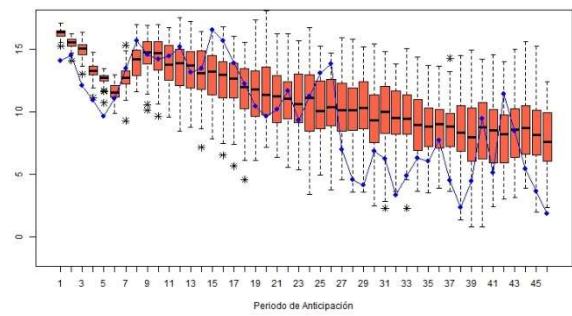
Agosto 2016



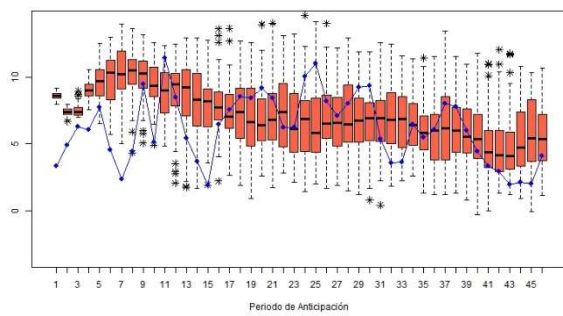
Septiembre 2016



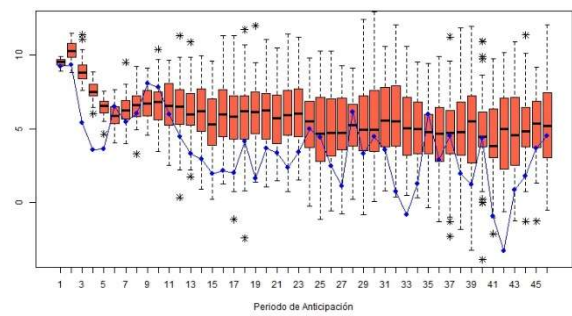
Octubre 2016



Noviembre 2016

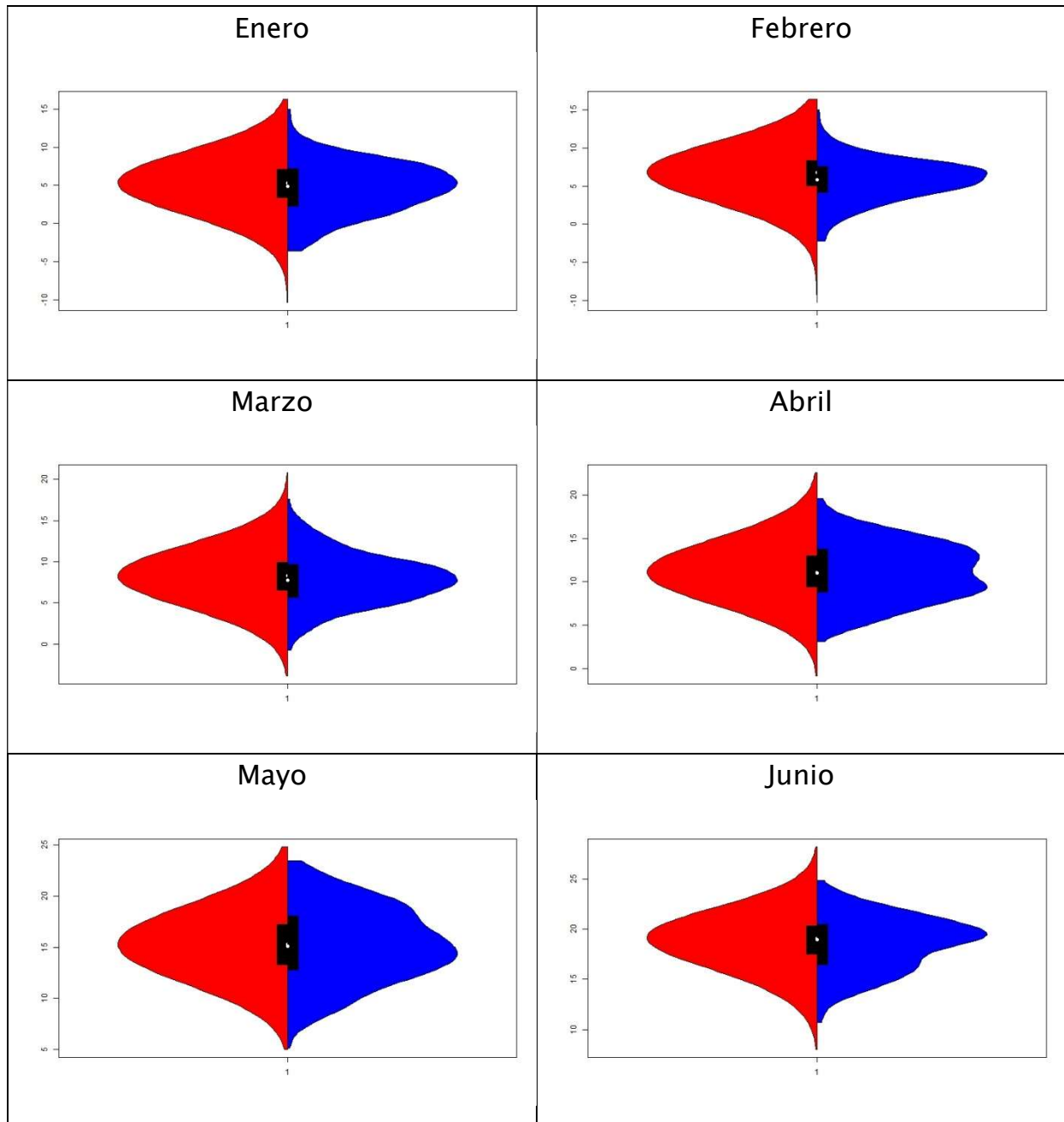


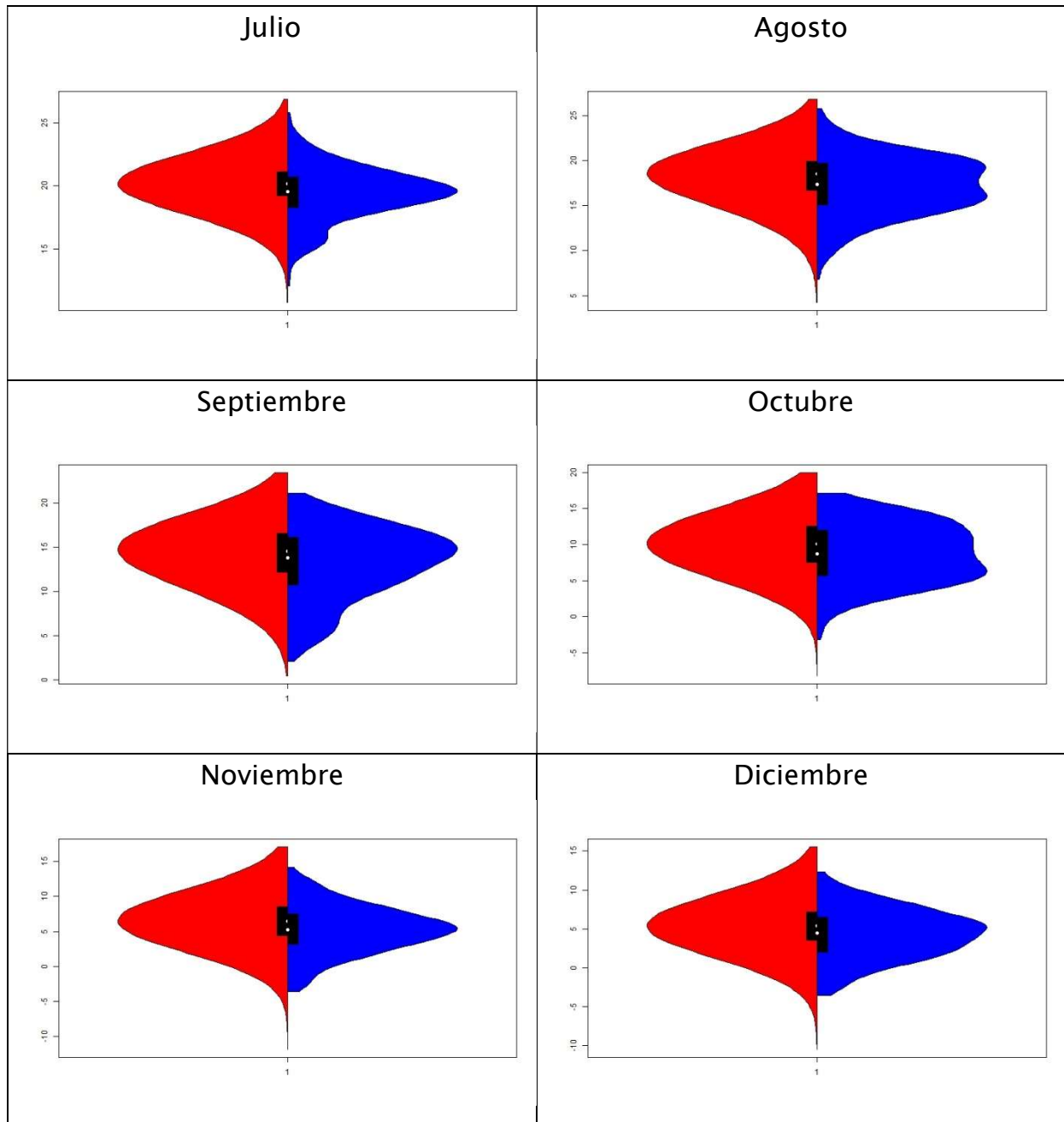
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

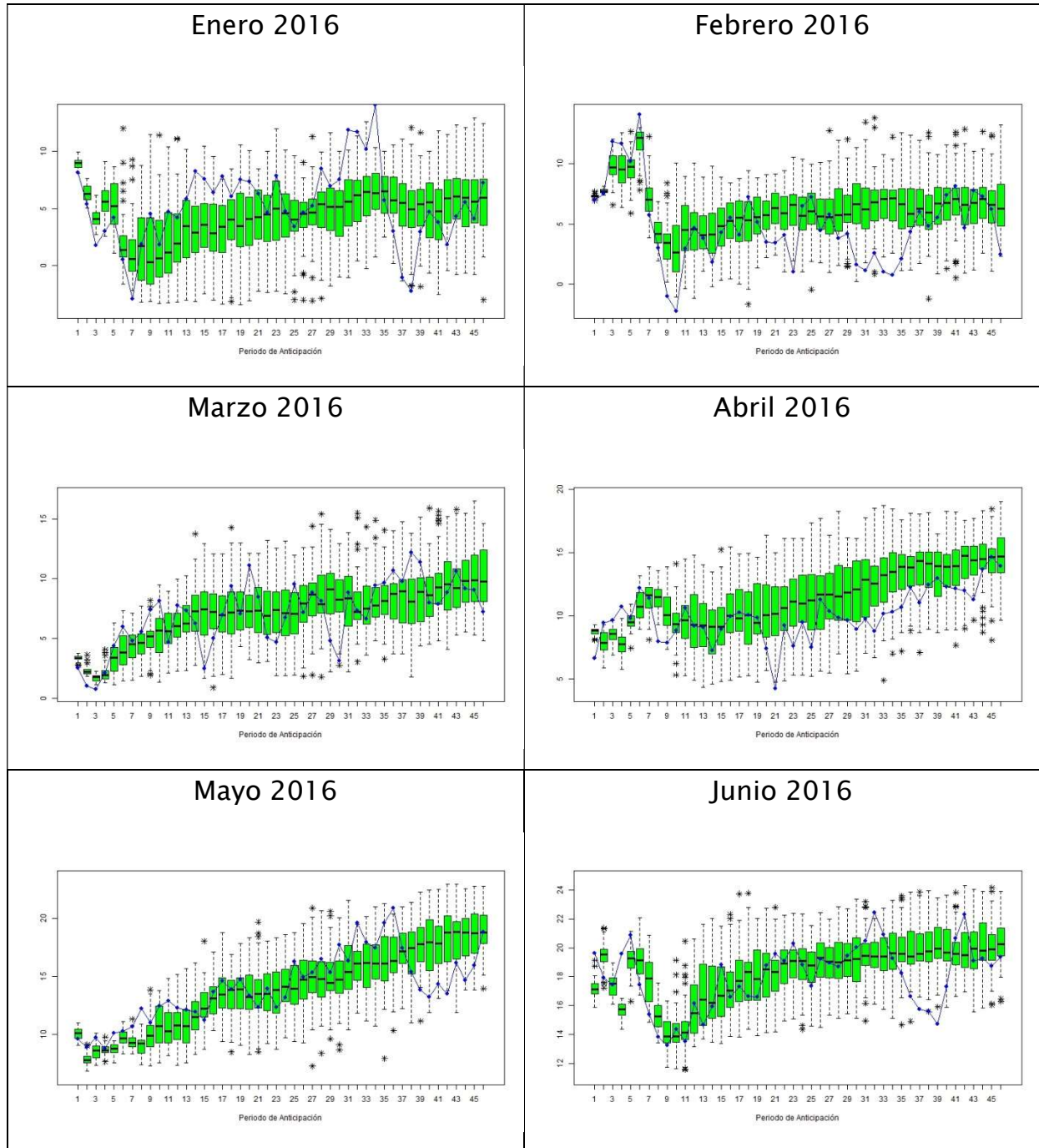






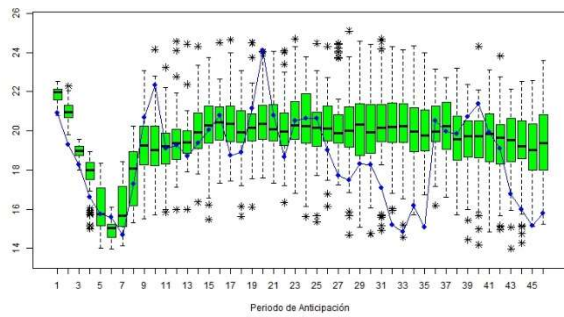
Predicciones corregidas por mes

- Diagramas de cajas y bigotes

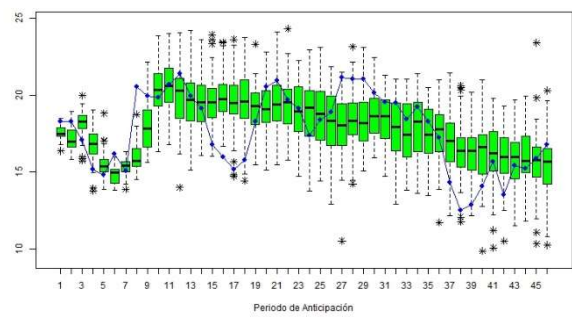




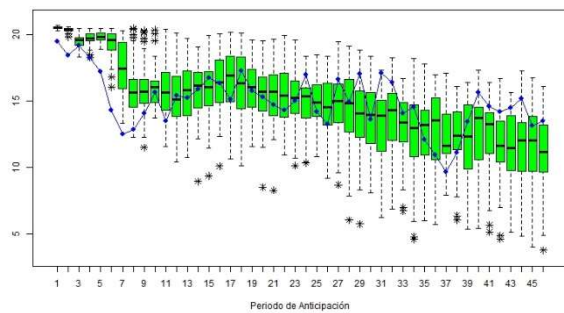
Julio 2016



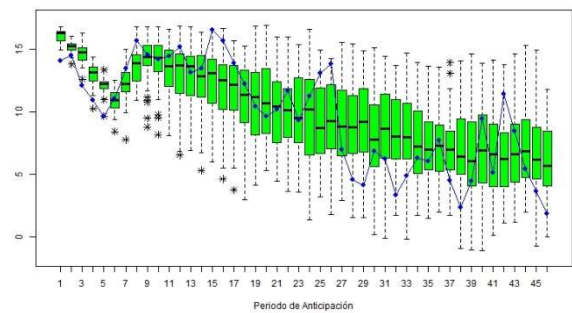
Agosto 2016



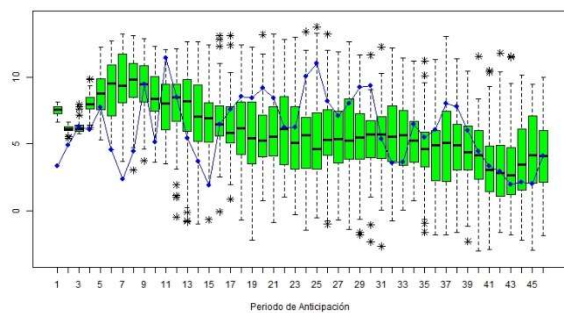
Septiembre 2016



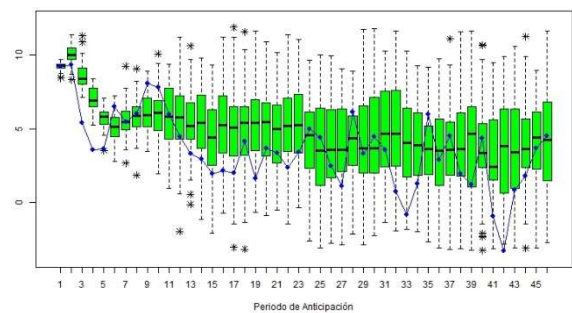
Octubre 2016



Noviembre 2016

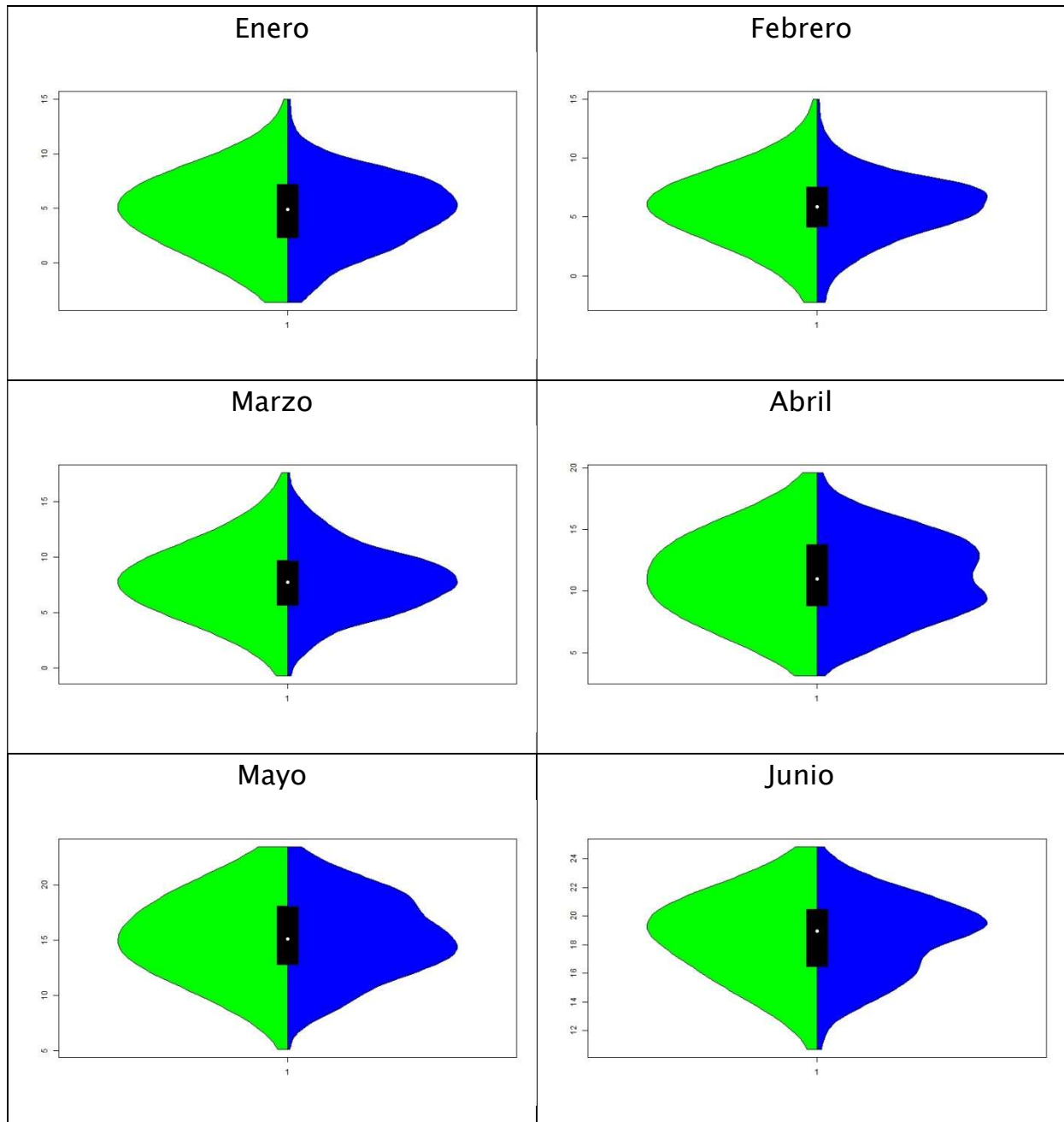


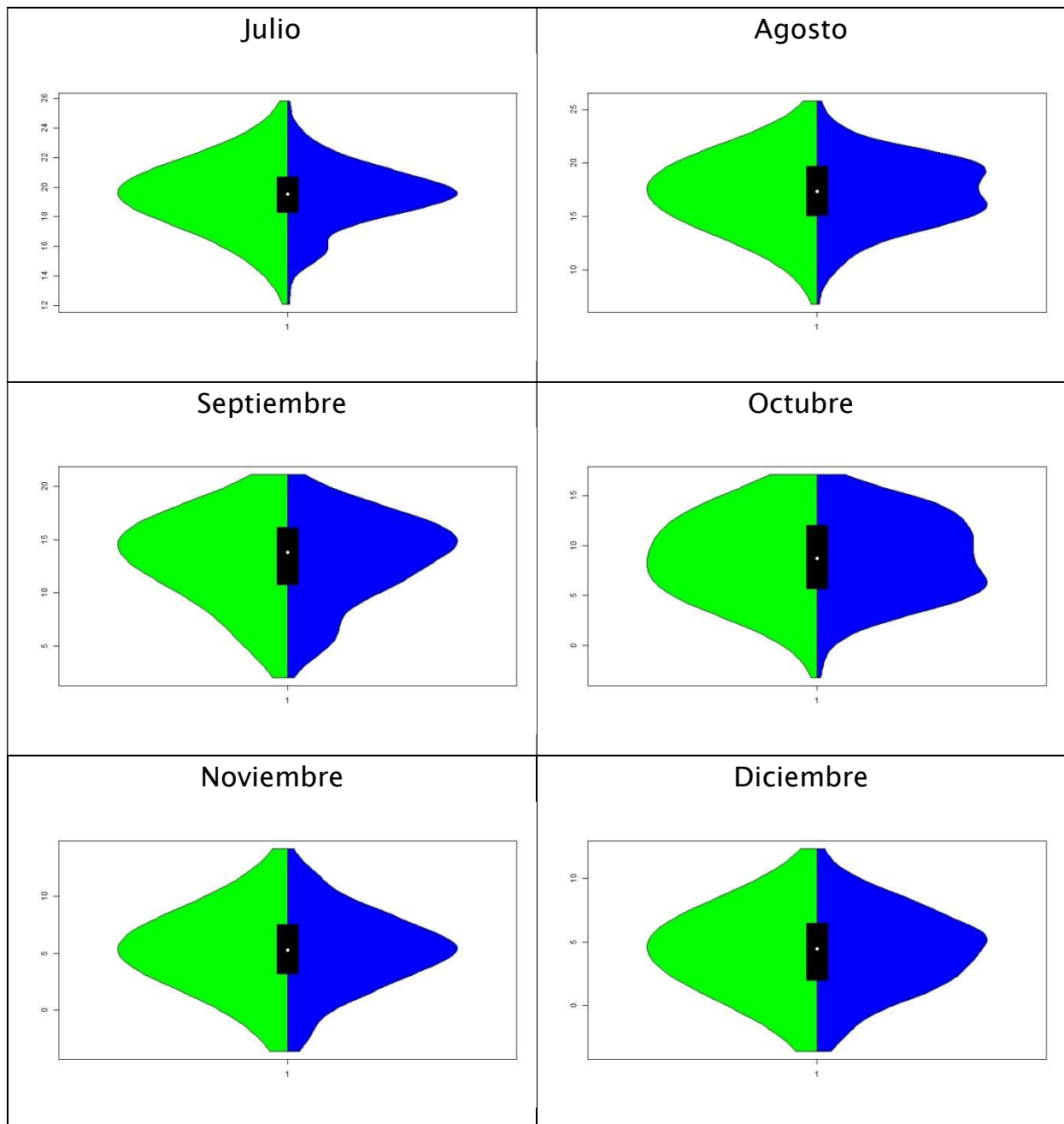
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

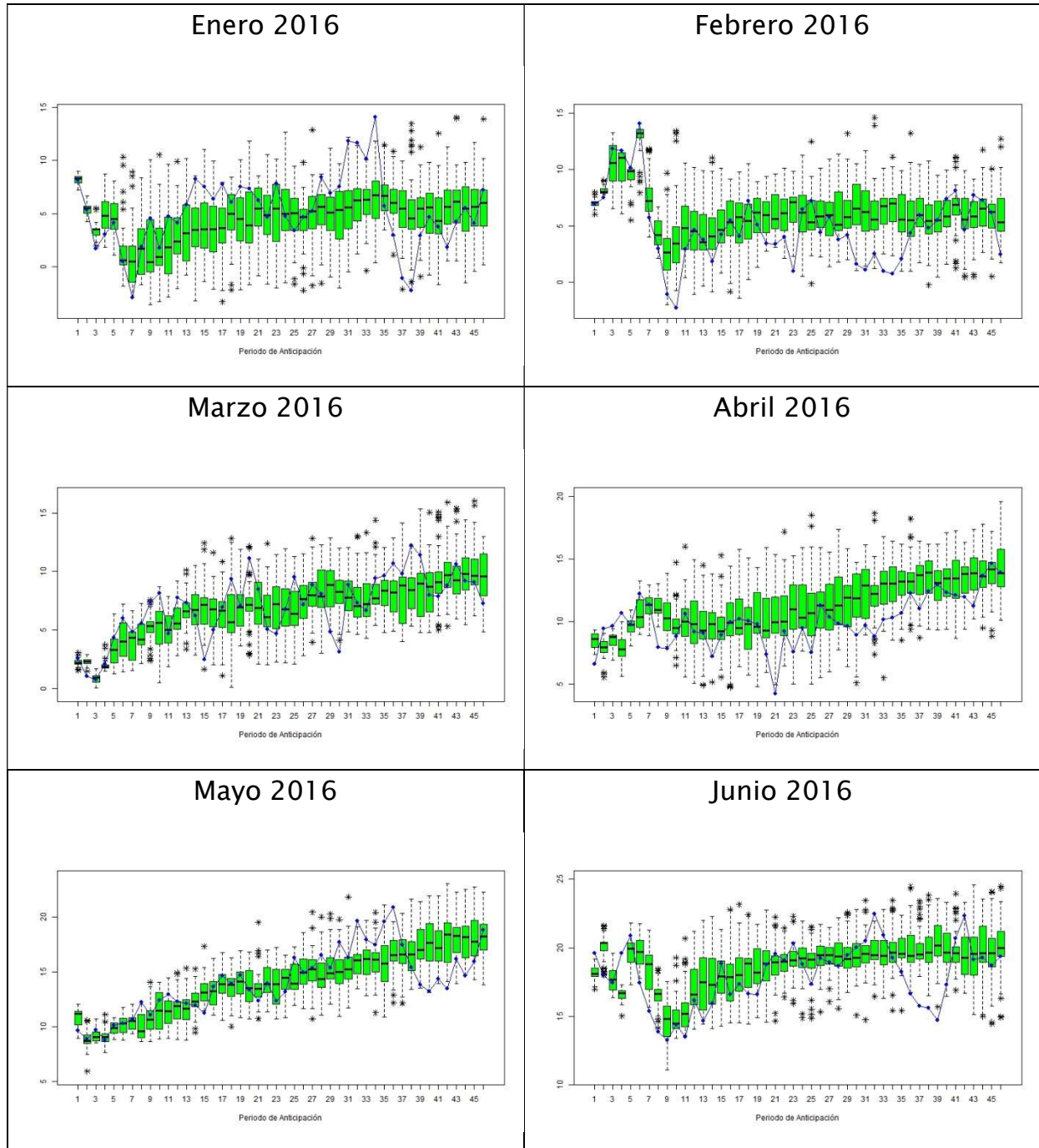






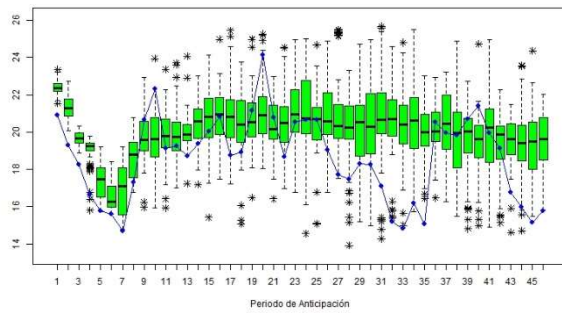
Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

- Diagramas de cajas y bigotes

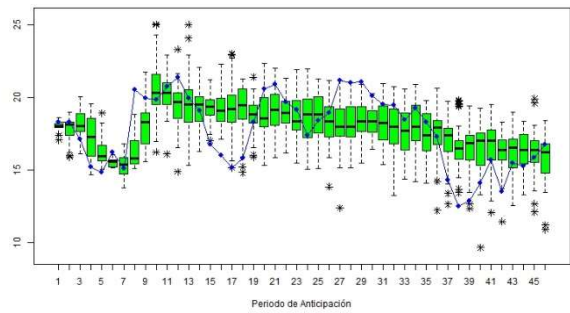




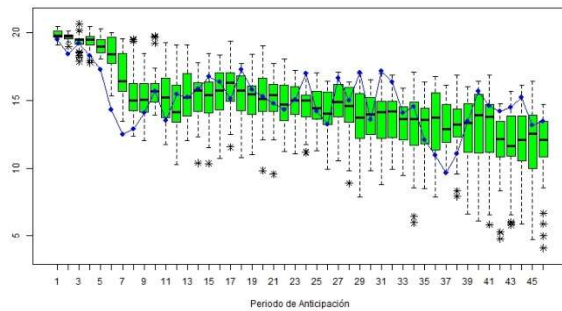
Julio 2016



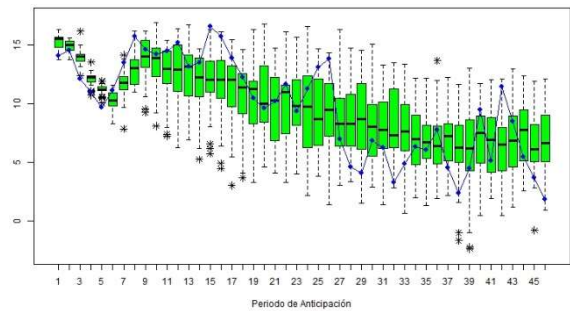
Agosto 2016



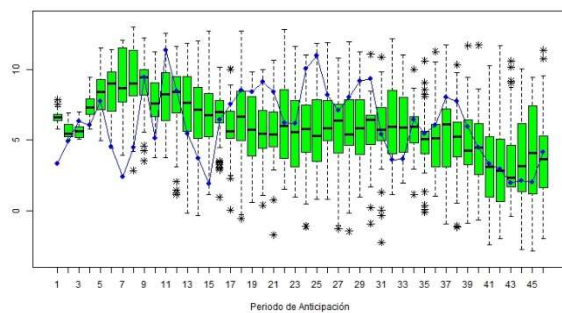
Septiembre 2016



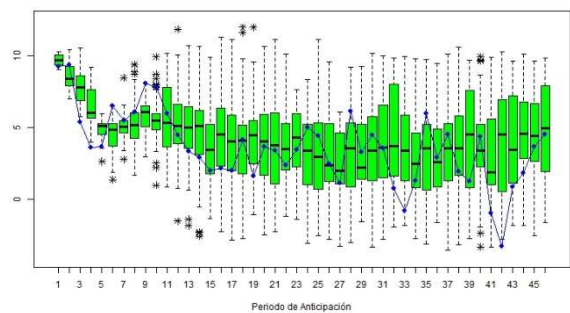
Octubre 2016



Noviembre 2016

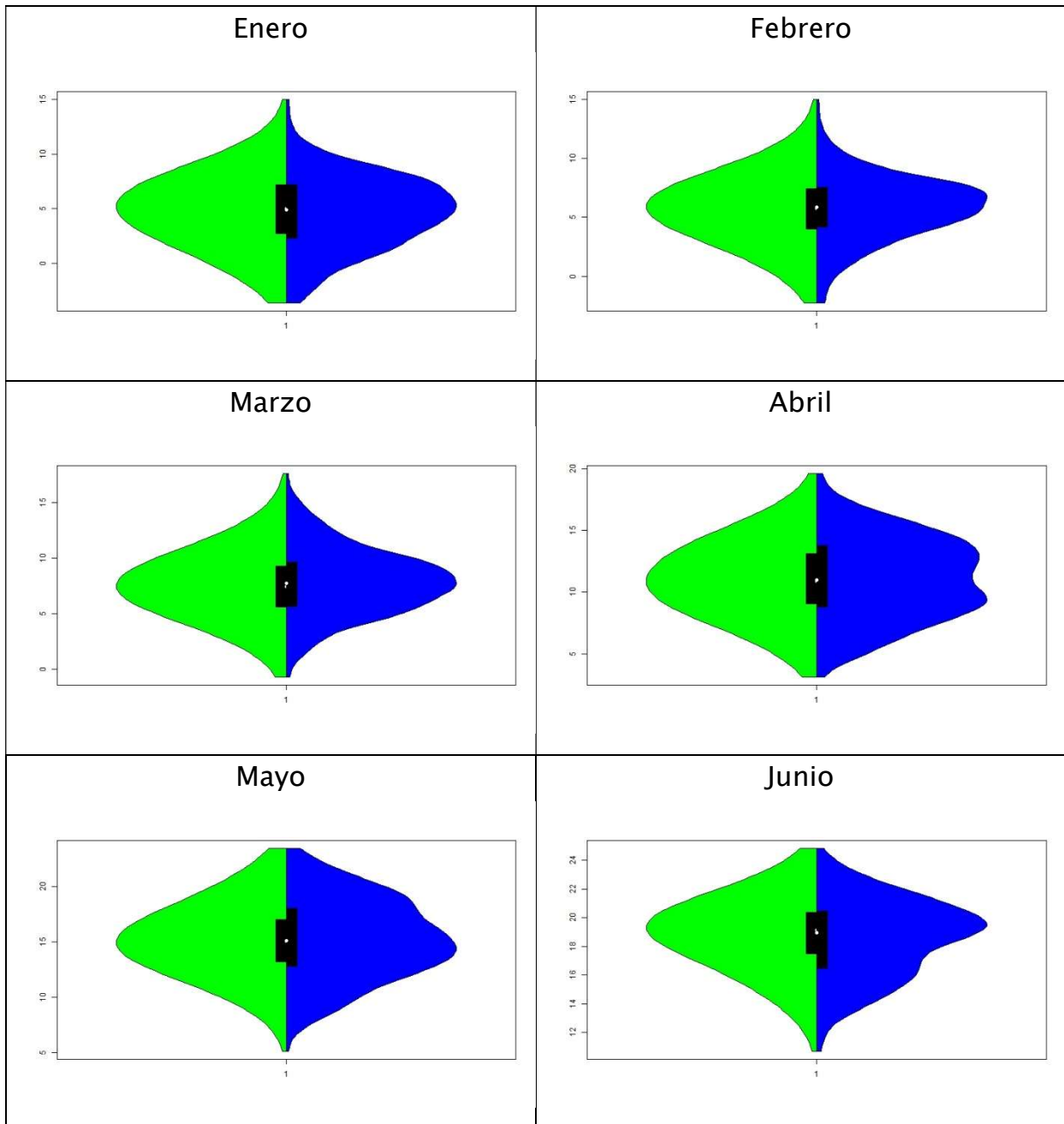


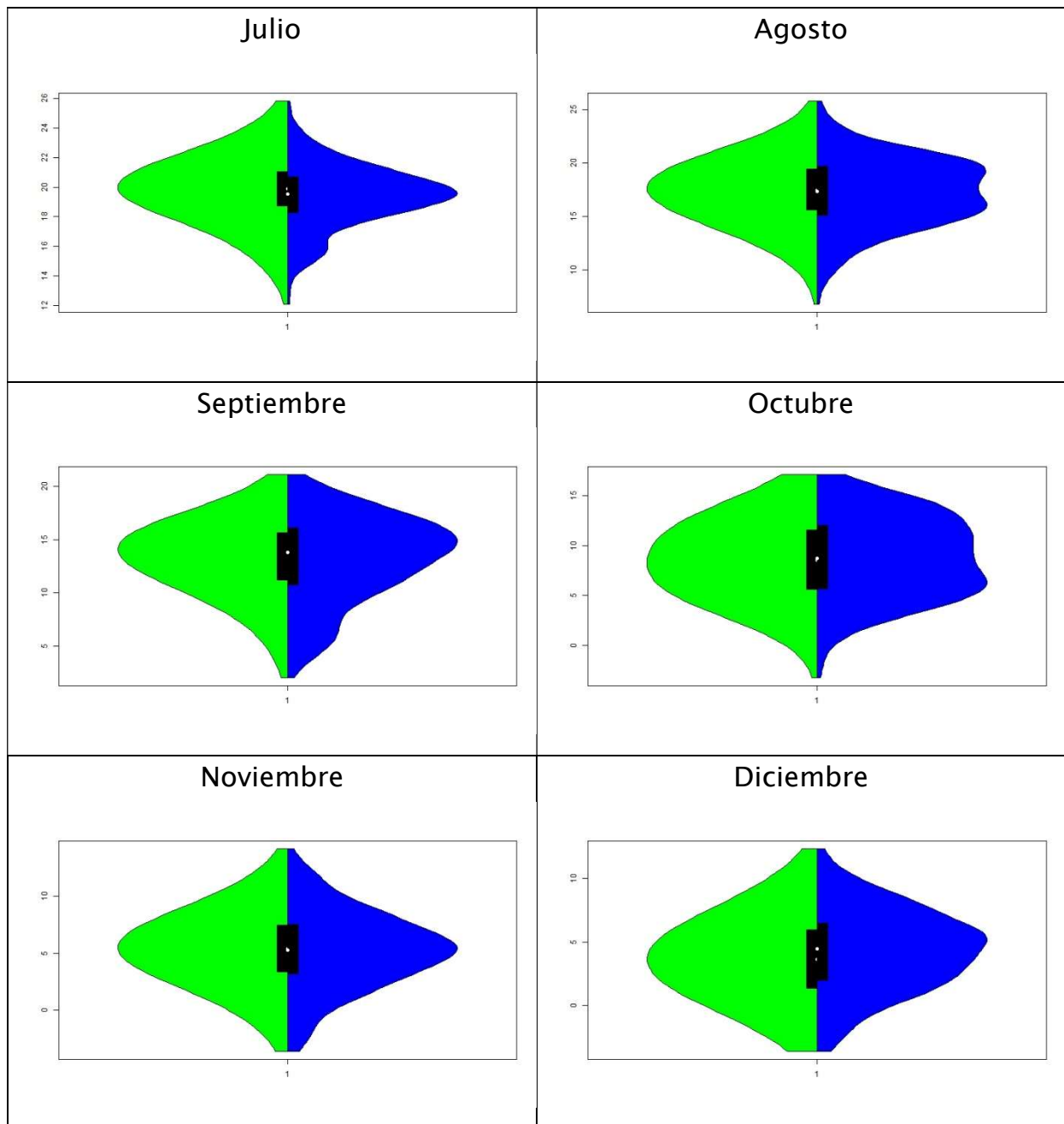
Diciembre 2016





- Diagramas de violín



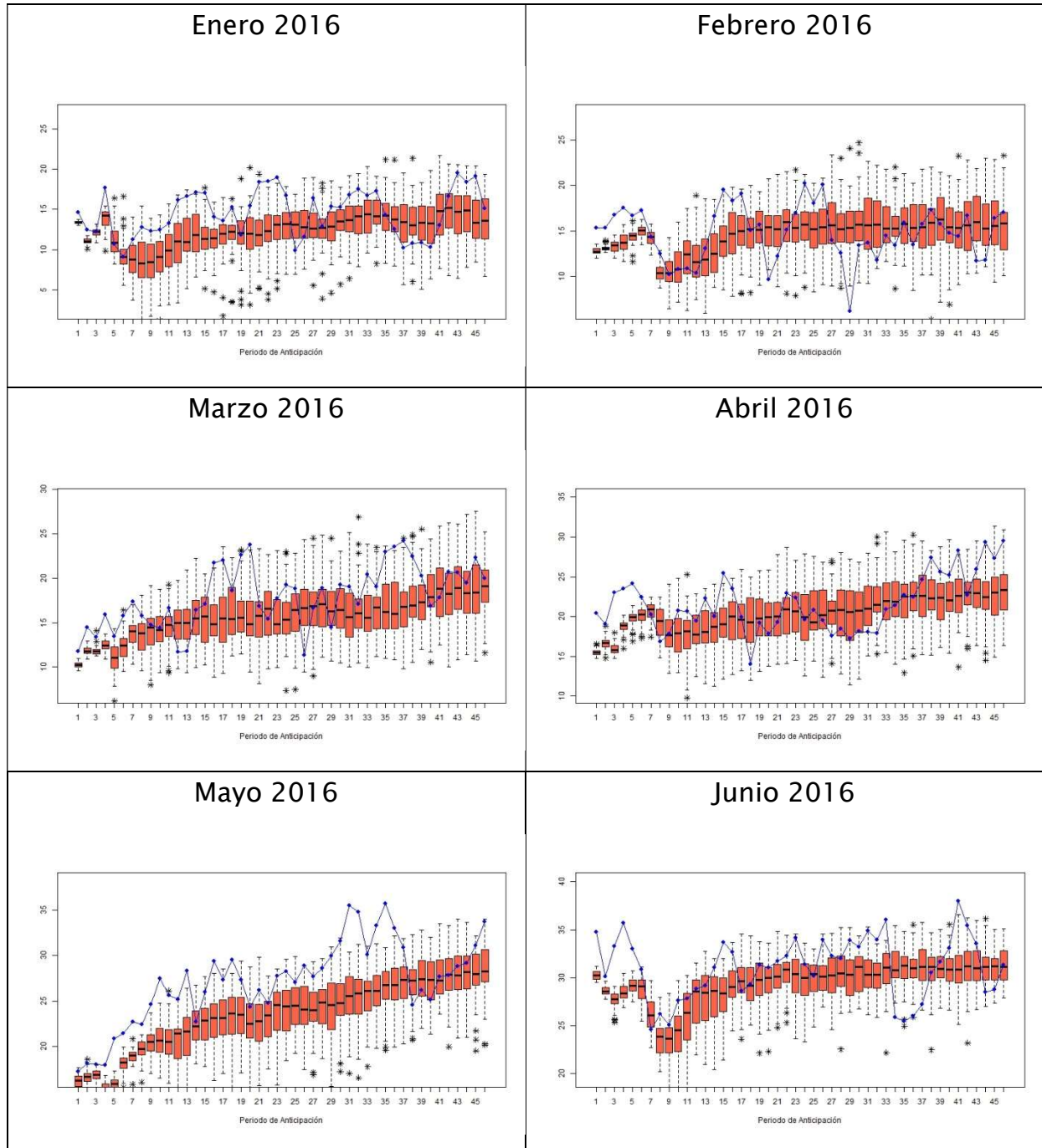




Temperatura Máxima

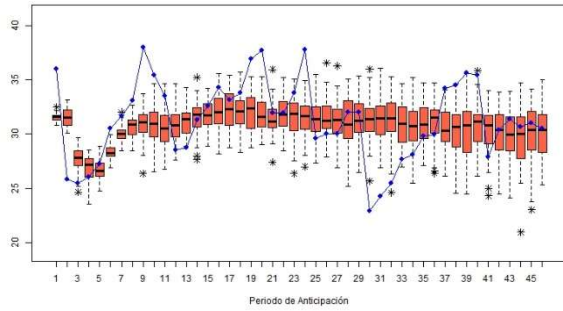
Predicciones brutas

- Diagramas de cajas y bigotes

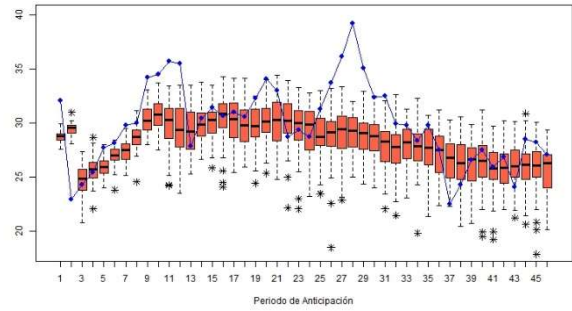




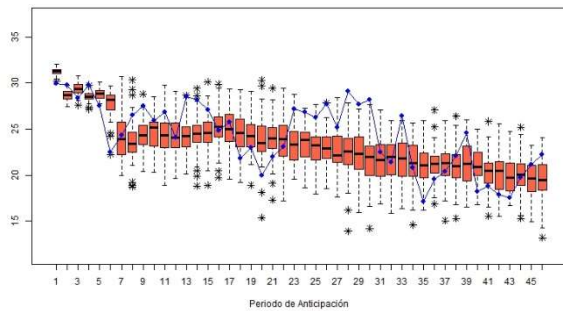
Julio 2016



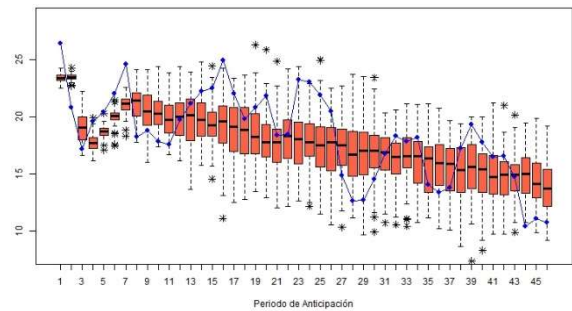
Agosto 2016



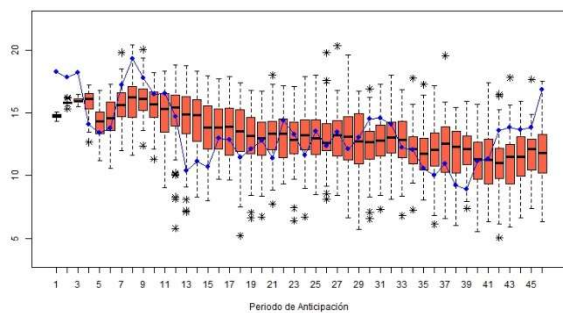
Septiembre 2016



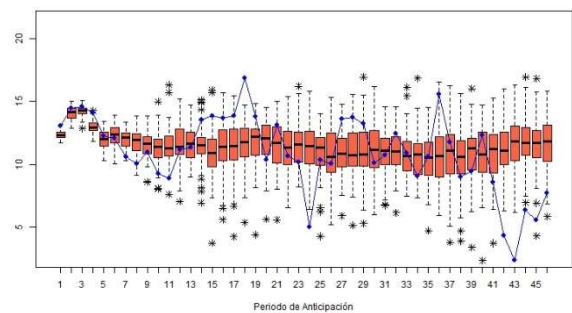
Octubre 2016



Noviembre 2016

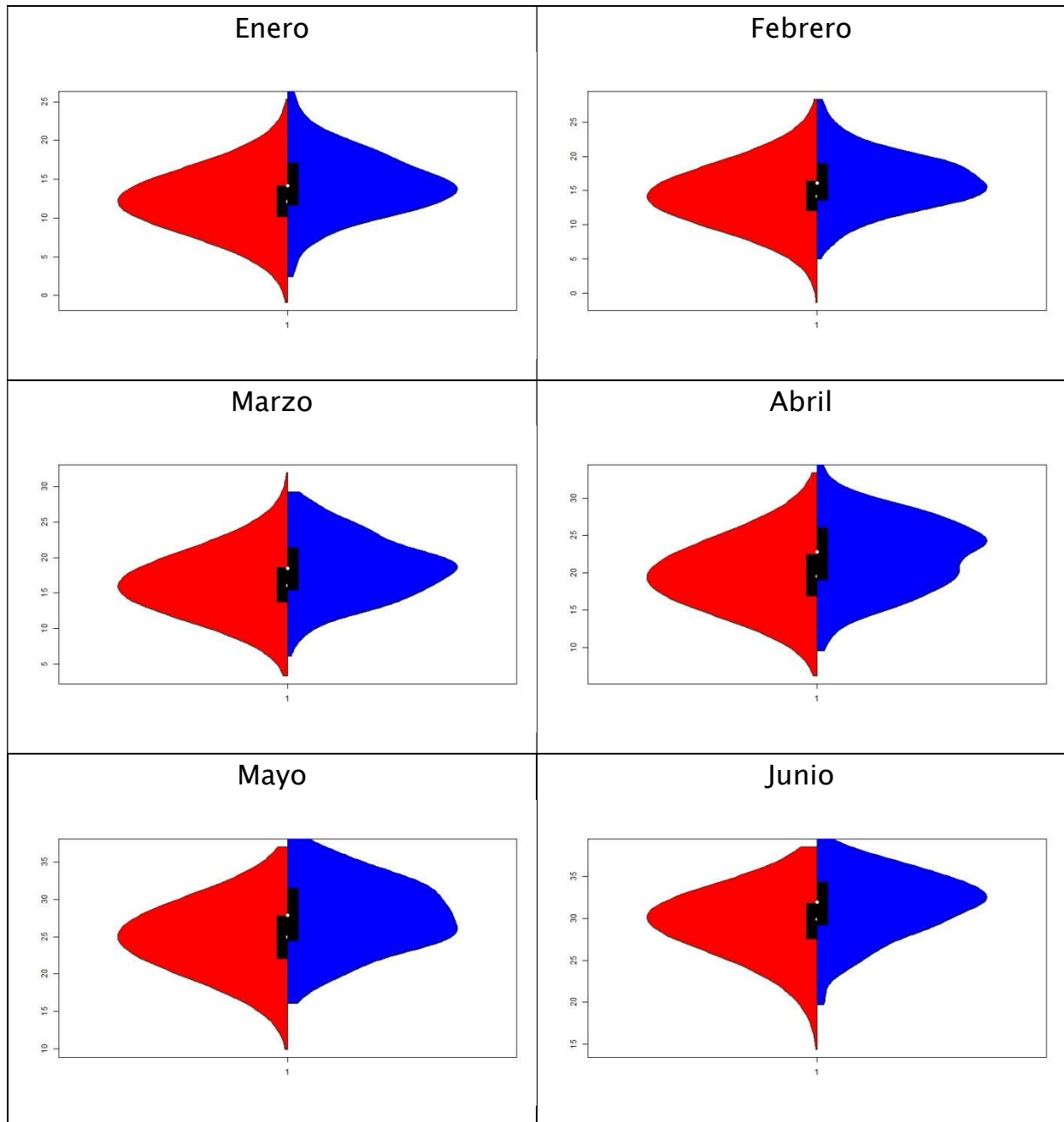


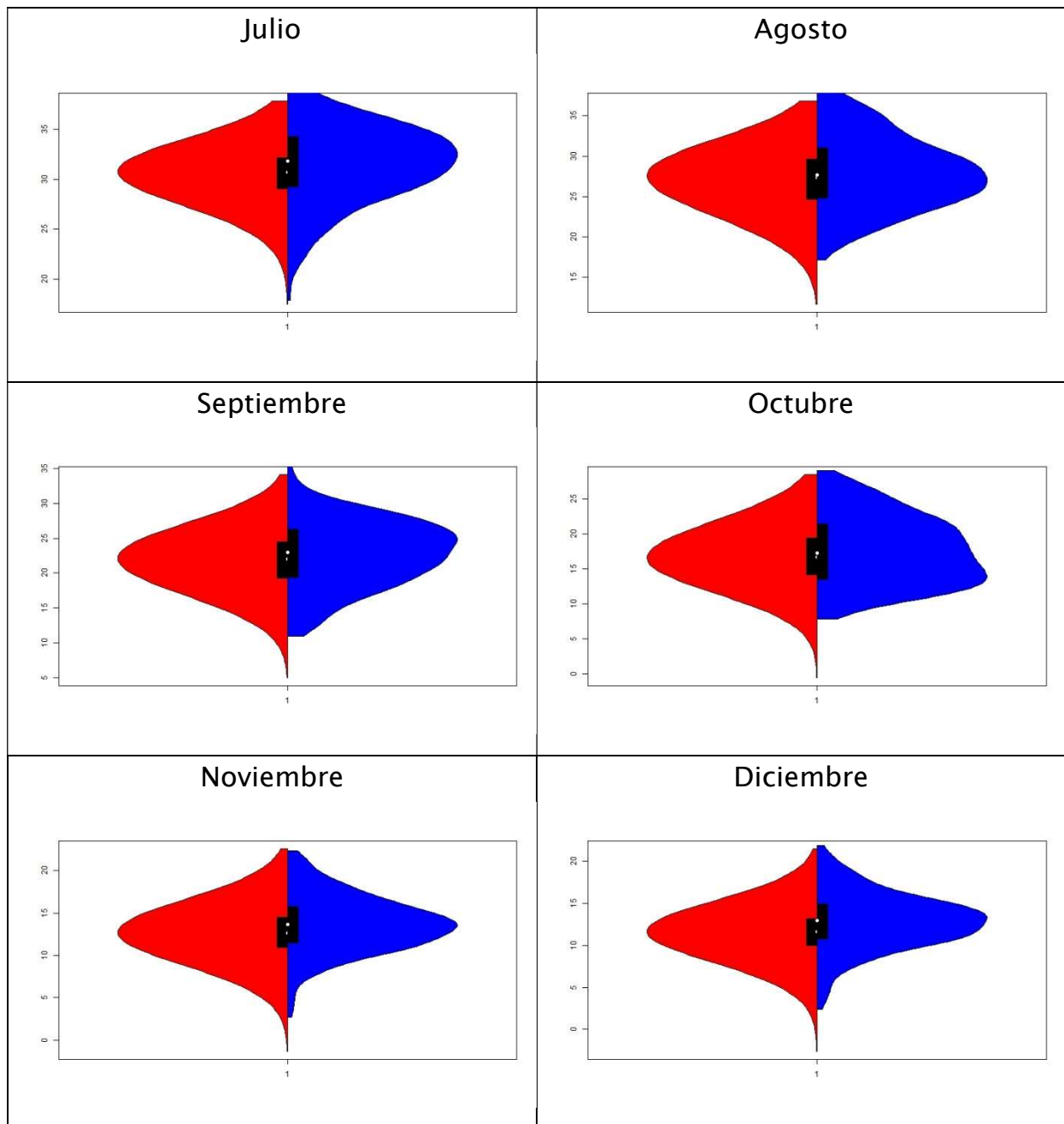
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

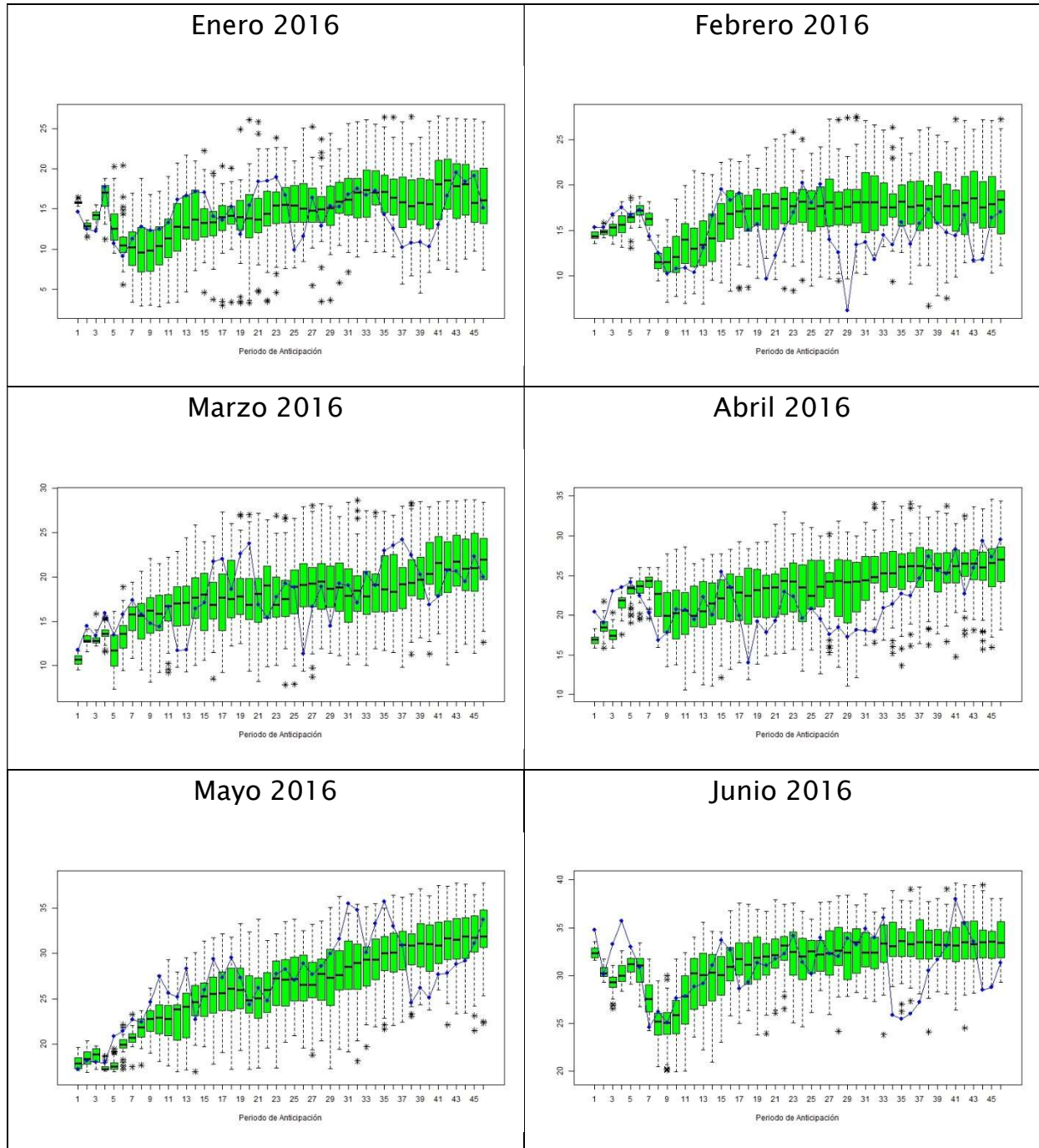






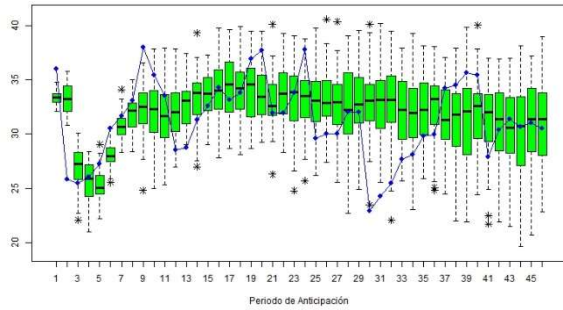
Predicciones corregidas por mes

- Diagramas de cajas y bigotes

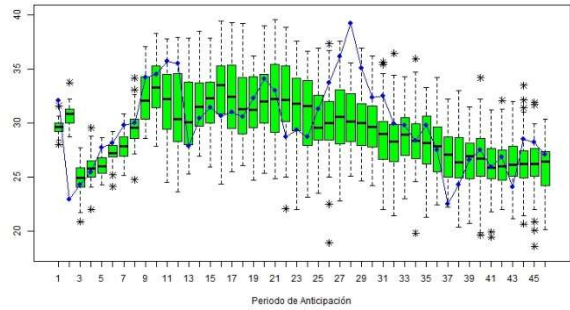




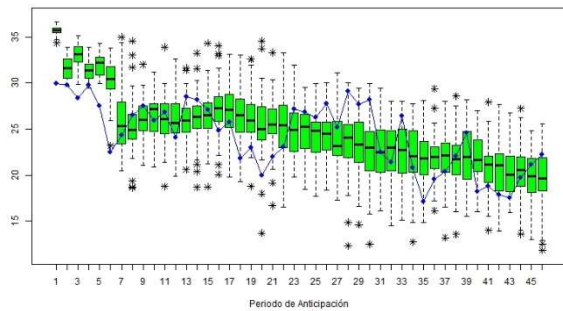
Julio 2016



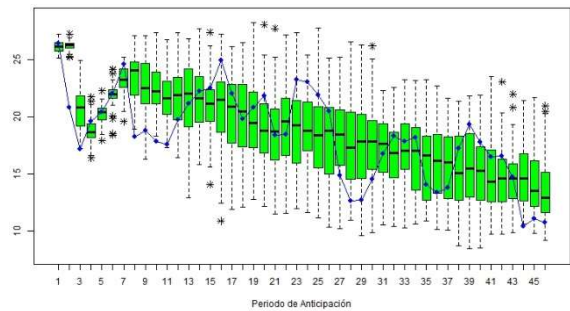
Agosto 2016



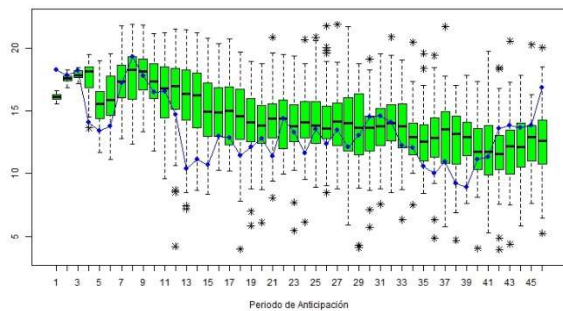
Septiembre 2016



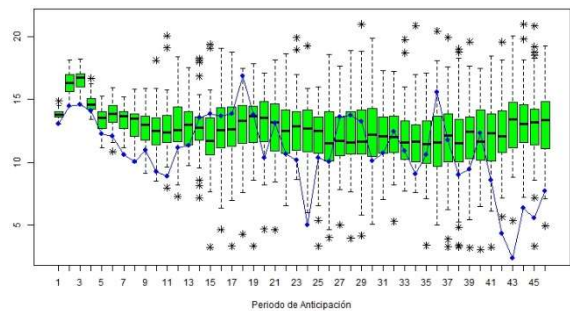
Octubre 2016



Noviembre 2016

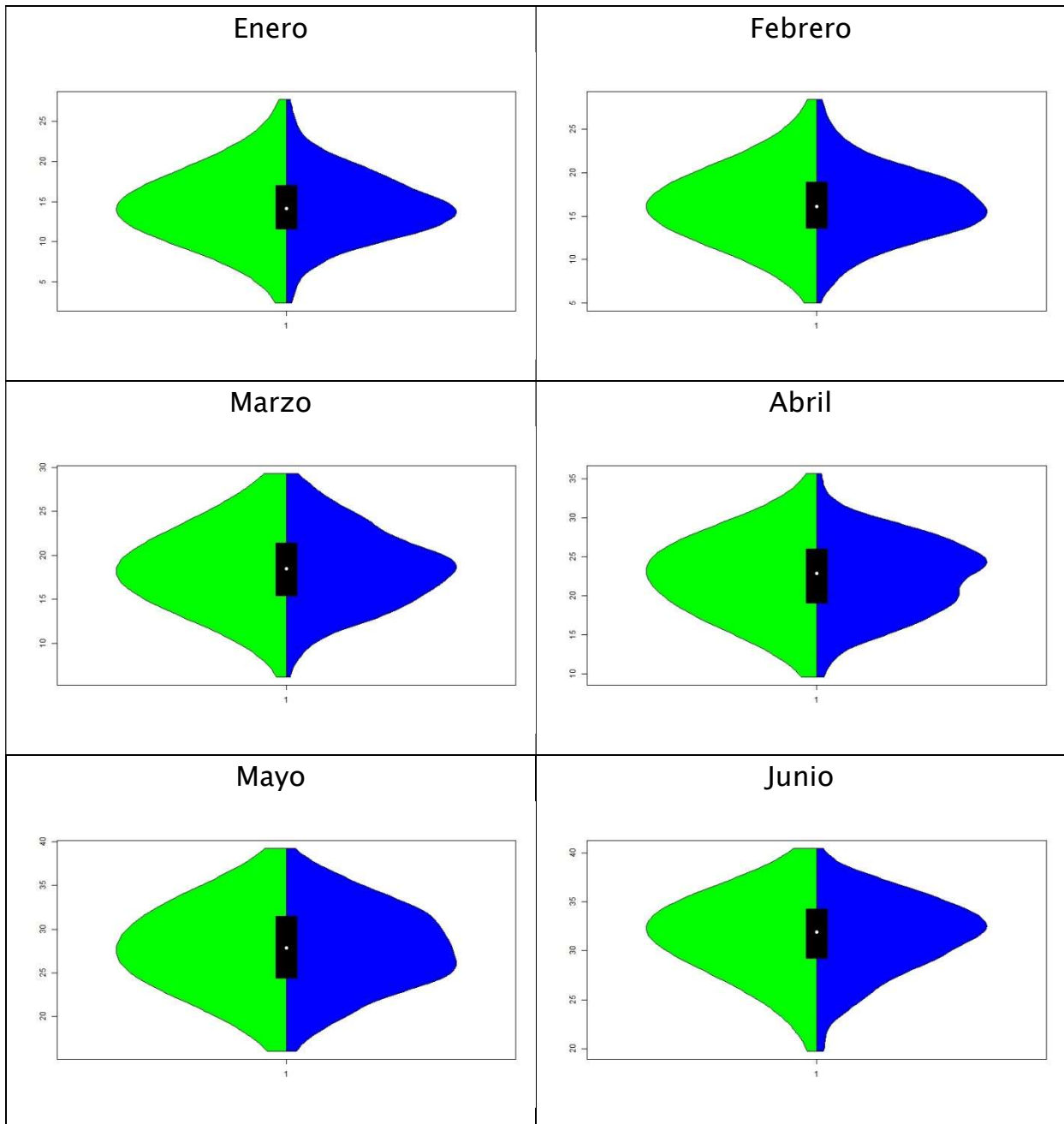


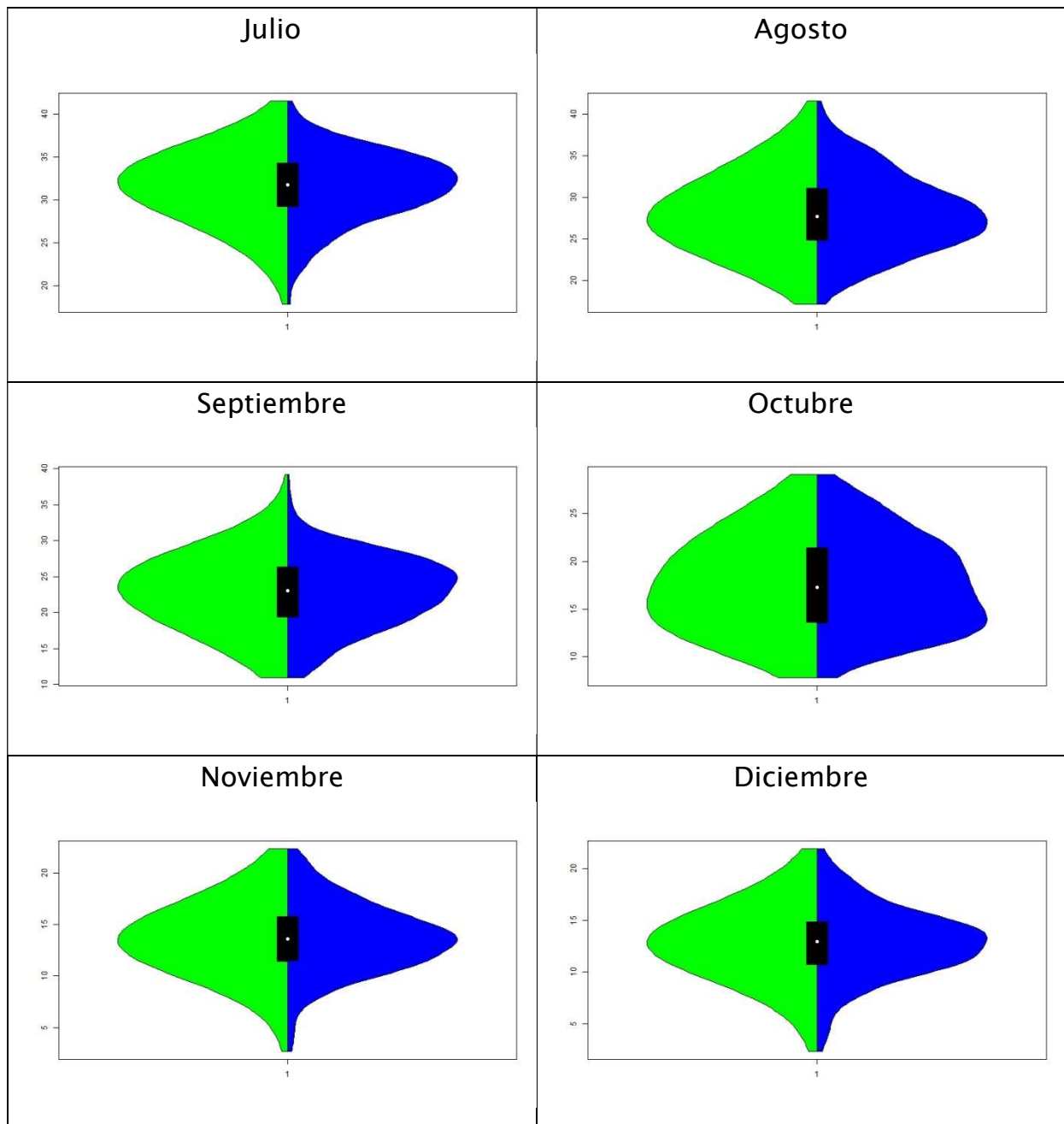
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

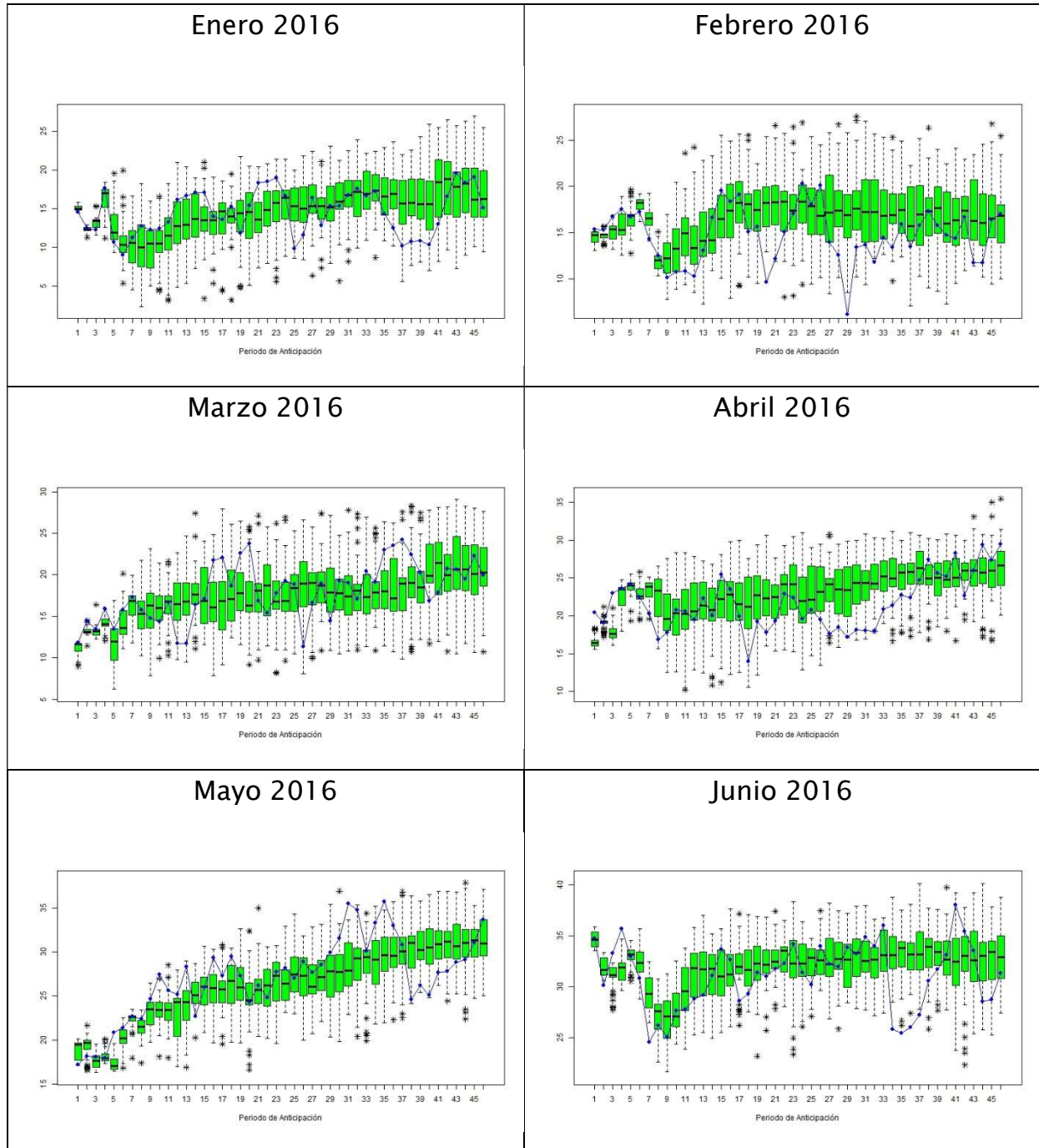






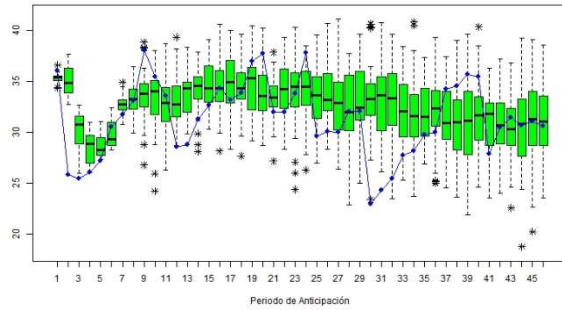
Predicciones corregidas por mes y periodo de anticipación

- Diagramas de cajas y bigotes

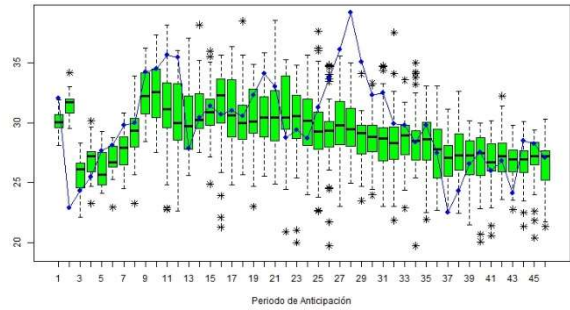




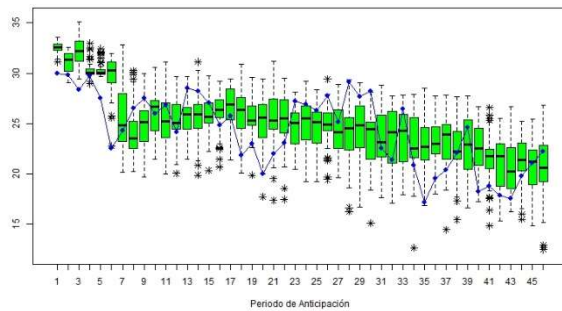
Julio 2016



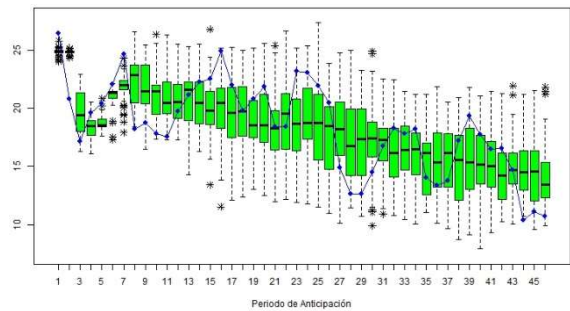
Agosto 2016



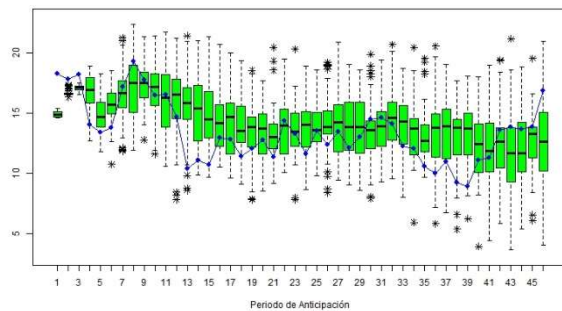
Septiembre 2016



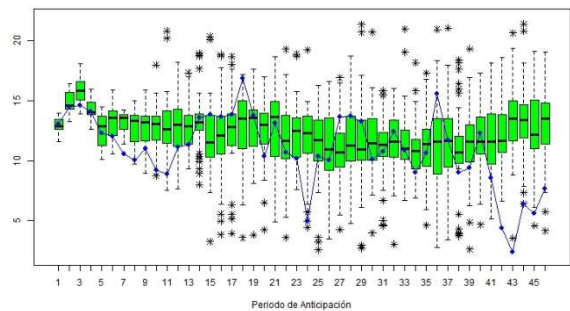
Octubre 2016



Noviembre 2016

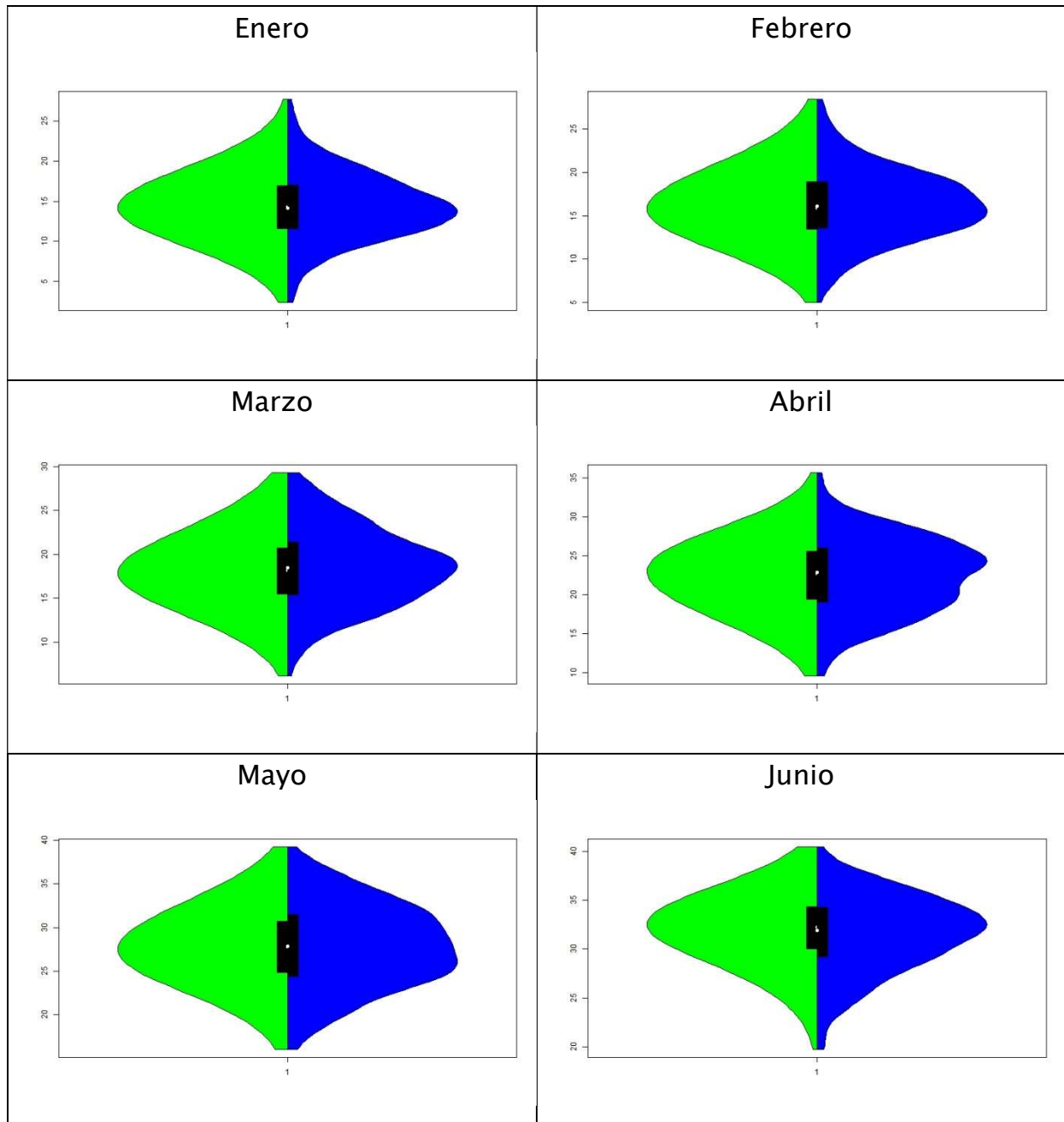


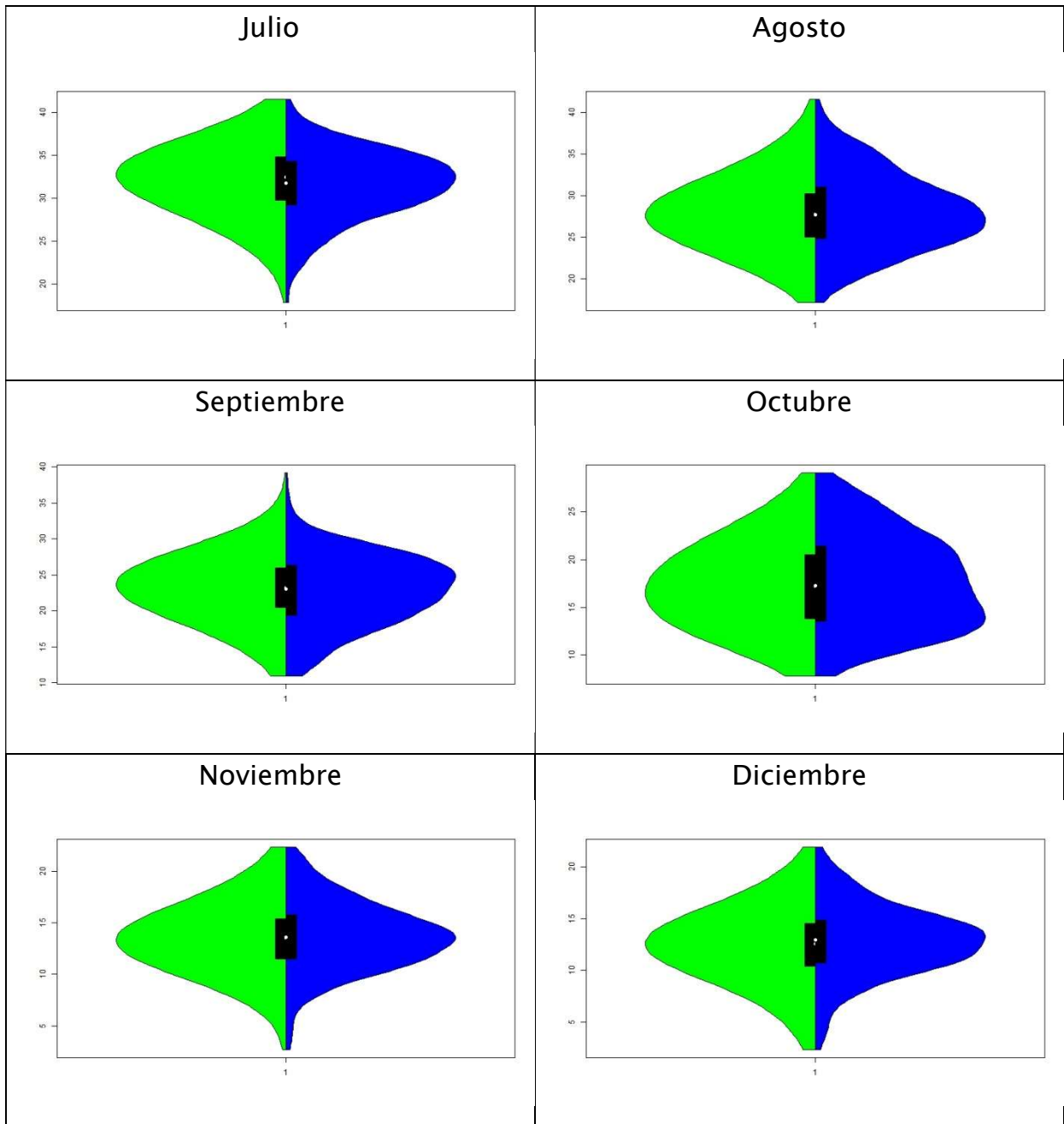
Diciembre 2016





- Diagramas de violín

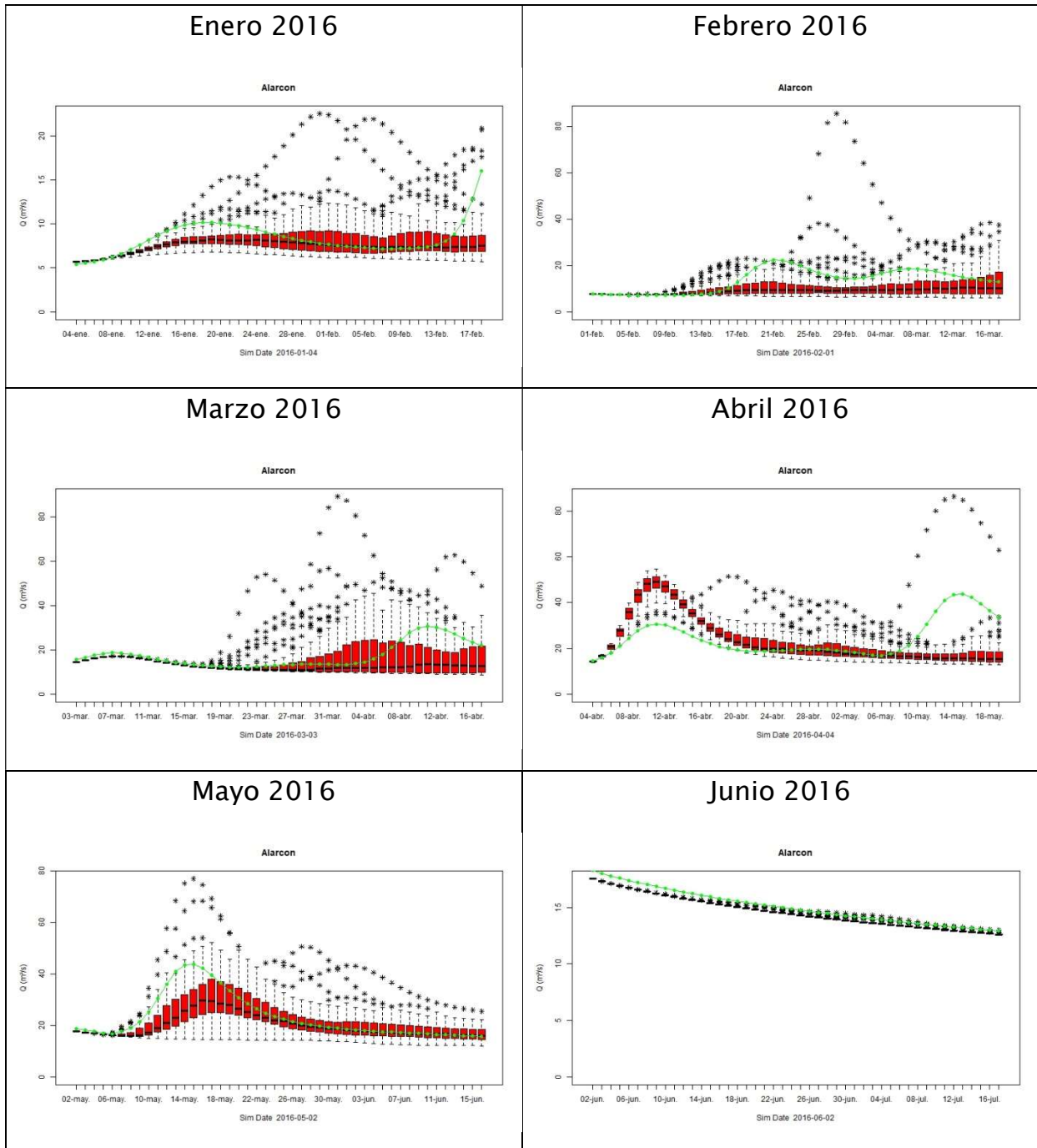


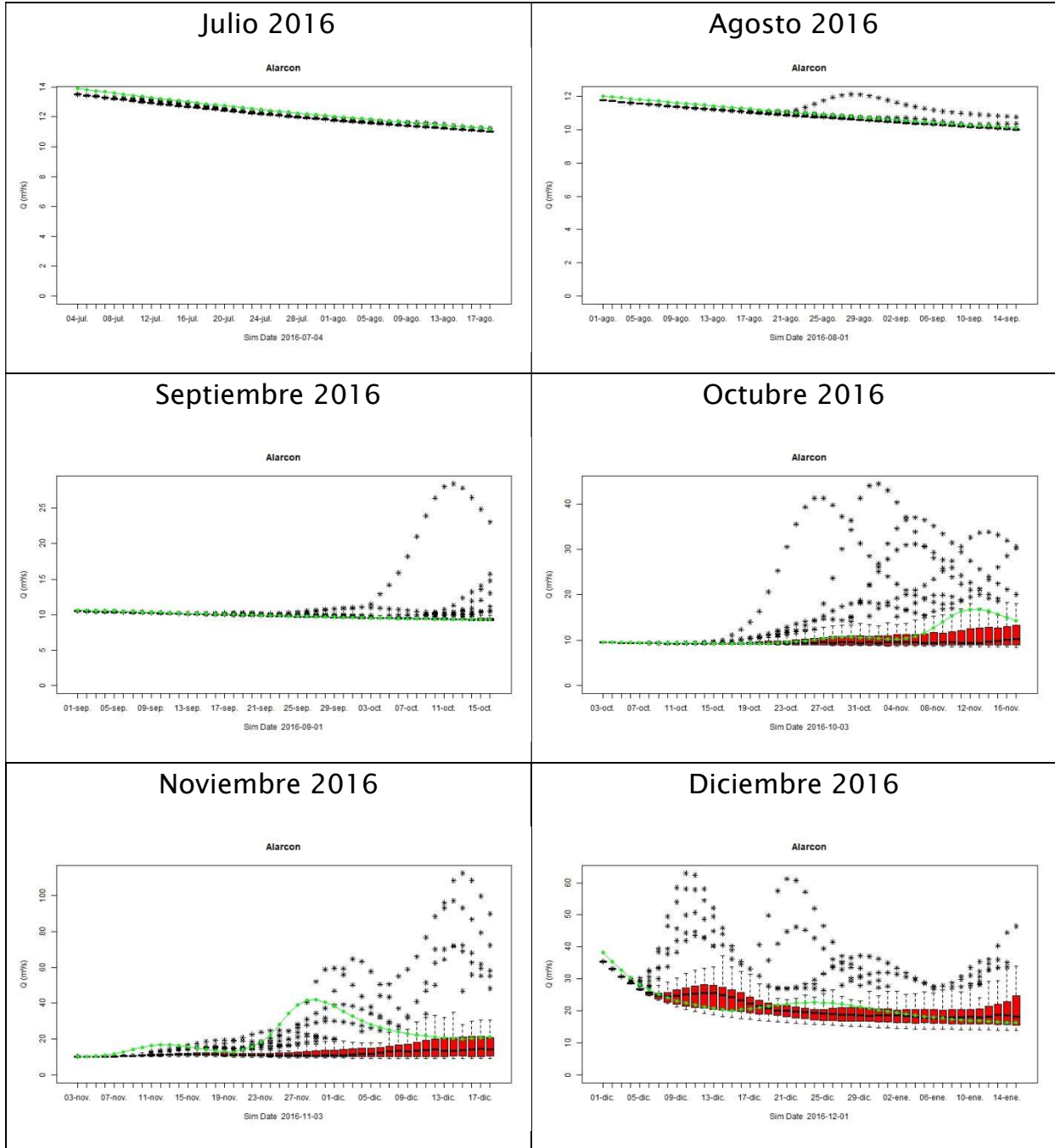




ANEXO III DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES PARA PREDICCIONES HIDROLÓGICAS

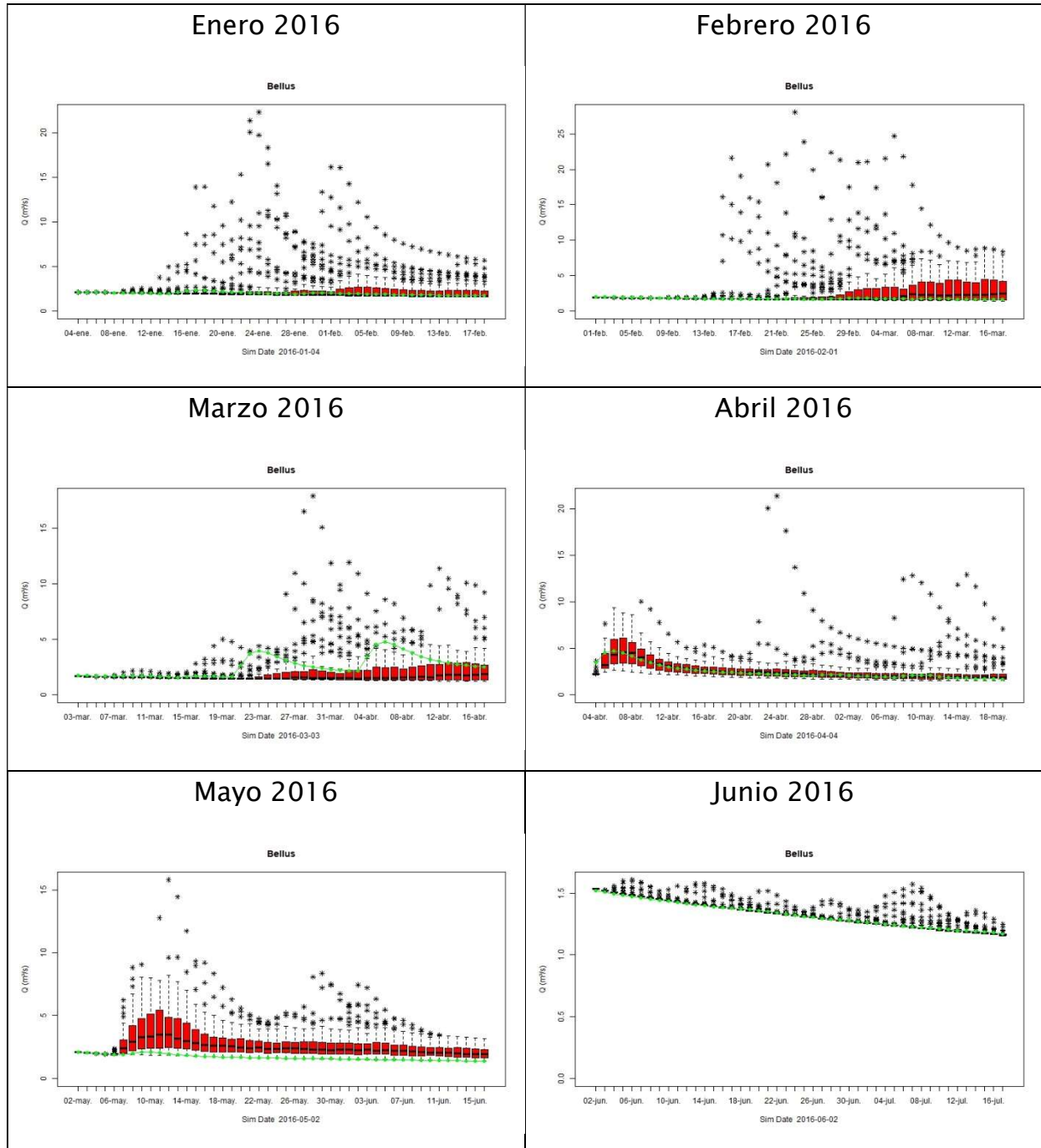
Alarcón

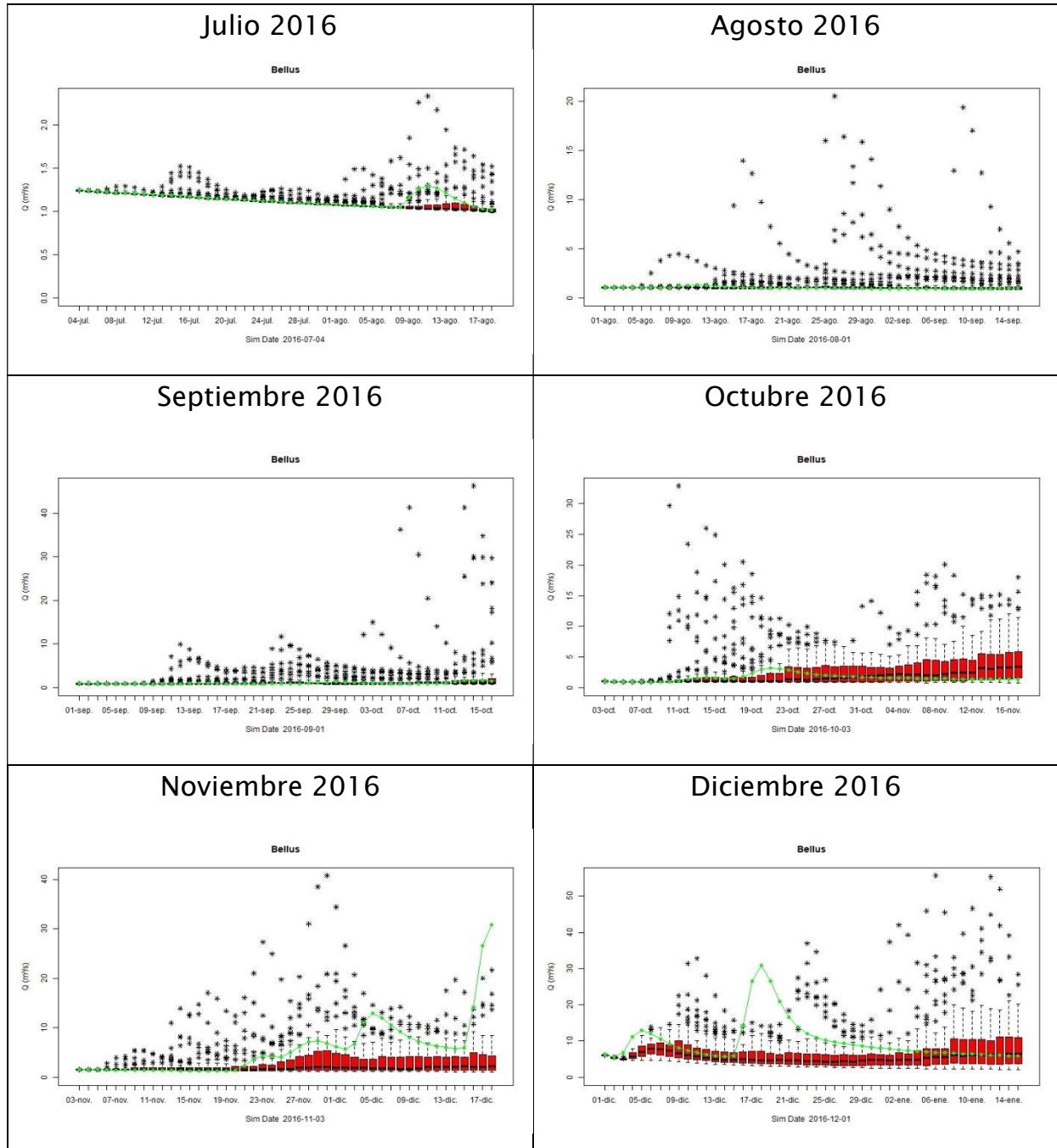






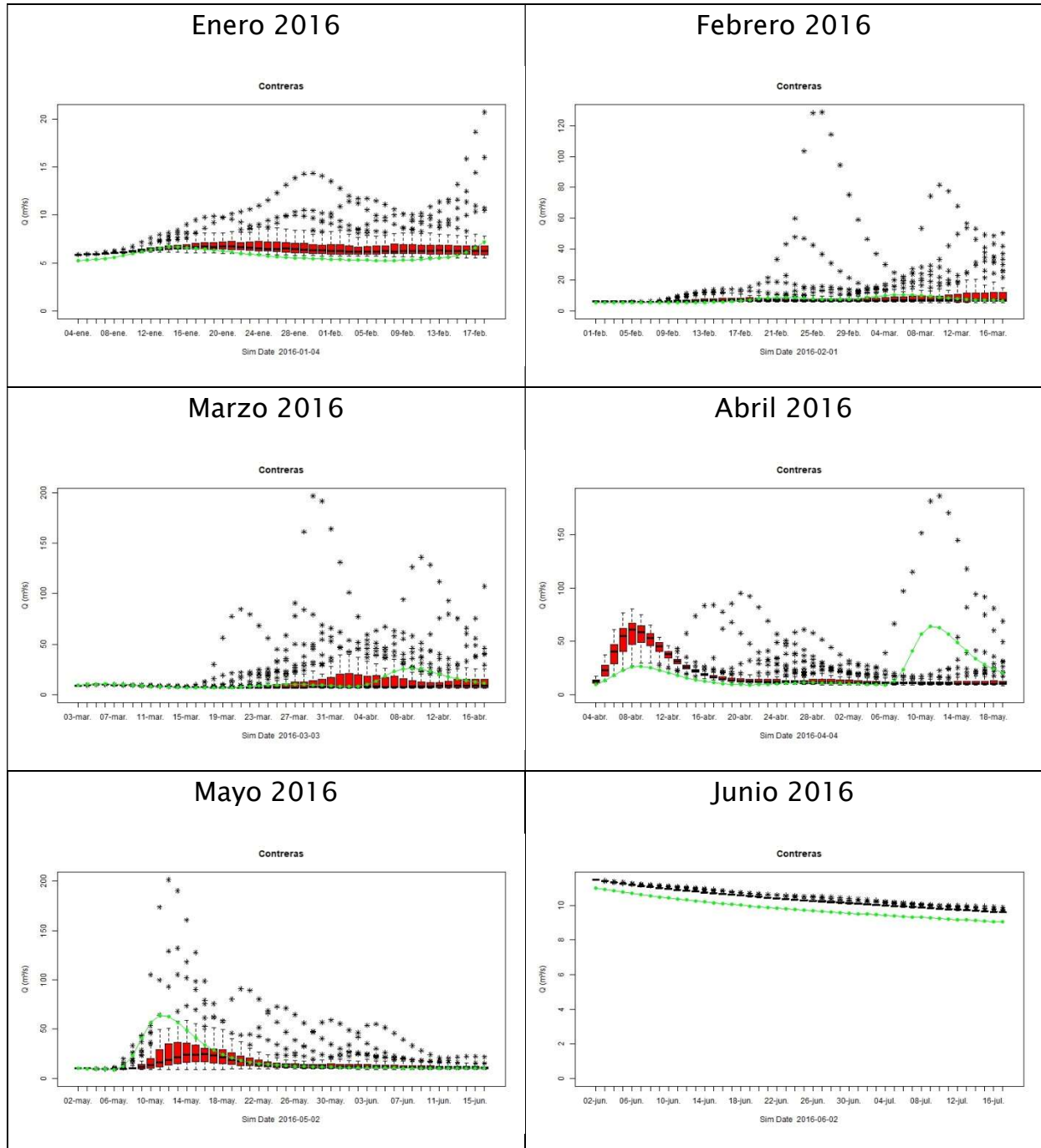
Bellús

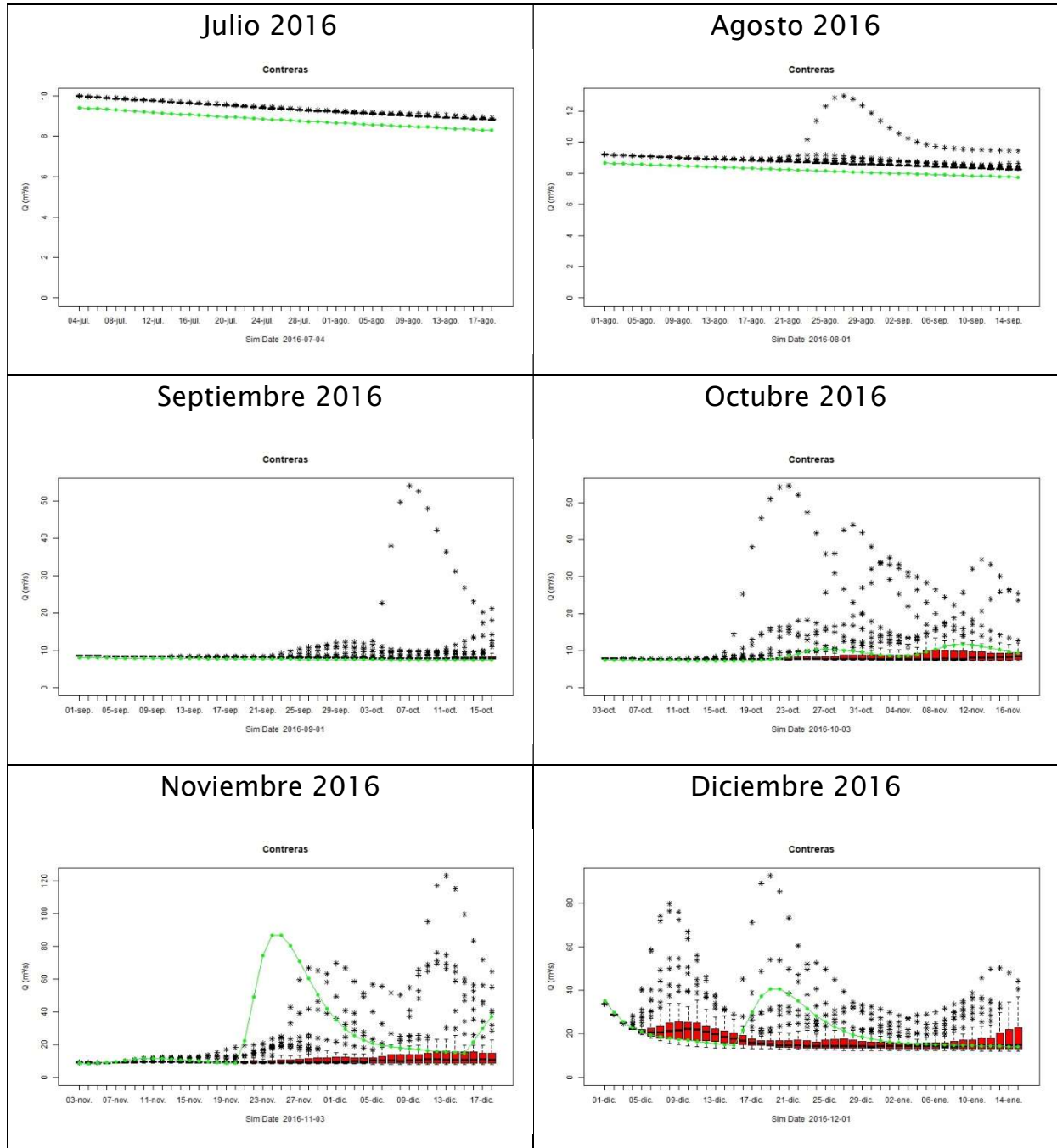






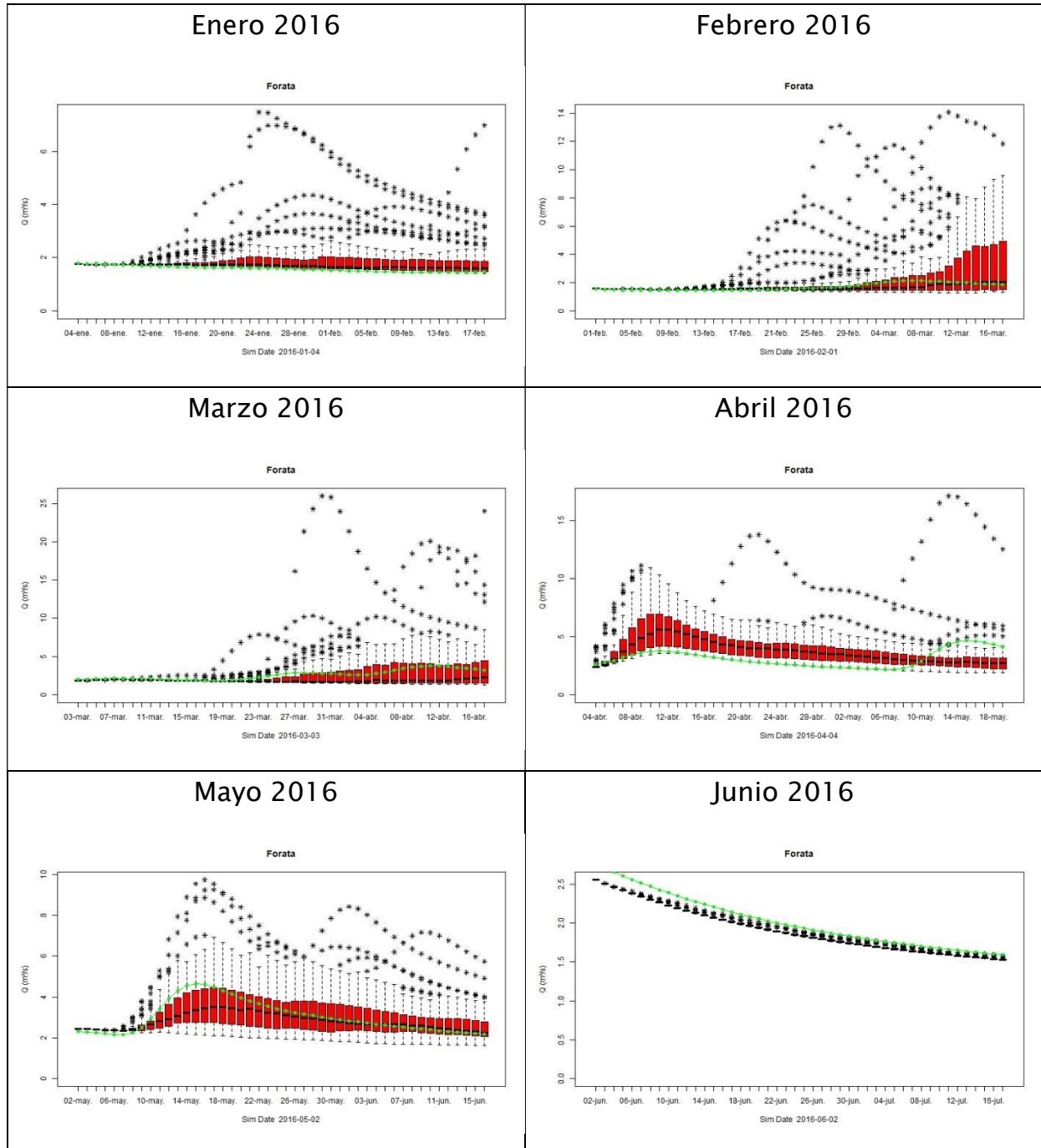
Contreras

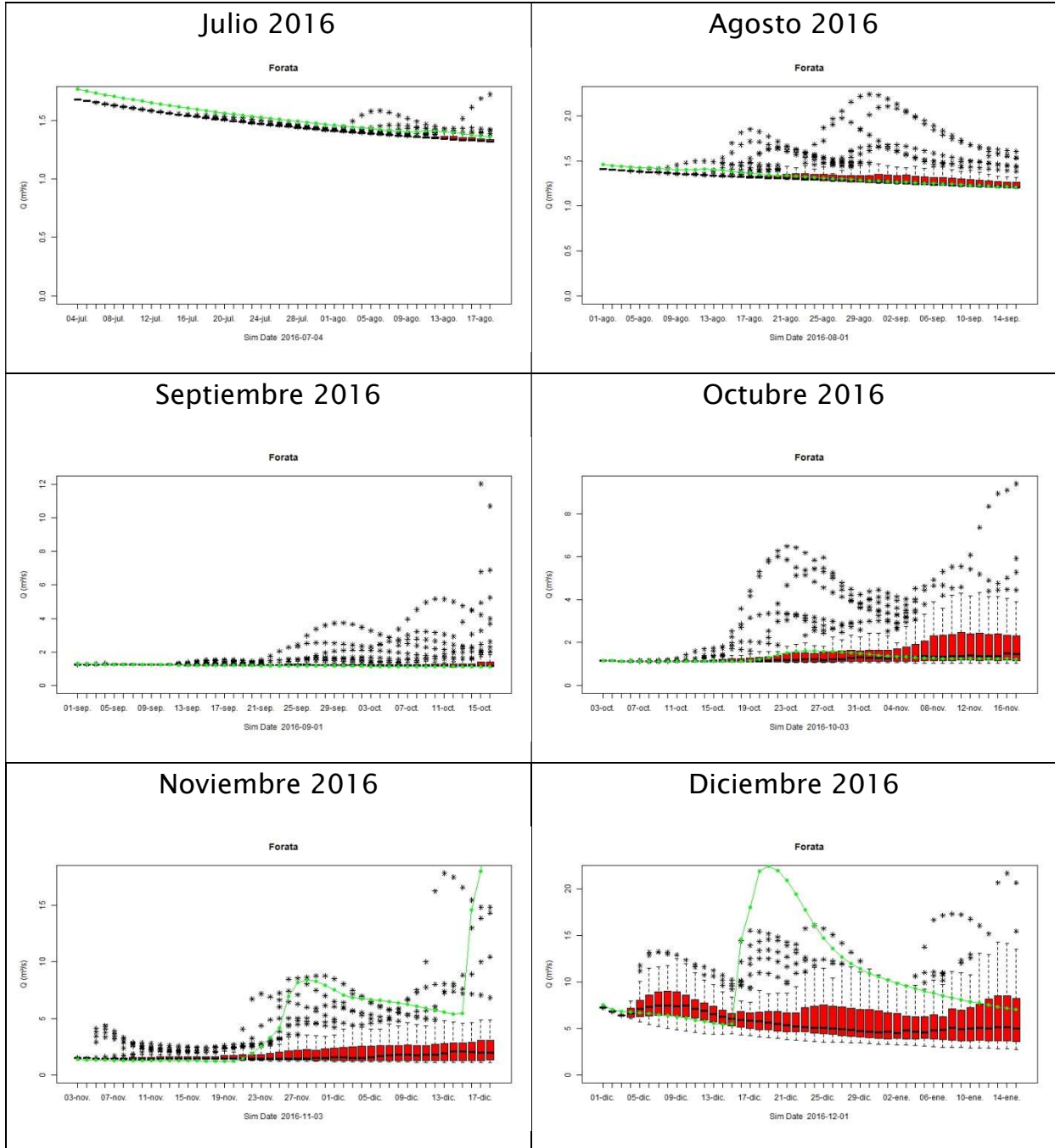






Forata







Tous

