INFORME DE LA TORMENTA
LA PURÍSIMA 2010

DIVISIÓN DE AGUA
SECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
PANAMÁ, MARZO 2014

CANAL DE PANAMÁ

100 años

PREFACIO

El artículo 316 del Título Constitucional XIV de la Constitución de la república de Panamá establece que “a la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) corresponde la responsabilidad de la administración, mantenimiento, uso y conservación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá” (CHCP). La sección de Recursos Hídricos de la División de Agua del Departamento de Ambiente, Agua y Energía de la ACP tiene como misión la administración eficiente, en volumen, del recurso hídrico de la CHCP, cumpliendo de esta manera en gran medida con el objetivo estratégico 4 de la ACP, el cual es “Administrar eficientemente, en volumen y calidad, el recurso hídrico de la cuenca hidrográfica del Canal”.

La sección de Recursos Hídricos tiene presente en su misión tres puntos fundamentales, con los cuales toda adecuada administración del recurso hídrico debe cumplir: (a) pensar siempre a futuro, (b) tomar en cuenta a todos los usuarios o actores que tienen que ver con el recurso, (c) repensar periódicamente todo el esquema establecido.

La eficacia de la aplicación de estos tres puntos se evidenció en el manejo del recurso hídrico del 7 al 9 de diciembre de 2010 con la tormenta “La Purísima 2010”, que fue la más grande en la historia del Canal de Panamá. Durante este evento fue puesto a prueba el programa de Control de Inundaciones de la sección de Recursos Hídricos.

Entre los años 2005 y 2007, con el Canal bajo administración panameña, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) de Panamá asistió a la ACP en el desarrollo del plan de emergencia por inundación para las poblaciones de Guayabalito y Santa Rosa, localizadas en áreas operativas del Canal, aguas abajo de la represa Madden en las riberas del río Chagres. El haber pensado anticipadamente en el desarrollo de este plan y su práctica por los habitantes de estos poblados dio como resultado ninguna pérdida de vida humana cuando se realizaron las operaciones de vertido de emergencia en la represa Madden, en diciembre de 2010.

Los colaboradores de la sección de Recursos Hídricos siempre tienen en cuenta a los actores vinculados al recurso hídrico de la CHCP, a saber: los ciudadanos que viven a orillas de los ríos y lagos, y habitantes de las ciudades de Panamá, Colón y alrededores con el suministro de agua para las potabilizadoras que extraen agua de los embalses Gatún y Alajuela; la actividad naviera del Canal y la generación de energía hidroeléctrica. Los resultados favorables obtenidos del manejo que se le dio a la crisis provocada por “La Purísima 2010”, demuestran el gran beneficio que reditúa con la inversión en tecnología de punta, la cual fue fundamental para afrontar este evento. Pero cabe señalar que este equipamiento de primer orden solo puede ser operado por una fuerza laboral altamente entrenada, comprometida y de gran profesionalismo, como son los colaboradores de la sección de Recursos Hídricos de la ACP.

Jorge A. Espinosa
Gerente de la sección de Recursos Hídricos
Autoridad del Canal de Panama

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este informe no hubiese sido posible sin la colaboración y apoyo de los hidrólogos y meteorólogos de la sección de Recursos Hídricos. En especial el interés y apoyo decidido de la hidróloga Daly Espinosa y el hidrólogo Johnny Cuevas quienes con la colaboración de los hidrólogos Tomás García, Michael Hart, la hidróloga Tamara Muñoz y el meteorólogo Alberto Smith dedicaron largas horas a la revisión de datos y cálculos estadísticos. Gran contribución fue la de los hidrólogos Modesto Echevers, Gerardo Leis y Erick Córdoba, quienes realizaron varias modelaciones hidrológicas; la meteoróloga Gloria Arrocha, quien recabó toda la información meteorológica y escribió varios borradores de la parte meteorológica del informe y el hidrólogo Ajax Murillo que hizo cálculos de los vertidos realizados en las represas de Miraflores, Madden y Gatún durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

El señor Wellington Luck, asistente de oficina de la sección de Recursos Hídricos quien, en conjunto con el equipo de fotógrafos de la ACP, tomó gran cantidad de las fotografías que aparecen en el informe y que ayudan a dar una mejor panorámica de lo ocurrido durante este extraordinario evento hidrometeorológico identificado en la ACP como “La Purísima 2010”.

El hidrólogo Fernando Díaz, que en diversas ocasiones revisó la redacción de varias partes del informe, y el técnico hidrólogo Eduardo Medrano que diseñó la portada preliminar del presente informe. Al hidrólogo investigador del Servicio de Geología de Estados Unidos de América (USGS) Robert Stallard por el asesoramiento desinteresado brindado en identificar, en campo, el nivel de la crecida en la gira del 1 de febrero de 2012, aguas arriba de la estación Chico en el río Chagres.

A todo el personal de la sección de Recursos Hídricos que trabajó intensamente en las operaciones relacionadas con el manejo de los embalses durante la tormenta y días posteriores, brindando apoyo a las comunidades afectadas. Especial fue el apoyo que dio el personal de la Unidad de Hidrología Operativa en lo relativo a la reactivación de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte que abastece de agua potable a más del 80% de la población de la ciudad de Panamá y alrededores. El punto 12.1 del Apéndice 12 muestra los miembros de la sección que participaron en las operaciones relacionadas con “La Purísima 2010”.

TABLA DE CONTENIDO

PREFACIO ii

AGRADECIMIENTOS iv

ÍNDICE DE CUADROS x

ÍNDICE DE FIGURAS xii

1 INTRODUCCIÓN 1

2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA, PRECIPITACIÓN Y RÍOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL CANAL DE PANAMÁ (CHCP) 4

3 PROGRAMA DE CONTROL DE INUNDACIONES 9

4 ANTECEDENTES 9

5 METEOROLOGÍA 10

5.1 Descripción sinóptica 10

5.2 Análisis de cartas meteorológicas en superficie 12

5.3 Análisis de cartas meteorológicas en altura 18

5.4 Análisis de imágenes satelitales 21

5.5 Análisis de los datos de humedad relativa y viento de superficie 30

5.5.1 Humedad relativa 31

5.5.2 Viento de superficie 31

5.6 Análisis del perfil atmosférico (radiosondeo) 34

5.7 Precipitación 40

5.7.1 Análisis de la variación espacial y temporal de la tormenta “La Purísima 2010” en la CHCP 42

5.7.2 Análisis de frecuencias de la precipitación máxima promedio en 24 horas continuas para la CHCP, subcuencas del embalse Gatún (aguas abajo de Madden) y embalse Alajuela, y 10 subcuencas principales. 47

5.7.3 Análisis de frecuencias de la precipitación en el mes de diciembre en la CHCP. 60

6 HIDROLOGÍA 61

6.1 Caudales 61

6.1.1 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Chagres y Pequení hasta las estaciones hidrométricas. 61

6.1.2 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún hasta las estaciones hidrométricas. 68
6.1.3 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande hasta las estaciones hidrométricas....73
6.1.4 Comportamiento del caudal de diciembre de 2010 con respecto al diciembre histórico....78
6.1.5 Análisis de frecuencia de caudales en la estación Chico producto de la tormenta "La Purísima 2010". 80
6.1.6 Reconstrucción de la crecida en el río Chagres hasta Chico....87
6.2 Sedimentos suspendidos 90
6.2.1 Análisis de los caudales sólidos en los ríos principales de la CHCP y aportes a los embalses Alajuela y Gatún 90
6.2.2 Muestreos de sedimentos suspendidos....96
6.2.3 Caudal y producción de sedimentos suspendidos. 100
6.2.4 Tasas de sedimentación en el embalse Alajuela 105
7 MANEJO DE LOS EMBALSES 108
7.1 Antecedentes....108
7.2 Estructuras de vertido del Canal de Panamá 108
7.3 Aportes a los embalses Alajuela y Gatún 109
7.3.1 Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela y a la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá. Período de análisis 1906 a 2010 113
7.4 Caudales de salida de los embalses Gatún y Alajuela 118
7.5 Alcantarillas de las esclusas de Gatún....125
7.6 Alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel 125
7.6.1 Operación de vertidos en el embalse de Miraflores el 7 y 8 de diciembre de 2010....126
7.7 ZONAS DE DECISIÓN PARA EL CONTROL DE LOS EMBALSES....128
7.8 Afectaciones causadas por las operaciones de vertido durante la tormenta extrema "La Purísima 2010"....130
8 NIVELES MÁXIMOS ALCANZADOS POR EL RÍO CHAGRES EN LOS POBLADOS DE SANTA ROSA Y GUAYABALITO DURANTE LA TORMENTA LA PURÍSIMA 135
8.1 Localización de las comunidades de Santa Rosa y Guayabalito....135
8.2 Inspección al sitio....139
8.3 Resultados de la modelación 141

9 BIBLIOGRAFÍA: 144
10 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 147
11 ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS 150
12 APÉNDICE 152
12.1 Personal de la sección de Recursos Hídricos que participó en las operaciones de "La Purísima 2010" 153
12.2 Apéndice de estructuras de vertido del Canal de Panamá 155
12.3 Descripción general de las represas y embalses ubicados en la CHCP 156
12.3.1 Represa y embalse Gatún 156
12.3.2 Represa de Madden y embalse Alajuela 158
12.3.3 Represa-vertedero y embalse Miraflores 161
12.4 Apéndice de fotografías 163

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Diez eventos del tiempo/clima más impactantes del año 2010 a nivel mundial. Estos eventos están listados de acuerdo con su importancia según un panel de expertos en tiempo/clima de la NOAA.	**1**
Cuadro 2	Precipitación diaria del promedio de 36 estaciones en la CHCP, del 1 al 31 de diciembre de 2010.	**11**
Cuadro 3	Promedio diario de humedad relativa de 6 estaciones meteorológicas operadas por la ACP entre el 7 y 9 de diciembre de 2010.	**31**
Cuadro 4	Dirección del viento predominante y promedio de la magnitud del viento de 6 estaciones meteorológicas operadas por la ACP del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**31**
Cuadro 5	Precipitación registrada durante la tormenta “La Purísima 2010” en las estaciones ubicadas en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) y sus alrededores. 41	**41**
Cuadro 6	Precipitación promedio de los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010, y del mes de diciembre del mismo año, en las subcuencas principales de la CHCP.	**45**
Cuadro 7	Precipitaciones máximas promedio en mm en 24 horas continuas en la CHCP - período 1972-2010.	**50**
Cuadro 8	Ajuste de los parámetros de la FDP GVE a precipitaciones máximas promedio en 24 horas en la CHCP para el período de 1972-2010.	**51**
Cuadro 9	Cuadro 9. Las diez mayores tormentas en 24 horas para el período 1940-2010.	**60**
Cuadro 10	Comparación caudal de diciembre 2010 contra diciembre histórico.	**78**
Cuadro 11	Resultados del ajuste de la FDP LP III a caudales máximos de la estación Chico en el río Chagres (1933-2009)	**82**
Cuadro 12	Frecuencias observadas de los caudales máximos promedio diarios por fecha de ocurrencia.	**83**
Cuadro 13	Áreas de influencia de los polígonos de Thiessen de las estaciones de precipitación en la subcuenca del río Chagres.	**89**
Cuadro 14	Mediciones de turbiedad de agua cruda en la planta potabilizadora FGC.	**92**
Cuadro 15	Mediciones de turbiedad en el embalse Alajuela.	**93**
Cuadro 16	Mediciones de turbiedad en el embalse Gatún.	**96**
Cuadro 17	Cuadro 17 ubicadas en los ríos Boquerón, Pequení y Gatún.	**97**
Cuadro 18	Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010 respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Alajuela.	**100**
Cuadro 19	Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010 respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Gatún.	**100**
Cuadro 20	Comparación de producción y caudal de sedimentos suspendidos en las subcuencas del embalse Alajuela y Gatún para el año 2010 contra el período 1998-2007.	**103**

Cuadro 21	Tasas de sedimentación del periodo 1998-2007 y años 2008 a 2010. Subcuenca del embalse Alajuela.	**107**
Cuadro 22	Aportes Máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela, período 1906 a 2010.	**116**
Cuadro 23	Aportes máximos en 24 horas continuas para la CHCP, período 1906 a 2010.	**117**
Cuadro 24	Resultados del ajuste de la FDP LP III a los aportes máximos en 24 horas continuas de los embalses de la CHCP.	**117**
Cuadro 25	Volumen vertido máximo en una hora desde el embalse Gatún (a las 20:00 h del 8 dic 2010)	**119**
Cuadro 26	Vertidos diarios máximos en Gatún desde 1965.	**119**
Cuadro 27	Volumen vertido del embalse Gatún, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**120**
Cuadro 28	Vertido máximo en una hora en Madden (a las 13:00 h del 8 dic 2010).	**120**
Cuadro 29	Vertido en tres días del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**121**
Cuadro 30	Vertidos por las alcantarillas de las esclusas de Gatún los días 8 y 9 de diciembre de 2010.	**125**
Cuadro 31	Vertidos por las alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel los días 8 y 9 de diciembre de 2010.	**125**
Cuadro 32	Descarga de las compuertas de Miraflores durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.	**127**
Cuadro 33	Elevación media de las planicies de inundación según el caudal de descarga desde el vertedero de Madden en el río Chagres, tramo entre Guayabalito y Santa Rosa según el modelo HECRAS, año 2009.	**137**
Cuadro 34	Niveles máximos alcanzados por río Chagres en las comunidades de Guayabalito y Santa Rosa durante el evento “La Purísima 2010”, comparados con los simulados por el modelo hidráulico HEC-RAS.	**141**
Cuadro 35	Niveles máximos del río Chagres durante “La Purísima 2010”, comparados con algunos puntos del puente de la autopista Panamá-Colón y el refugio de Santa Rosa.	**142**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Integrantes del Centro de Comando de Incidentes instalado el 8 de diciembre de 2010.	**3**
Figura 2	Localización geográfica de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá.	**8**
Figura 3	Precipitación media diaria en base a 36 estaciones en la CHCP, del 1 al 31 de diciembre de 2010.	**11**
Figura 4	Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) para el 3, 5 y 6 de diciembre de 2010.	**13**
Figura 5	Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) para el 7 de diciembre de 2010.	**14**
Figura 6	De las figuras a hasta d, cartas meteorológicas de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010.	**16**
Figura 7	Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010.	**17**
Figura 8	Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 10 de diciembre de 2010, 12:00 UTC.	**18**
Figura 9	Carta meteorológica de altura, 700 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.	**19**
Figura 10	Carta meteorológica de altura, 700 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.	**19**
Figura 11	Carta meteorológica de altura, 250 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.	**20**
Figura 12	Mapa meteorológico de altura, 250 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.	**20**
Figura 13	Imágenes satelitales infrarrojas del 5 al 6 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**22**
Figura 14	Imágenes satelitales infrarrojas del 7 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**23**
Figura 15	Imágenes satelitales infrarrojas del 8 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**24**
Figura 16	Imagen satelital infrarroja del 9 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**25**
Figura 17	Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 12:15 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**25**
Figura 18	Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 18:15 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**26**

Figura 19	Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 23:45 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**26**
Figura 20	Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.	**27**
Figura 21	Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.	**27**
Figura 22	Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.	**28**
Figura 23	Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.	**28**
Figura 24	Imágenes satelitales infrarrojas del 9 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.	**29**
Figura 25	Imágenes satelitales de vapor de agua y análisis de divergencia en altura (200 mbar) del 8 de diciembre de 2010. (NOAA).	**29**
Figura 26	Estaciones meteorológicas tipo A ubicadas en la CHCP y áreas operativas del Canal de Panamá.	**30**
Figura 27	Rosa de los vientos de la estación meteorológica Limón Bay durante los días 6, 7, 8 y 9 de dic. 2010.	**32**
Figura 28	Rosa de los vientos de la estación meteorológica Gamboa durante los días 6, 7, 8 y 9 de dic. de 2010.	**32**
Figura 29	Rosa de los vientos de la estación meteorológica Jagua durante los días 6, 7, 8 y 9 de dic. de 2010.	**33**
Figura 30	Rosa de los vientos de la estación meteorológica Balboa FAA durante los días 6, 7, 8 y 9 de dic. 2010.	**33**
Figura 31	Radiosondeo de Corozal oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 7 de dic. de 2010 a las 12:00 UTC.	**35**
Figura 32	Radiosondeo de Corozal oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 8 de dic. de 2010 a las 00:00 UTC.	**36**
Figura 33	Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 8 de dic. de 2010 a las 12:00 UTC.	**37**
Figura 34	Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 9 de dic. de 2010 a las 12:00 UTC.	**38**
Figura 35	Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 10 de dic.de 2010 a las 00:00 UTC.	**39**
Figura 36	Mapa de isoyetas de la tormenta “La Purísima 2010” para la precipitación acumulada durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.	**43**
Figura 37	Mapa de isoyetas de la tormenta “La Purísima 2010” para la precipitación acumulada el 8 de diciembre de 2010 (00:00 a la 24:00).	**44**
Figura 38	Precipitación media en las subcuencas de la CHCP, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**46**
Figura 39	Curva masa de precipitación media durante los tres días de la tormenta en la CHCP.	**47**
Figura 40	Registro de precipitación máxima promedio en 24 horas en la CHCP y en las cuencas de los embalses Gatún y Alajuela en el período 1972-2010.	**49**
Figura 41	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá.	**53**

Figura 42	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca de Gatún aguas abajo.	**54**
Figura 43	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio 24 horas para la subcuenca del embalse Alajuela.	**55**
Figura 44	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca del río Gatún.	**56**
Figura 45	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca embalse Gatún.	**57**
Figura 46	Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca del río Trinidad.	**58**
Figura 47	Períodos de retorno de la tormenta “La Purísima 2010” según el área geográfica analizada en la CHCP.	**59**
Figura 48	Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Chagres y Pequení con los valores de precipitación durante la tormenta.	**62**
Figura 49	Curva masa de precipitación horaria de estaciones ubicadas en la subcuenca del río Chagres hasta Chico.	**63**
Figura 50	Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Pequení hasta Candelaria.	**64**
Figura 51	Colaboradores de la ACP y terceros que asistieron a la gira de campo el 1 de febrero de 2011 a realizar las investigaciones necesarias para reproducir el hidrograma de la crecida del 8 de diciembre de 2010 en la estación Chico del río Chagres.	**65**
Figura 52	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de diciembre de 2010. Río Chagres hasta Chico. El hidrograma fue reconstruido con el modelo Sacramento.	**67**
Figura 53	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de diciembre de 2010. Río Pequení hasta Candelaria.	**68**
Figura 54	Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún con los valores de precipitación durante la tormenta.	**70**
Figura 55	Curva masa de precipitación horaria de estaciones ubicadas en la subcuenca del río Boquerón hasta Peluca.	**71**
Figura 56	Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Gatún hasta Ciento.	**71**
Figura 57	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Boquerón hasta Peluca.	**72**
Figura 58	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Gatún hasta Ciento.	**72**
Figura 59	Envolvente de crecidas máximas para el istmo centroamericano y mundial. Fuente: U.S. Geological Survey, U.S. Dept. of the Interior, Mark E. Smith, Jeffrey V. Phillips and Norman E. Spahr, Hurricane Mitch: Peak Discharge for Selected River in Honduras, 2002.	**73**
Figura 60	Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande con los valores de precipitación durante la tormenta.	**75**
Figura 61	Curva masa de precipitación horaria de estaciones ubicadas en subcuenca del río Trinidad hasta El Chorro.	**76**

Figura 62	Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Cirí Grande hasta Los Cañones.	**76**
Figura 63	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Trinidad hasta El Chorro.	**77**
Figura 64	Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Cirí Grande hasta Los Cañones.	**77**
Figura 65	Comparación de los caudales registrados en las estaciones hidrométricas ubicadas en la CHCP en diciembre de 2010 con respecto al promedio histórico.	**79**
Figura 66	Análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos de la estación Chico (1972- 2009).	**81**
Figura 67	Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio diarios de la estación Chico (1933-2010).	**84**
Figura 68	Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio en dos días consecutivos en la estación Chico (1933-2010).	**85**
Figura 69	Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio en tres días consecutivos en la estación Chico (1933-2010).	**86**
Figura 70	Subcuencas de la CHCP según el modelo PANFCST (Datos de entrada al sistema de modelación). Nótese que no aparece el espejo de agua del embalse Alajuela en esta versión del modelo.	**88**
Figura 71	Poligonos de Thiessen en la subcuenca del río Chagres.	**89**
Figura 72	Hidrograma de caudales cada hora en el río Chagres hasta la estación Chico, del 6 al 11 de dic. de 2010.	**90**
Figura 73	Estaciones de muestreos de calidad de agua en el embalse Alajuela, toma de muestras el 16 de diciembre de 2010. Fuente: Informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal 2008-2009.	**94**
Figura 74	Estaciones de muestreos de calidad de agua en el embalse Gatún, toma de muestras entre el 10 y 15 de diciembre de 2010. Fuente: Informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal 2008-2009.	**95**
Figura 75	Curva de descarga de sedimentos suspendidos de 2010, estación Peluca en el río Boquerón y Los Cañones en el río Ciríi Grande.	**98**
Figura 76	Hidrogramas de elevaciones y concentraciones de sedimentos suspendidos del 7 al 10 de diciembre de 2010, estación Ciento en el río Gatún y Peluca en el río Boquerón.	**99**
Figura 77	Producción de sedimentos suspendidos, año 2010 (t/año/km2)	**104**
Figura 78	Fotos tomadas en la parte alta de la cuenca del río Chagres y en la represa Madden.	**106**
Figura 79	Hidrograma de aportes promedio horarios e histograma de precipitación de la subcuenca del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**111**
Figura 80	Hidrograma de aportes promedios horarios e histograma de precipitación de la CHCP, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**112**
Figura 81	Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela (1906-2009).	**114**

Figura 82	Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas para la CHCP (1906-2010).	**115**
Figura 83	Hidrogramas de caudales de entrada y salidas, y elevaciones del embalse Gatún, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**122**
Figura 84	Hidrogramas de elevaciones y caudales de entrada y salida del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.	**123**
Figura 85	Diagrama con la operación de las compuertas del vertedero de Madden, del 7 al 10 de dic. de 2010.	**124**
Figura 86	Diagrama de zonas de decisión con la operación de control de Inundaciones realizada desde el 6 al 10 de diciembre de 2010.	**129**
Figura 87	Casas localizadas en Santa Rosa, aguas abajo de la represa Madden, afectadas por los vertidos, 8 de diciembre de 2010.	**132**
Figura 88	Santa Rosa, una de las comunidades afectadas por los vertidos, 9 de diciembre de 2010.	**132**
Figura 89	Estación telemétrica Santa Rosa, afectada por la tormenta “La Purísima	**133**
Figura 90	Casa ubicada en el poblado de Guayabalito, afectada por los vertidos de Madden, 8 de dic. de 2010.	**133**
Figura 91	Rastros de crecida en la estación río Chagres Chico, diciembre de 2010.	**134**
Figura 92	Localización regional de los poblados de Santa Rosa y Guayabalito. Planicies de inundación en los poblados de Santa Rosa y Guayabalito.	**136**
Figura 93	Niveles medios de las elevaciones del agua en el río Chagres, simulados con HEC-RAS	**138**
Figura 94	Inspección por hidrólogos y meteorólogos de la sección de Recursos Hídricos en sitio del área afectada, cerca del puente sobre el río Chagres de la autopista Panamá-Colón, 22 de dic. de 2010.	**140**
Figura 95	Determinación del nivel máximo alcanzado por las aguas en la estación Santa Rosa por el personal de la sección de Recursos Hídricos, Luis Martéz detrás del nivel topográfico, Gerardo Leis verificando con los mapas, José Asprilla con la mira y Ajax Murillo en la puerta de la estación, 22 de dic. de 2010.	**140**
Figura 96	Niveles máximos del río Chagres y diferencia con algunos puntos importantes del puente de la autopista Panamá-Colón.	**143**
Figura 97	Personal de la sección de Recursos Hídricos. 18 Octubre de 2010.	**154**
Figura 98	Represa de tierra y vertedero de Gatún.	**156**
Figura 99	Foto represa -vertedero Madden.	**159**
Figura 100	Foto represa -vertedero Miraflores.	**161**

1 INTRODUCCIÓN

Varios patrones climáticos de gran escala influyeron mundialmente sobre las condiciones del clima y patrones del tiempo durante el año 2010. La transición de la fase cálida de El Niño a principios de año a la fase fría de La Niña para el mes de julio contribuyó con muchos eventos significativos. La fase negativa de la oscilación del Ártico fue el mayor generador de los patrones de temperaturas durante el invierno de 2009/10 y nuevamente hacia finales de 2010. Esto contribuyó a establecer un récord histórico en la cantidad de nieve y temperaturas inusualmente frías sobre la mayor parte del norte de Eurasia y partes de Estados Unidos de América (EEUU), mientras se registraban temperaturas por encima de lo normal en las latitudes más nórdicas (Blunden, et. al., Eds., 2011).

La temperatura media global de la Tierra y de la superficie de los océanos de 2010 estuvo dentro de los dos años más cálidos del registro. La precipitación anual global sobre el área cubierta de tierra del planeta estuvo 5% por encima de lo normal (Kaplan, 2011). El cuadro 1 muestra los 10 eventos del tiempo/clima más impactantes del año 2010 a nivel mundial.

Los resultados del Foro Regional del Clima de Centro América y las Discusiones del CENTRO DE PREDICCIONES CLIMÁTICAS DE ESTADOS UNIDOS (NCEP[1]/NWS)[2], indicaban, para los tres primeros meses de 2010, la prevalencia de las condiciones de la fase cálida de El Niño. Pero, según las observaciones continuas de las condiciones hidrometeorológicas globales y el seguimiento que hace la sección de Recursos Hídricos de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) a los indicadores climatológicos locales, al Foro Regional del Clima de Centro América y a los resultados de las corridas de los modelos de pronóstico Global (IRI), esas condiciones fueron cambiando hacia situaciones favorables para la transición hacia la fase fría de La Niña, durante el período junio a agosto de 2010.

Del 7 al 9 de diciembre de 2010 se presentó una tormenta estacionaria, la más grande ocurrida en toda la historia del Canal, que afectó sus áreas operativas, principalmente en la región noreste de la cuenca, en donde se generó aportes extraordinarios y provocó de manera natural más de 500 deslizamientos de tierra que removieron gran cantidad de bosque y lodo. La tierra, árboles y piedras producto de estos deslizamientos fueron arrastrados y transportados al embalse Alajuela por la fuerza del agua. Siguiendo la normativa del Sistema de Comando de Incidentes que utiliza la ACP para el manejo de emergencias, que indica que a toda tormenta que cause una emergencia debe dársele nombre, a esta tormenta se le nombró “La Purísima”. Históricamente los campesinos de la vertiente atlántica de Panamá le han otorgado el nombre “La Purísima” a aquella gran tormenta que se da cinco días antes o después del 8 de diciembre, día de la “Inmaculada Concepción de la Virgen María”, según el calendario de la Iglesia católica.

[1] NCEP: National Centers for Environmental Prediction
[2] NWS: National Weather Service

Esta es la última gran tormenta que se presenta en el año antes del inicio de la temporada seca e indica el final de las prácticas agrícolas de los cultivos tradicionales (Prensa.com, 12 diciembre de 2010).

Debido a esto, la tormenta que se dio en diciembre de 2010 en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá se le nombró "**La Purísima 2010**" para distinguirla de otras llamadas "La Purísima" que se han dado en otros años.

El 8 de diciembre de 2010 se presentó la mayor cantidad de lluvia caída en 24 horas en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) desde que se tiene registro. El 9 de diciembre la intensidad de la lluvia disminuye considerablemente, sin embargo, la inestabilidad atmosférica persistente en el área, produce precipitaciones moderadas hasta el 14 de diciembre de 2010.

El análisis de la precipitación máxima promedio registrada en 24 horas continuas, para el período 1972-2010, de la CHCP, indica que la tormenta "La Purísima 2010" tiene un período de retorno de 108 años, en la subcuenca Gatún, aguas abajo de la represa Madden, de 69 años, y en la subcuenca del embalse Alajuela, 113 años. Se observó además que, en los 39 años analizados, las cinco mayores tormentas se han presentado en los últimos 10 años.

Debido a la ocurrencia de aportes hídricos extraordinarios asociados a "La Purísima 2010" se sobrepasó la capacidad de almacenamiento de los embalses Alajuela y Gatún, haciendo necesario realizar de manera inmediata operaciones de emergencia para el desalojo de estos excedentes con el fin de hacer prevalecer las condiciones de seguridad con las que la Autoridad del Canal de Panamá está comprometida en su misión de operar el Canal.

En consecuencia de la tormenta, el 8 de diciembre se declara en el Canal una emergencia por inundación y se decide, siguiendo las indicaciones del Manual de Control de Inundaciones de la sección de Recursos Hídricos de la ACP, utilizar las alcantarillas de las esclusas de Gatún y Pedro Miguel como aliviaderos para aumentar los vertidos. Con esta acción se logró hacer frente a la tormenta y se mitigaron los efectos negativos que pudieron presentarse en la operación y seguridad del Canal. Las operaciones causaron la suspensión temporal del tránsito de buques durante 17 horas, la activación por primera vez del Centro de Manejo de Incidentes y la aplicación del Sistema de Comando de Incidentes. Además, la realización de vertidos desde la represa de Madden causó inundaciones en los poblados Santa Rosa y Guayabalito, y el movimiento de gran cantidad de vegetación acuática producto de las fuertes corrientes del río Chagres en Gamboa. Hay que indicar que esta fue la cuarta vez en la historia del Canal que se interrumpe el tránsito de buques, debido a la utilización de las alcantarillas de las esclusas como aliviaderos (Morrow, 1924; Panama Canal Company, 1932; U.S.A. Congressional Record, 1954).

Cuadro 1 Diez eventos del tiempo/clima más impactantes del año 2010 a nivel mundial. Estos eventos están listados de acuerdo con su importancia según un panel de expertos en tiempo/clima de la NOAA.

Orden	Evento
1	**Olas de calor en Rusia y la sequía** Julio de 2010 fue el mes más cálido conocido en Moscú desde el comienzo de los registros meteorológicos contemporáneos. La temperatura llegó a superar en 7.8 °C el promedio de largo período (el máximo anterior, registrado en julio de 1938, fue 5.3 °C superior al promedio). Se superaron más de 20 registros máximos de temperatura diaria, incluida la temperatura máxima absoluta en Moscú.
2	**Año 2010 [cerca a ser] el más caluroso del registro.** Extraoficialmente, en 19 naciones se superaron todos los récords de calor extremo en 2010. Esto incluye Asia con la temperatura más alta de todos los tiempos, el notable 128.3 °F (53.5 °C) en Pakistán en mayo de 2010. Los países que registraron temperaturas extremas altas en el 2010 representan más del 20% de la superficie de la Tierra.
3	**Inundaciones en Pakistán** Durante la temporada monzónica de 2010, Pakistán experimentó las crecidas más graves de su historia. Las crecidas afectaron a 84 de los 121 distritos de Pakistán, y a más de 20 millones de personas (la décima parte de la población de ese país). Murieron más de 1 700 personas y resultaron dañados no menos de 1.8 millón de hogares.
4	**Transición de El Niño a La Niña** El año 2010 comenzó con un fuerte episodio de El Niño. Sin embargo, El Niño se desvaneció rápidamente cambiando a final del año a La Niña muy fuerte. Desde 1950, que existen registros exactos, solo 1973 se ha visto un cambio tan extremo de El Niño a La Niña.
5	**Oscilación ártica negativa** El Ártico está por lo general sometido a un sistema de **baja presión**, mientras que en las **latitudes medias** (como Europa) predomina una **presión más alta**. Gracias a esa diferencia de presión, el aire frío se mantiene en el Ártico. A esto se le conoce como una fase positiva de la oscilación antártica. En 2010 los sistemas de presión se debilitaron extremadamente, disminuyendo la presión entre el Ártico y las latitudes medias. Entonces, el aire frío del Ártico fue arrastrado hacia el sur, mientras el aire más cálido se deslizaba hacia los polos, a esto se le llama oscilación negativa. El extremo de la circulación del Ártico causó un extraño revés de invierno en América del Norte - Canadá tuvo su invierno más cálido y seco de la historia, obligando a que la nieve se transportara en camiones para los Juegos Olímpicos de Invierno en Vancouver, pero EEUU tuvo su invierno más frío en 25 años. Una serie de tormentas de nieve notables golpeó EEUU.
6	**Sequía en Brasil** La selva tropical del Amazonas experimentó sequía durante el año 2010. En el río Negro, afluente del río Amazonas, el nivel del agua bajó cuatro metros (13 pies) por

Orden	Evento
	debajo de su nivel habitual en una temporada de sequía. Este fue su nivel más bajo desde 1902. La sequía en el Amazonas ocurre en promedio una vez cada 12 años. En el siglo XX estas sequías normalmente se produjeron durante los años de El Niño. Sin embargo, en 2005 y 2010 las sequías no se producen durante las condiciones de El Niño, y existe la teoría de que fueron causadas más bien por registrar las temperaturas cálidas de la superficie marina en el Atlántico.
7	**Temporada de huracanes del Pacífico NE históricamente Inactiva** El año 2010 fue uno de los más extraños en el registro de los ciclones tropicales. Cada año, el mundo tiene cerca de 92 ciclones tropicales, el nombre de huracanes en el Atlántico y el Pacífico del este, los tifones en el Pacífico occidental, y los ciclones tropicales en el hemisferio sur. Sin embargo, en 2010 solo hubo 68 de estas tormentas - la menor cantidad desde la era de los satélites en 1970. El año récord anterior fue 1977, cuando 69 ciclones tropicales se produjeron en todo el mundo. Un tema común de muchas publicaciones recientes sobre el futuro de los ciclones tropicales a nivel mundial en el calentamiento global es que el número total de estas tormentas se reducirá, pero las tormentas se harán cada vez más fuertes.
8	**Retroceso histórico de la nieve en el hemisferio norte** La extensión de la capa de nieve en el hemisferio norte en mayo de 2010 fue récord mínimo, con el dato de 4.3 millones de kilómetros cuadrados por debajo de la media. La superficie de nieve medida en el hemisferio norte entre marzo y mayo fue la cuarta más pequeña de la historia.
9	**Mínima extensión del hielo marino** El hielo marino del Ártico alcanzó su tercera menor extensión de área registrada en septiembre de 2010, en comparación con los niveles de hielo marino de hace 30 años. El Ártico ha registrado una pérdida constante de metros de espesor. Como resultado, el volumen del hielo marino en el año 2010 fue el más bajo de la historia. Más de la mitad de la capa de hielo polar en volumen - 60% - había desaparecido en septiembre de 2010. En diciembre de 2010, el hielo del mar Ártico se redujo a su punto más bajo de invierno de la historia, el comienzo de una racha de tres meses de mínimos históricos.
10	**Sequía en China** En abril de 2010, el suroeste de China sufrió una sequía que afectó a más de 50 millones de personas y unas 7 millones de hectáreas de tierras de cultivo. En la famosa y turística Lijiang, al norte de la provincia de Yunnan, el agua caída en los últimos cinco meses ha sido once veces menor que en un año normal. Mientras, la temperatura media ha pasado de ocho a más de nueve grados. Otras regiones como Chongqing, Sichuán, Guizhou y Guangxi han corrido la misma suerte.

Fuente: NOAA, http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2010/13

Figura 1 Integrantes del Centro de Comando de Incidentes instalado el 8 de diciembre de 2010.

En la figura 1 se muestra la foto con los integrantes del Centro de Comando de Incidentes instalado el 8 de diciembre de 2010, para el manejo de la emergencia causado por la tormenta "La Purísima 2010". De izquierda a derecha, alrededor de la mesa, Manuel Benítez, vicepresidente ejecutivo del Departamento de Operaciones; Miguel Rodríguez, gerente ejecutivo de la División de Operaciones de Tránsito; Jorge Espinosa, gerente de la sección de Recursos Hídricos; Carlos Vargas, gerente ejecutivo de la División de Agua; Alberto Alemán, administrador del Canal de Panamá, y de espaldas Antonio Michel, gerente ejecutivo de la División de Protección y Respuesta a Emergencias.

Debido a que las intensidades máximas de precipitación se localizaron en la parte alta de la cuenca del río Chagres, es en esa área donde ocurre la mayor cantidad de deslizamientos, lo que produce los mayores aportes de sedimentos al embalse Alajuela desde su formación en 1933. En vista de que la toma de agua cruda de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (FGC) se halla ubicada en el embalse Alajuela, esta tormenta causó la mayor crisis en la historia de la planta, situación que obligó al Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) a reducir la producción de agua potable, afectando a la población de la ciudad de Panamá y alrededores por aproximadamente 60 días.

La tormenta "La Purísima 2010" ha superado casi todas las marcas de los registros históricos del Canal: el nivel de agua del embalse Gatún alcanzó 26.99 m (88.57 pies) PLD ocupando la

posición número 1 en 97 años de registro y para Alajuela 78.51 m (257.60 pies) PLD que ocupó la posición número 2 en 75 años de registro.

La primera parte de este informe da a conocer la localización de la CHCP y sus características climáticas e hidrológicas muy generales, seguidamente se mencionan las actividades que se realizaron antes de que entrara la temporada lluviosa como parte del Programa de Control de Inundaciones.

Otro apartado se dedicará a la descripción sinóptica de la tormenta, la precipitación registrada y su comparación con los registros históricos, análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas para determinar los períodos de retorno de la tormenta en la CHCP y subcuencas, y el mapa que muestra la distribución espacial de la precipitación acumulada durante los tres días del evento.

Como complemento de este documento se presentan los niveles y caudales máximos registrados en las estaciones hidrométricas y su comparación con los registros históricos, el análisis de los caudales pico y volúmenes máximos en tres días consecutivos en la estación hidrométrica Chico en el río Chagres, ubicada en la zona de mayor afectación; y los caudales de sedimentos suspendidos para los ríos de la cuenca, los balances hídricos para la cuenca del embalse Alajuela, aguas abajo y en la CHCP, manejo de los embalses durante la tormenta, operaciones de vertidos desde Madden y Gatún, vertidos extraordinarios usando las alcantarillas de Gatún y Pedro Miguel.

2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA, PRECIPITACIÓN Y RÍOS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL CANAL DE PANAMÁ (CHCP)

La cuenca hidrográfica Canal de Panamá (CHCP) se localiza en la parte central de la república de Panamá, entre las coordenadas 8º 40’ y 9º 30’ de latitud Norte y 79º 14’ y 80º 08’ de longitud occidental (ACP, 2001), y tiene una superficie total de 3338 km^2, lo que representa un 4.4% del territorio nacional[3]. La superficie de la CHCP está distribuida entre las provincias de Panamá y Colón.

La variación estacional de la lluvia sobre la CHCP como en el resto de Panamá es bien marcada. La temporada seca normalmente empieza a mediados de diciembre y tiene una duración aproximada de cuatro meses, mientras que la temporada lluviosa abarca el período restante de ocho meses del año.

Los principales factores meteorológicos causantes de la precipitación en la CHCP son: la zona de convergencia intertropical (ZCIT), las ondas del este, las zonas de baja presión, los empujes o frentes fríos y los ciclones tropicales.

[3] Manual de Control de Inundaciones de la ACP, revisión 2009.

Durante la estación lluviosa, la ZCIT se ubica cerca de Panamá y las ondas del este empiezan a pasar sobre la región, lo cual aumenta la actividad de tormentas sobre el istmo. La incursión de los empujes fríos en el país, al final de la temporada lluviosa, pueden traer sistemas de tormentas con duración de varios días que aumentan significativamente la precipitación en la CHCP. Los empujes fríos asociados al invierno del hemisferio norte son más comunes entre los meses de octubre y febrero (US Department of Commerce, 1942; Zárate, 2005).

Las zonas de baja presión, que pueden asociarse e interactuar con las ondas del este, pueden desarrollar sistemas convectivos con duración de varios días, causando grandes cantidades de precipitación en el área (Fernández W. y J.A: Barrantes, 1996; Galo, E.R., et. al., 1996). Las tormentas tropicales que se forman en el Caribe pueden dejar altas cantidades de lluvia en la CHCP si pasan cerca de esta, sin embargo, este fenómeno no es tan frecuente.

Los seis ríos principales de la CHCP están provistos de estaciones hidrométricas, son relativamente cortos y pronunciados, con valles que tienen poca capacidad de almacenamiento y que tienden a producir escorrentías rápidas. Los ríos principales en la cuenca del embalse Alajuela son el Pequení, Boquerón y Chagres. En la cuenca aguas abajo de la represa de Madden los ríos principales son: Trinidad, Cirí Grande y Gatún[4]. La escorrentía superficial es estacional y extremadamente variable, siguiendo el patrón de las precipitaciones. El período lluvioso se inicia alrededor de mayo, la escorrentía comienza a aumentar hasta noviembre, cuando normalmente se presenta la más alta, y gradualmente va disminuyendo durante la temporada seca, la cual se inicia generalmente a mediados de diciembre. En la figura 2 se presenta la localización geográfica de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá y de las estaciones hidrometeorológicas (CHCP).

[4] Manual de Control de Inundaciones de la ACP.

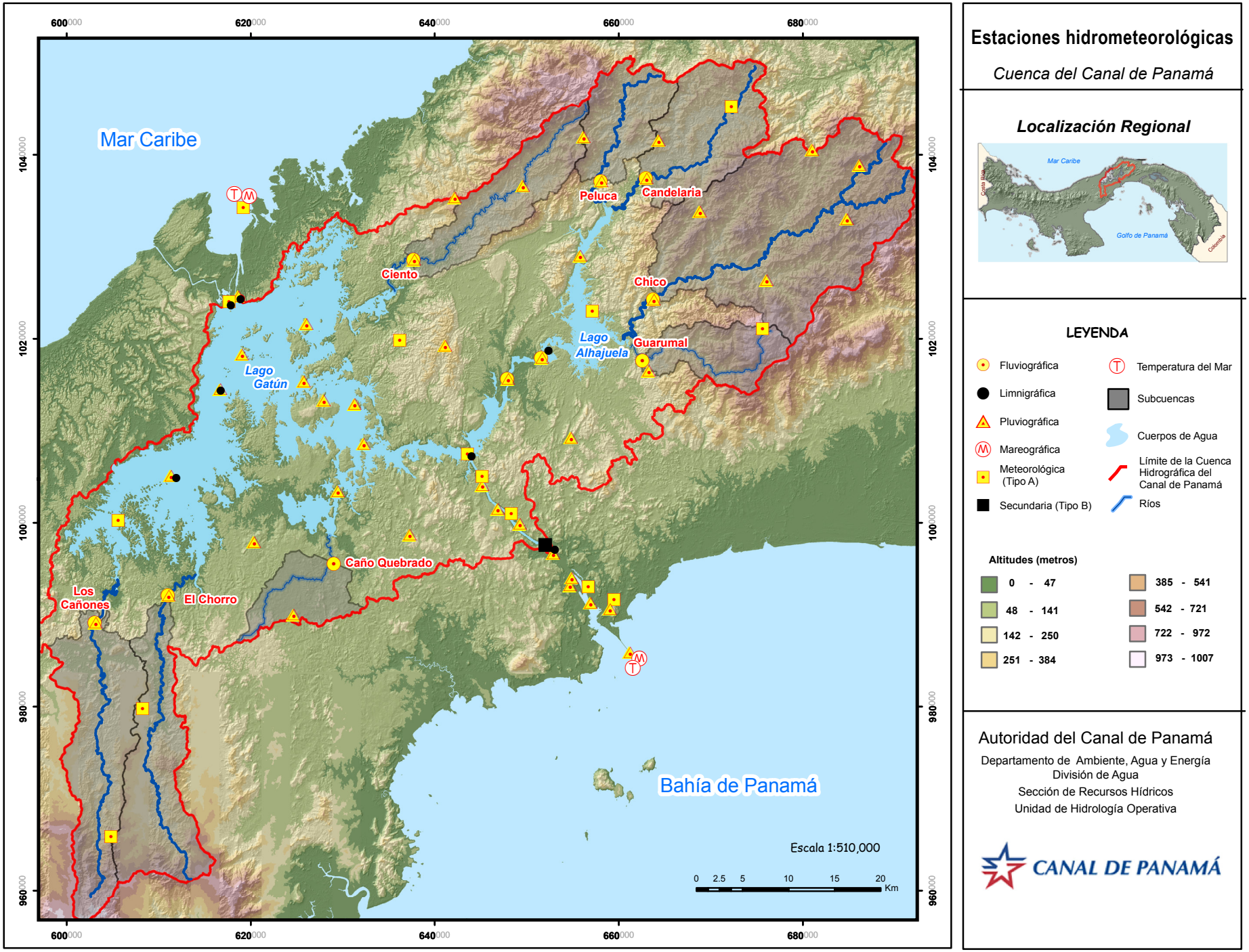


Figura 2 Localización geográfica de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá.

3 PROGRAMA DE CONTROL DE INUNDACIONES

La temporada de Control de Inundaciones 2010 de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) comenzó el miércoles 25 de agosto con la reunión de inicio del programa de Control de Inundaciones (PCI), el cual está bajo la responsabilidad de la sección de Recursos Hídricos (EAAR). Usualmente la temporada de Control de Inundaciones va de septiembre a enero.

Como todos los años, el PCI de la ACP cumplió con las actividades del programa diseñado con la finalidad de salvaguardar vidas y bienes de las comunidades localizadas alrededor de los embalses y aguas abajo de los vertederos de las represas, y garantizar la integridad de las estructuras y las operaciones continuas del Canal de Panamá.

Para lograr los objetivos del PCI, la sección de Recursos Hídricos coordina también el programa de Mantenimiento del Sistema de Represas y Vertederos (PMSRV) de la ACP, para garantizar su seguridad estructural y operación confiable cuando se requiera hacer apertura y cierre de las compuertas del sistema de vertedero.

En el último simulacro de inundación realizado el 14 de octubre de 2010, se utilizó por segunda vez el Sistema de Comando de Incidentes, que fue conveniente para poder afrontar de manera exitosa la tormenta del 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

La administración de los recursos hídricos de la cuenca del Canal, que incluye la medición de los volúmenes de agua, el programa de vigilancia de la cobertura vegetal, el de seguimiento y vigilancia de la calidad del agua, el de mantenimiento del sistema de presas y vertederos, y el programa de Control de Inundaciones incidieron en el éxito de la operación en la tormenta “La Purísima 2010”.

4 ANTECEDENTES

El domingo 7 de noviembre de 2010 se realizaron los primeros vertidos preventivos de agua por el vertedero de Gatún, debido a una tormenta fuerte que se dejó sentir en gran parte del occidente del país, y que en la CHCP se concentró principalmente en el área del embalse Gatún (espejo de agua) y en la subcuenca del río Gatún. Este fenómeno estaba relacionado con el paso de la tormenta tropical “Tomás” por el Caribe y su posterior interacción con un frente frío en el océano Atlántico Norte. Las fuertes lluvias producto de la tormenta causaron una escorrentía muy alta, que produjo una rápida elevación del embalse Gatún en el mes de noviembre de 2010, por lo que se requirió llevar a cabo los primeros vertidos del año, para garantizar la seguridad de las estructuras del Canal de Panamá.

El día 6 de diciembre de 2010, un sistema de baja presión se encontraba localizado aproximadamente a 50 kilómetros de distancia del archipiélago de San Blas, y al mismo tiempo un frente frío se desplazaba desde el norte hacia la región centroamericana.

El día 7 de diciembre, como lo muestra la figura 5, el sistema de baja presión se aproxima al país, penetrando por la cuenca del Alto Chagres y comienza a generar cantidades significativas de precipitación que posteriormente se extendió a la cuenca del embalse Gatún. Esa noche, una vaguada pre-frontal, asociada al frente frío, pasa a interactuar con el sistema de baja presión, intensificando la precipitación y aumentando la extensión de esta de modo que toda la cuenca del Canal pasa a recibir estos aportes.

5 METEOROLOGÍA

5.1 Descripción sinóptica

El día 3 de diciembre de 2010 una zona de baja presión, como se aprecia en la figura 4a, se ubicaba sobre la CHCP causando precipitaciones considerables. Esta baja presión se disipó el 4 de diciembre, sin embargo, en el norte de Colombia persistía una gran actividad convectiva, asociada a una vaguada localizada entre la frontera de Colombia y Venezuela. Los días 4 y 5 de diciembre no se dio desarrollo significativo de tormentas sobre la CHCP, registrando promedios de precipitación bajos y condiciones atmosféricas típicas de la entrada de la estación seca, con días soleados.

La precipitación media del 6 de diciembre de 2010 sobre la CHCP fue moderada, y al este de ella se podía apreciar actividad convectiva en las imágenes satelitales. Esta actividad se convirtió en un área de baja presión (1009 mbar) que se muestra en la figura 5 que presenta la carta meteorológica de superficie de la NOAA a las 00:00 UTC del 7 de diciembre. El área de baja presión se desplazó cerca de la CHCP, donde se registraron grandes cantidades de precipitación, particularmente sobre la parte alta de la cuenca del río Chagres, durante los días 7, 8 y 9 de diciembre. El 8 de diciembre se formó una vaguada sobre el mar Caribe, como se aprecia en la figura 6, la cual se extendía desde el área de baja presión sobre Panamá, hasta la isla La Española. La baja presión se intensificó el 9 de diciembre, llegando a 1008 mbar, sin embargo, el centro de esta se había desplazado al noreste, alejándose de la CHCP. La precipitación promedio durante el 9 de diciembre fue alta, pero de mucho menor magnitud que la registrada durante los días 7 y 8 de diciembre, como se observa en el cuadro 2 y en la figura 3, en las que se muestran los valores de la precipitación diaria del promedio, en base a 36 estaciones en la CHCP, del 1 al 31 de diciembre de 2010.

Cuadro 2 Precipitación diaria del promedio de 36 estaciones en la CHCP, del 1 al 31 de diciembre de 2010.

Fecha	P diaria (mm)	Fecha	P diaria (mm)	Fecha	P diaria (mm)
01-Dic	31.2	12-Dic	25.1	23-Dic	7.6
02-Dic	38.6	13-Dic	58.9	24-Dic	6.5
03-Dic	47.9	14-Dic	25.0	25-Dic	25.5
04-Dic	9.3	15-Dic	7.2	26-Dic	93.0
05-Dic	1.5	16-Dic	1.4	27-Dic	81.5
06-Dic	30.0	17-Dic	0.2	28-Dic	51.0
07-Dic	157.0	18-Dic	0.3	29-Dic	6.3
08-Dic	183.0	19-Dic	12.6	30-Dic	18.2
09-Dic	43.0	20-Dic	5.7	31-Dic	5.7
10-Dic	29.5	21-Dic	1.0		
11-Dic	29.8	22-Dic	8.6		

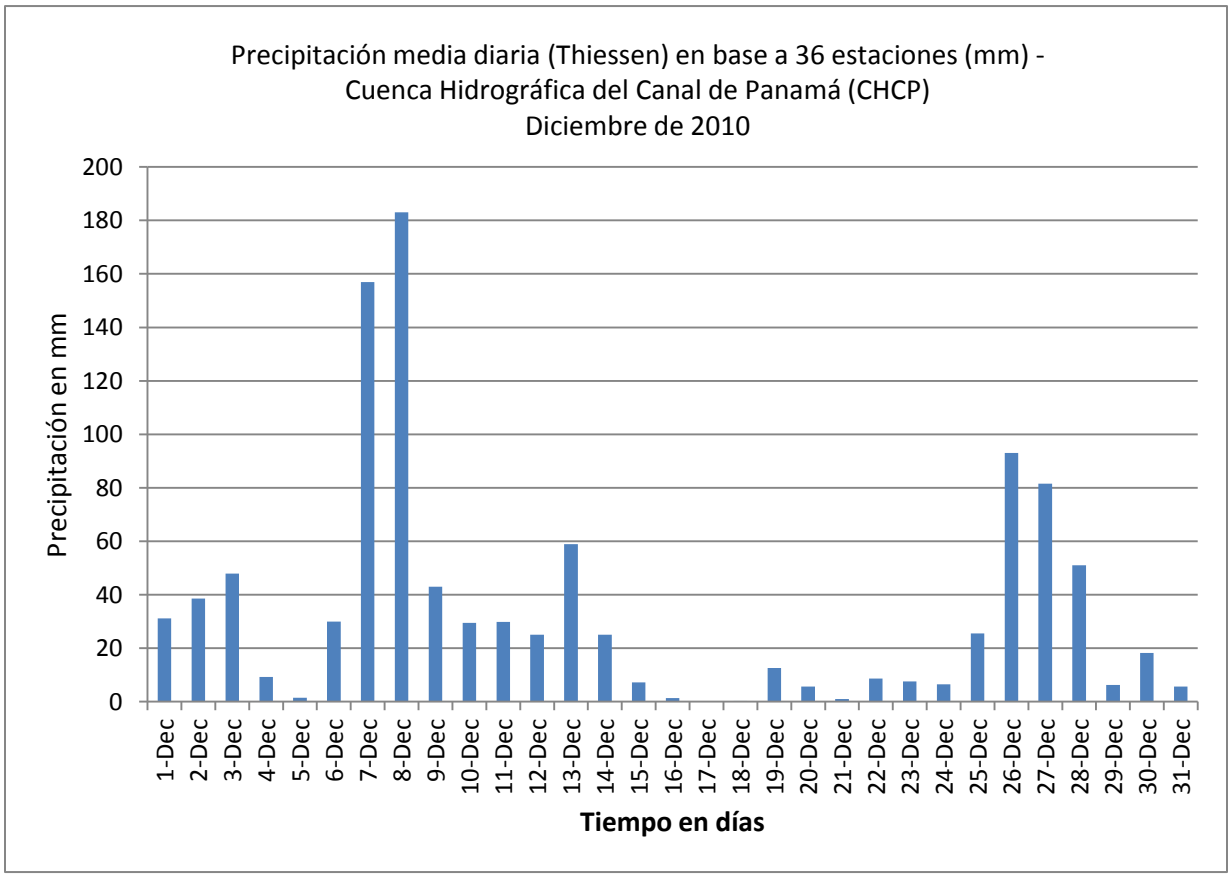
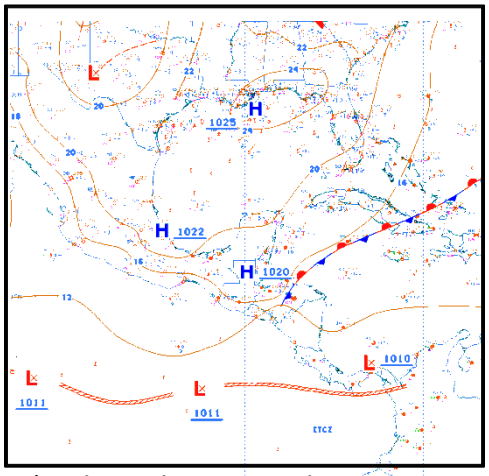


Figura 3 Precipitación media diaria en base a 36 estaciones en la CHCP, del 1 al 31 de diciembre de 2010.

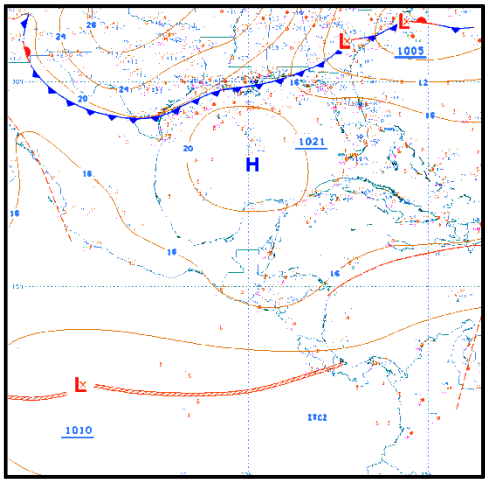
5.2 Análisis de cartas meteorológicas en superficie

La figura 4 muestra las cartas meteorológicas de superficie para el 3, 5 y 6 de diciembre de 2010. El 3 de diciembre se observa una baja presión cerca de la CHCP. Los días 4, 5 y 6 de diciembre se caracterizan por la presencia de un frente estacionario en el mar Caribe, extendiéndose desde las costas de Honduras hacia Cuba, y la ZCIT al oeste de Panamá. El 5 de diciembre se analiza una vaguada sobre el lago Maracaibo cerca de la frontera entre Colombia y Venezuela. Igualmente, las estaciones ubicadas en Panamá y el noroeste de Colombia indican cielos nublados.

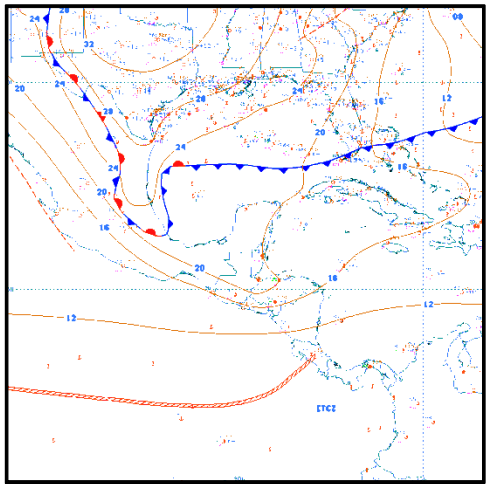
La figura 5 muestra la carta meteorológica de superficie del 7 de diciembre a las 00:00 y 12:00 UTC, respectivamente. En estas se observa la zona de baja presión sobre Panamá y el cambio del frente estacionario sobre el Caribe, a un frente frío nuevamente. La figura 6 muestra la carta meteorológica de superficie del 8 de diciembre. Se puede observar la baja presión sobre el istmo de Panamá, la disipación del frente sobre el mar Caribe y la presencia de una vaguada que se extiende desde la zona de baja presión hacia la isla La Española. Según se presenta en la figura 7, el centro de baja presión se debilita temporalmente antes de volver a intensificarse el 9 de diciembre y desplazarse ligeramente al noreste de Panamá. El centro de baja presión mantiene su intensidad el 10 de diciembre, según se aprecia en la figura 8, pero se ha desplazado al norte en el golfo entre Panamá y Colombia.



a) 3 diciembre 2010 a la 12:00 UTC

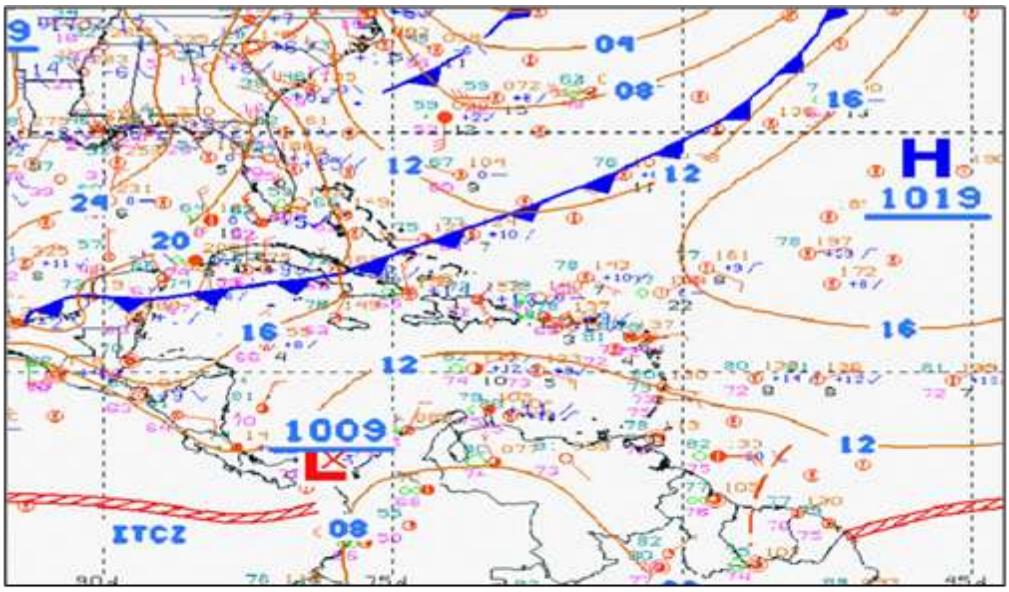


b) 5 diciembre 2010 a la 06:00 UTC

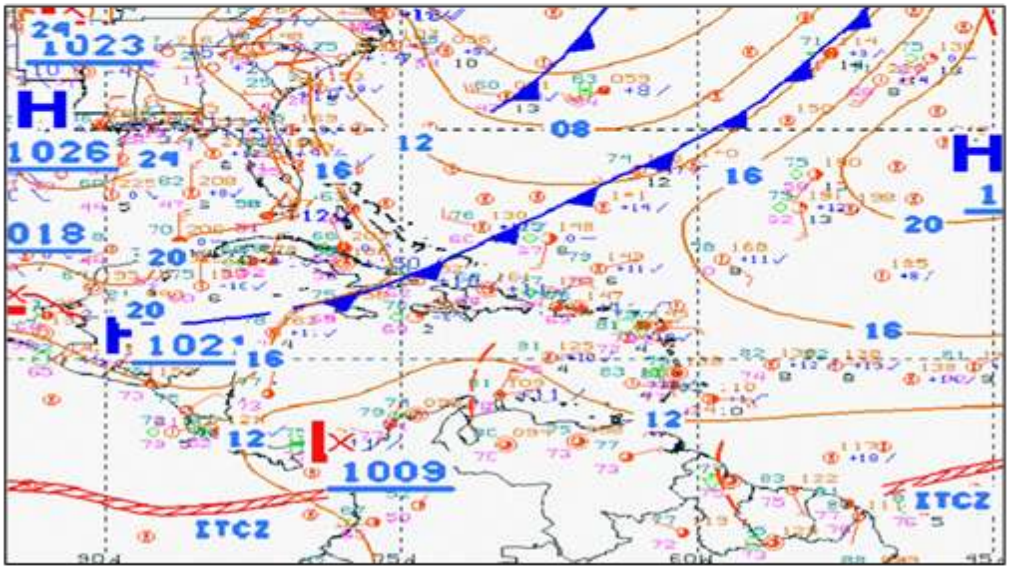


c) 6 diciembre 2010 a la 06:00 UTC

Figura 4 Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) para el 3, 5 y 6 de diciembre de 2010.

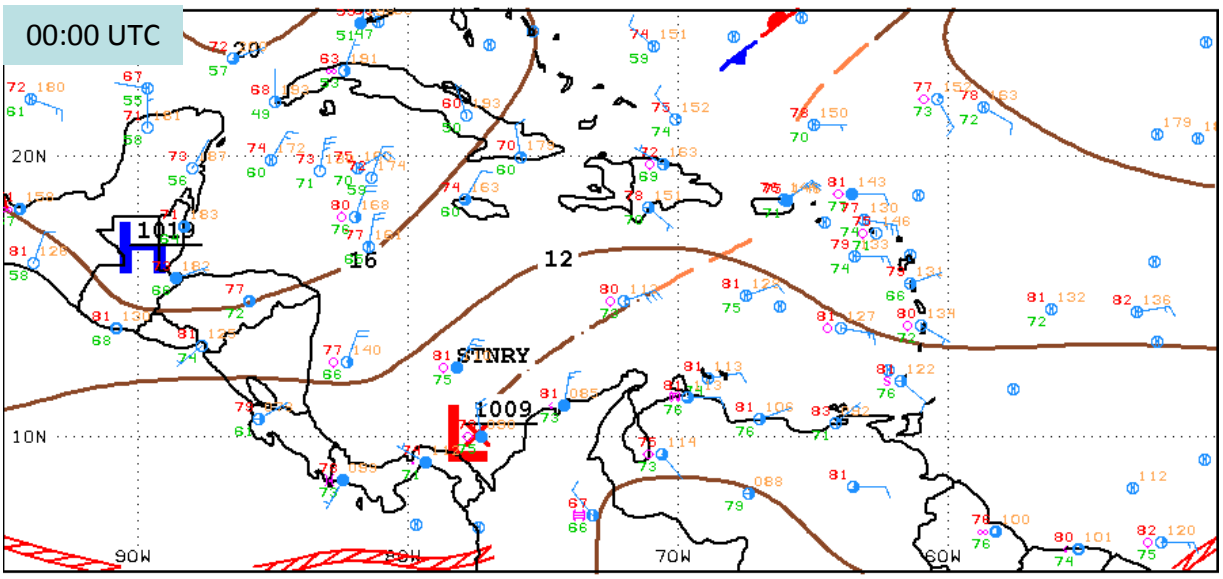


a) 7 diciembre 2010 a la 00:00 UTC

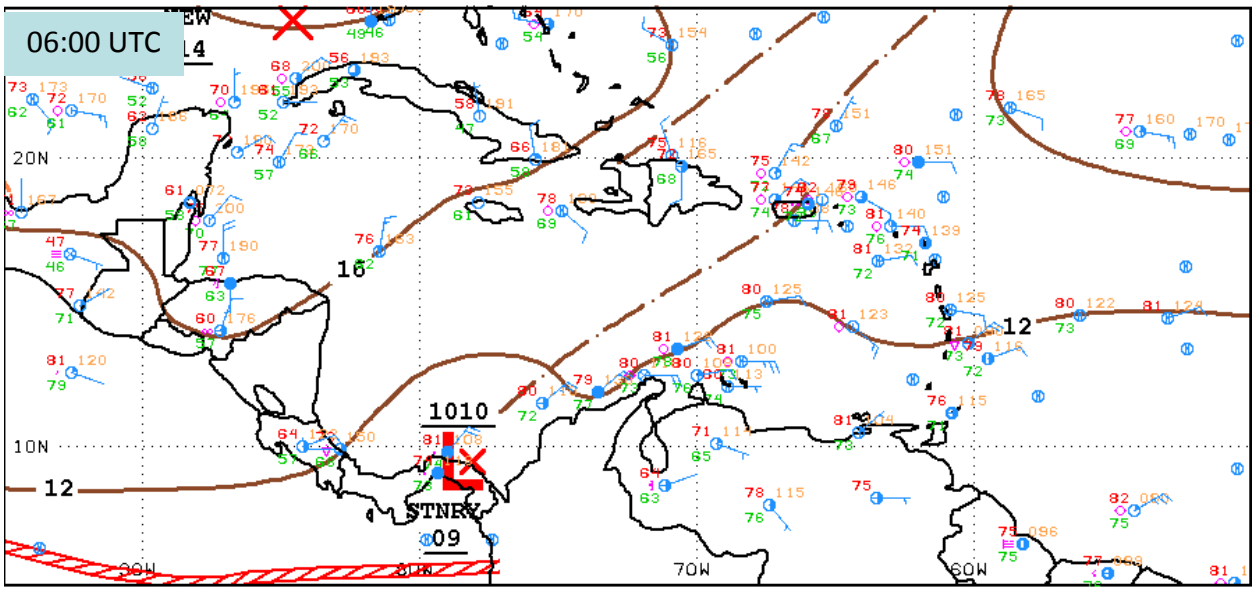


b) 7 diciembre 2010 a las 12:00 UTC

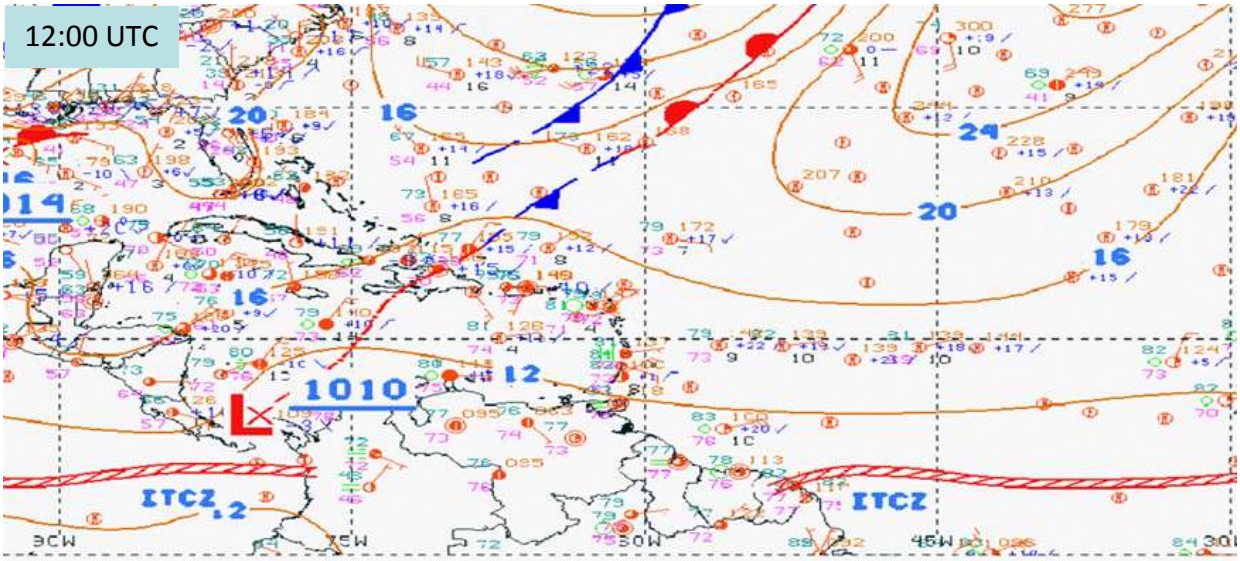
Figura 5 Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) para el 7 de diciembre de 2010.



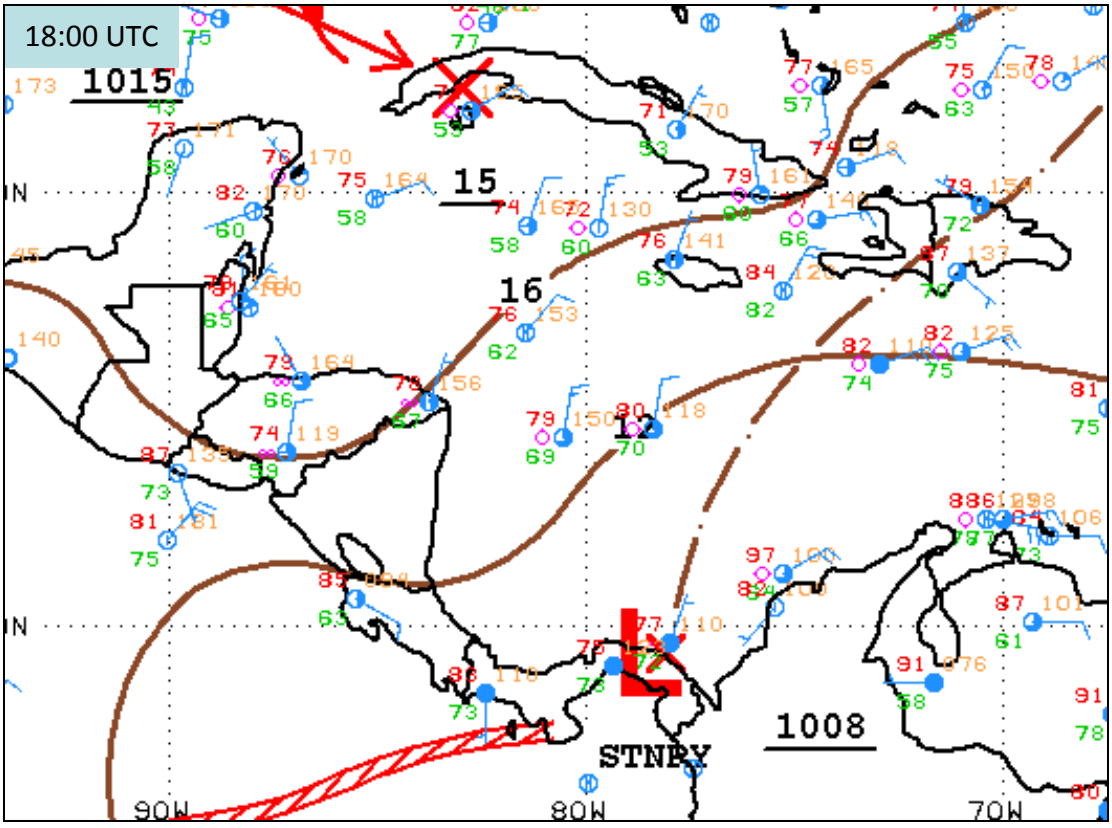
a) 8 de diciembre de 2010, 00:00 UTC.



b) 8 de diciembre de 2010, 06:00 UTC.

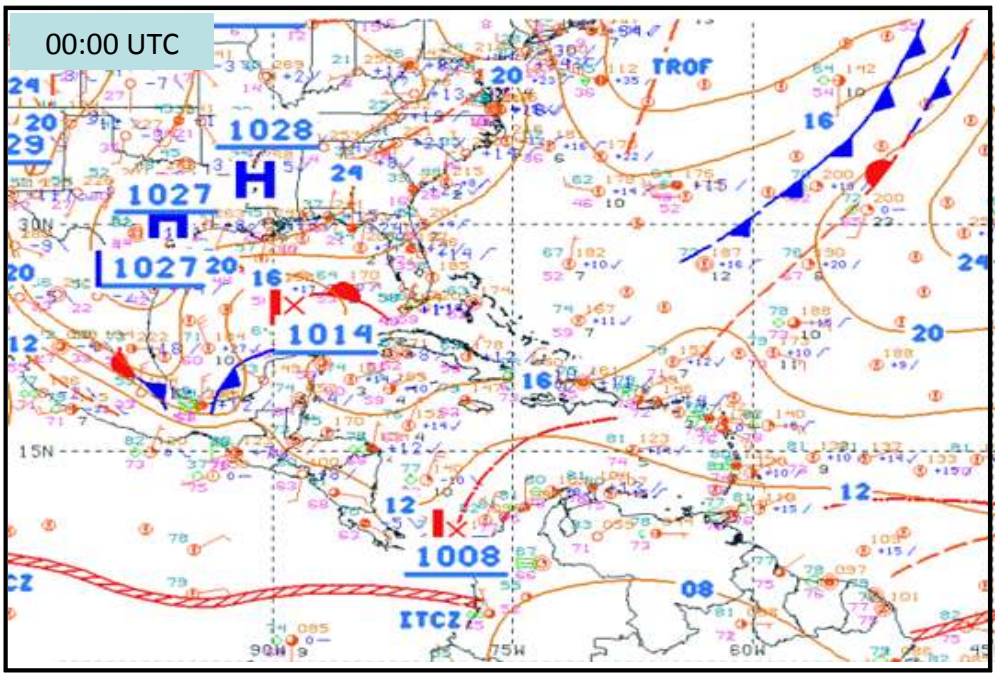


c) 8 de diciembre de 2010, 12:00 UTC.

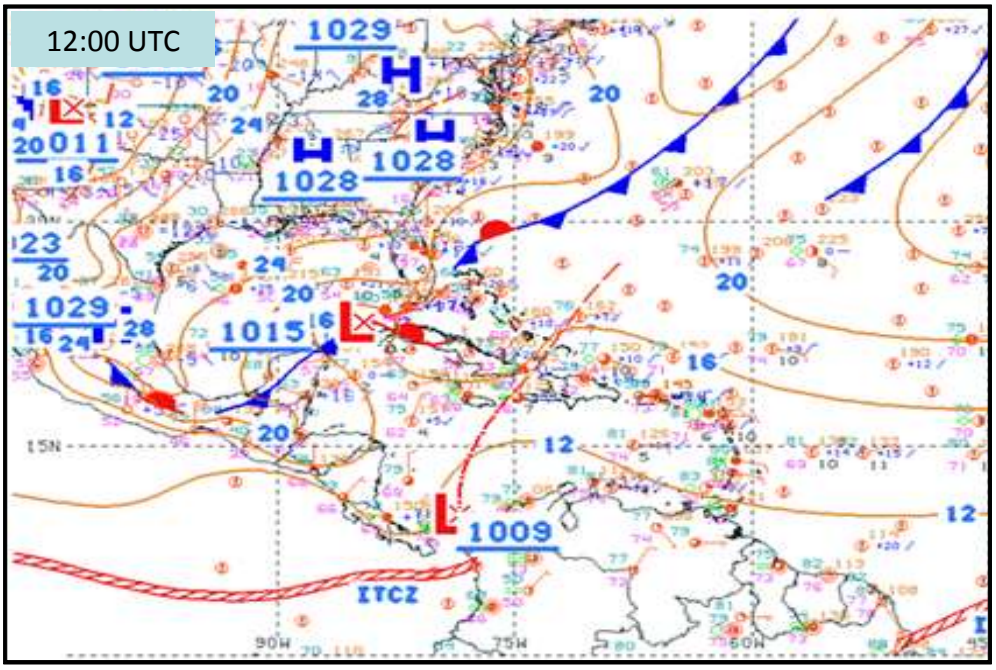


d) 8 de diciembre de 2010 18:00 UTC.

Figura 6 De las figuras a hasta d, cartas meteorológicas de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010.



a) 9 de diciembre de 2010, 00:00 UTC.



b) 9 de diciembre de 2010, 12:00 UTC

Figura 7 Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010.

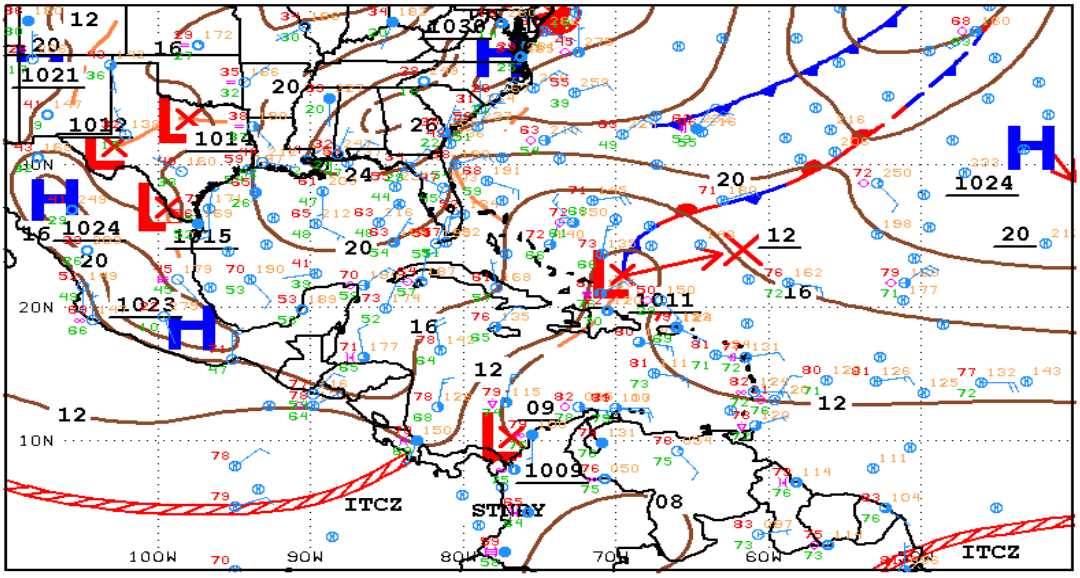


Figura 8 Carta meteorológica de superficie del Servicio Meteorología de EEUU (National Weather Service) del 10 de diciembre de 2010, 12:00 UTC.

5.3 Análisis de cartas meteorológicas en altura

Las figuras de 9 a 12 muestran los análisis de cartas en altura para los niveles de 700 y 250 mbar (U.S: Department of Commerce, 2011), para los días del 8 al 9 de diciembre de 2010. Las cartas en altura para el nivel de 700 mbar muestran que los vientos sobre Panamá son mayormente norte o noreste con magnitudes entre 10 y 20 nudos (Figuras 9-10). Las cartas en altura para el nivel de 250 mbar muestran vientos que oscilan entre 15 y 40 nudos con dirección suroeste sobre la parte occidental de Panamá para los días del 6 al 9 de diciembre de 2010 (Figuras 11-12). Este patrón se interrumpe sobre el área central de Panamá donde se observan vientos entre 10 y 20 nudos provenientes del sureste y luego del noreste los días 7 y 8 de diciembre de 2010, respectivamente.

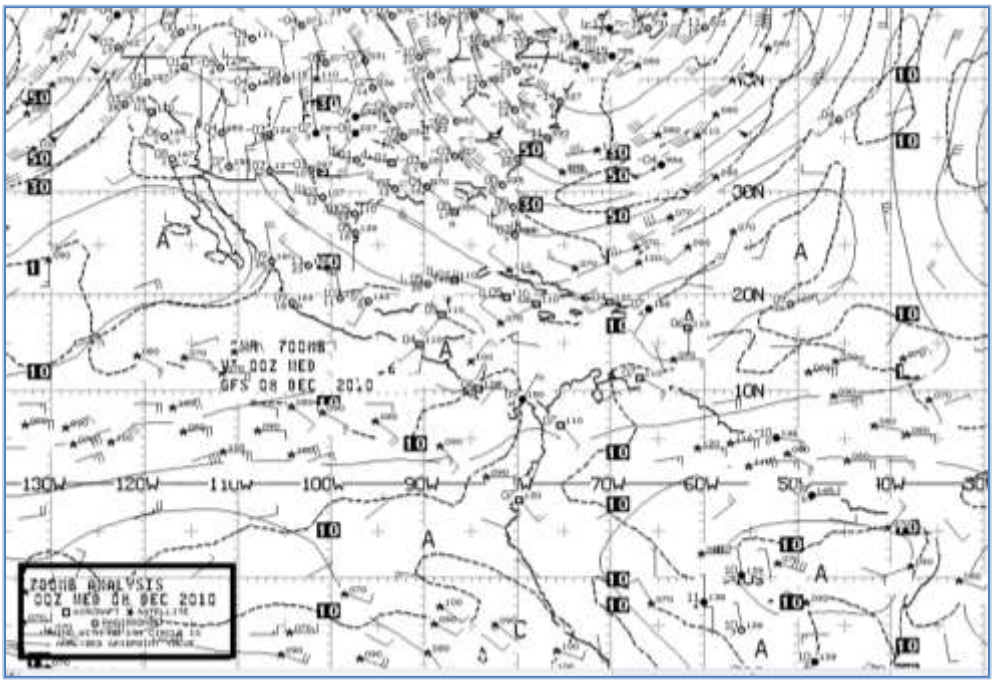


Figura 9 Carta meteorológica de altura, 700 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

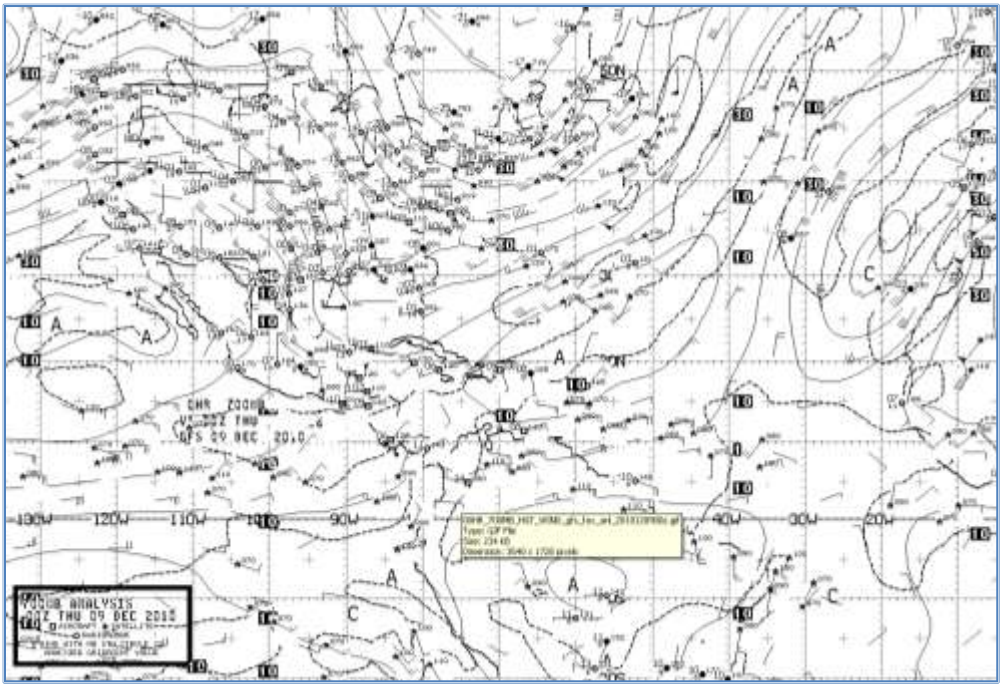


Figura 10 Carta meteorológica de altura, 700 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

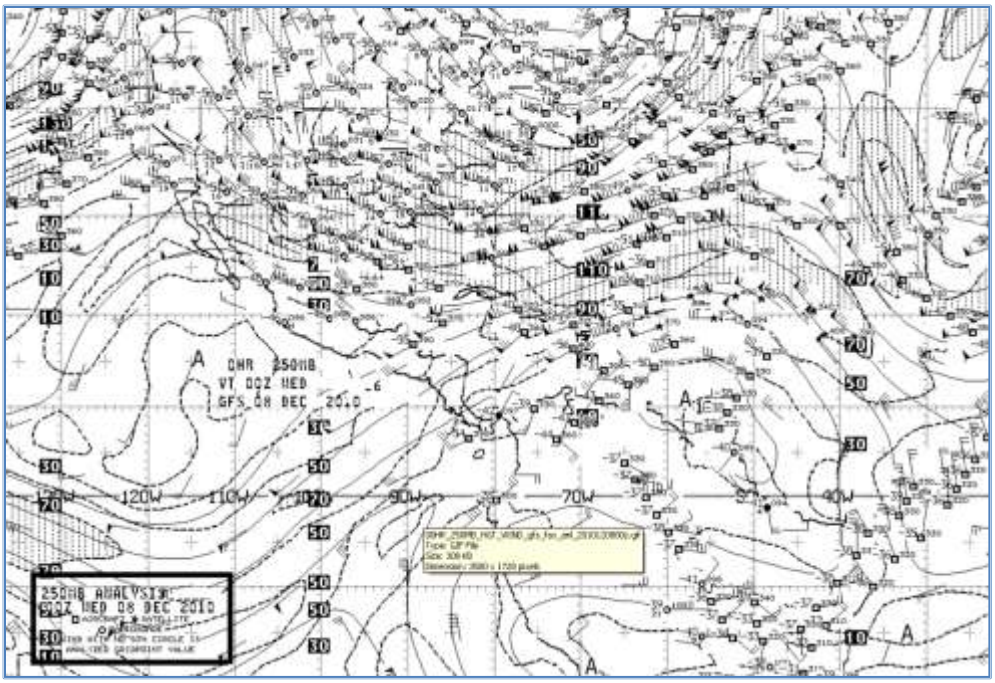


Figura 11 Carta meteorológica de altura, 250 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 8 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

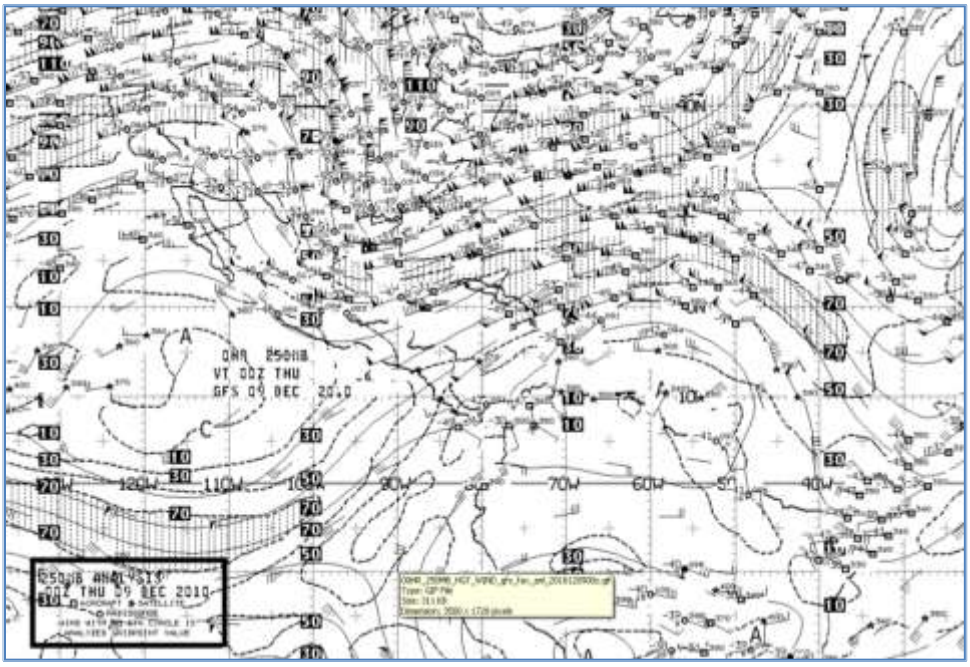


Figura 12 Mapa meteorológico de altura, 250 mbar, (Carta sinóptica) del Servicio Meteorológico de EEUU (National Weather Service) del 9 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

5.4 Análisis de imágenes satelitales

La figura 13 muestra nubosidad costa afuera de la comarca Guna Yala, en el océano Atlántico los días 5 y 6 de diciembre de 2010, previo a la formación de la zona de baja presión el día 7 de diciembre. La figura 14 muestra un sistema convectivo, indicando una zona de baja presión con nubes de desarrollo vertical, localizada sobre la costa atlántica de Panamá el día 7 de diciembre de 2010. La figura 15 muestra nubes de desarrollo vertical, asociadas a grandes cantidades de precipitación, sobre el istmo, principalmente sobre la costa caribeña de Panamá, durante el día 8 de diciembre.

El 8 de diciembre también se puede observar un área de actividad convectiva extendiéndose sobre el Caribe, relacionada a la línea de la vaguada que aparece en el análisis de superficie ese día. Para el 9 de diciembre (Figura 16), el sistema continúa siendo fuerte, pero se desplaza fuera del territorio nacional, lo cual coincide con la disminución en el promedio de la precipitación sobre la CHCP según el análisis de isoyetas. Las figuras 17 a la 24 muestran con mayor detalle el desplazamiento de la tormenta sobre Panamá, del 7 al 9 de diciembre de 2010; se observa que la parte alta de la cuenca del río Chagres fue la mayor afectada por la tormenta “La Purísima 2010”.

La figura 25 muestra imágenes satelitales de vapor de agua y el análisis de divergencia a 200 mbar. Los valores de divergencia fueron positivos y se mantuvieron por encima de 5 $x10^{-5}$/s durante todo el período de la tormenta sobre gran parte del istmo panameño. También se observa una tropósfera media y alta húmeda.

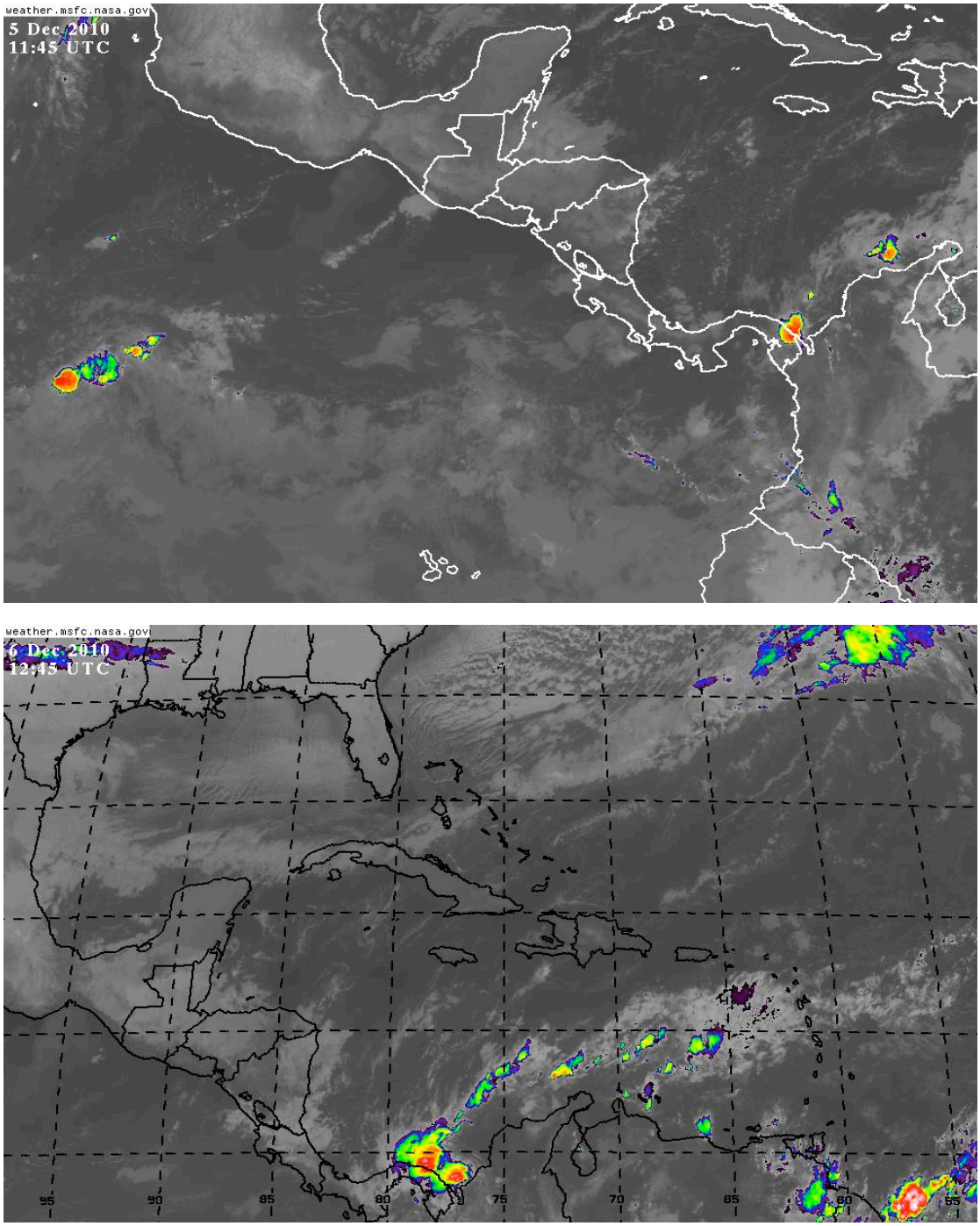


Figura 13. Imágenes satelitales infrarrojas del 5 al 6 de diciembre, mostrando la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

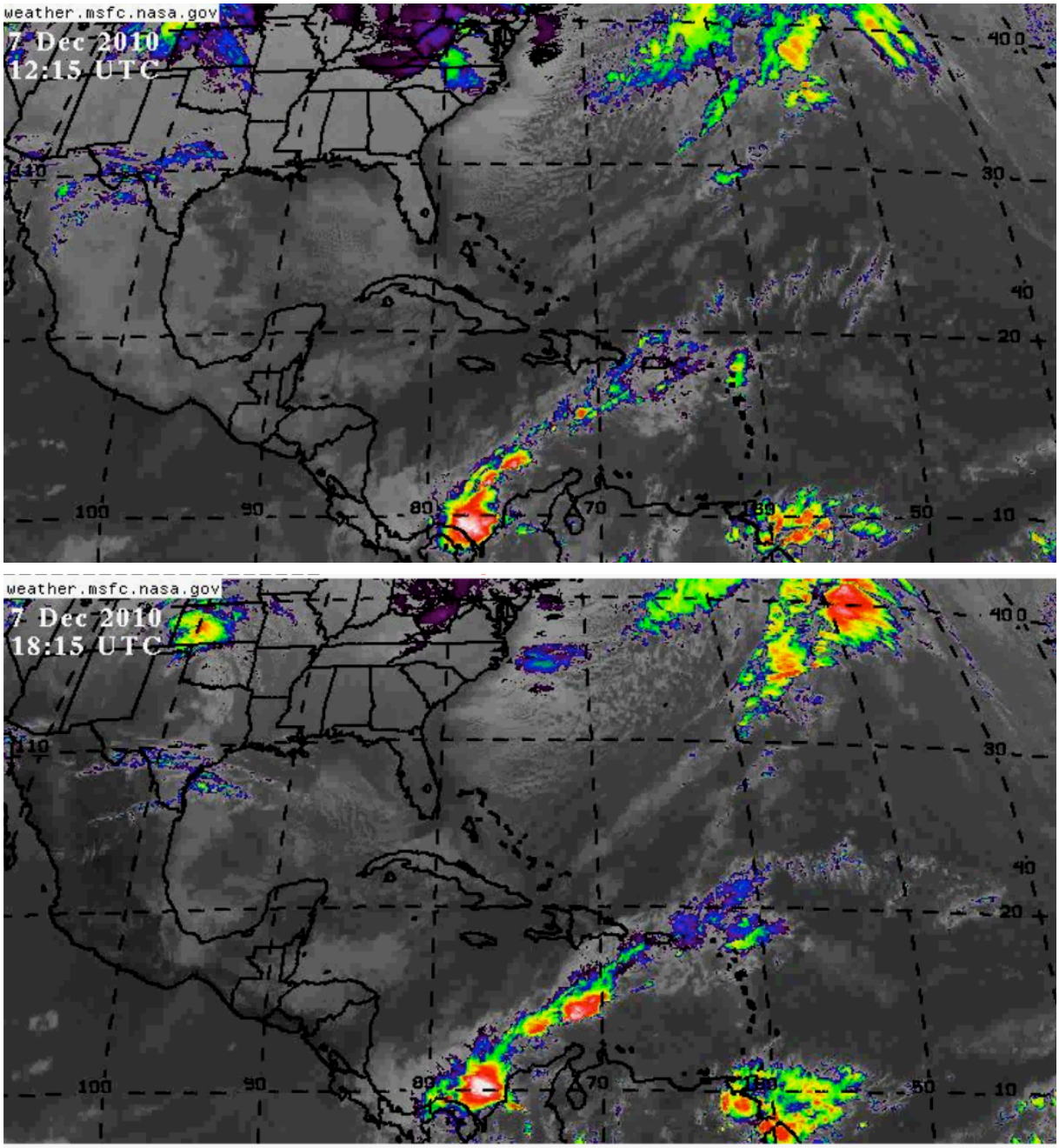
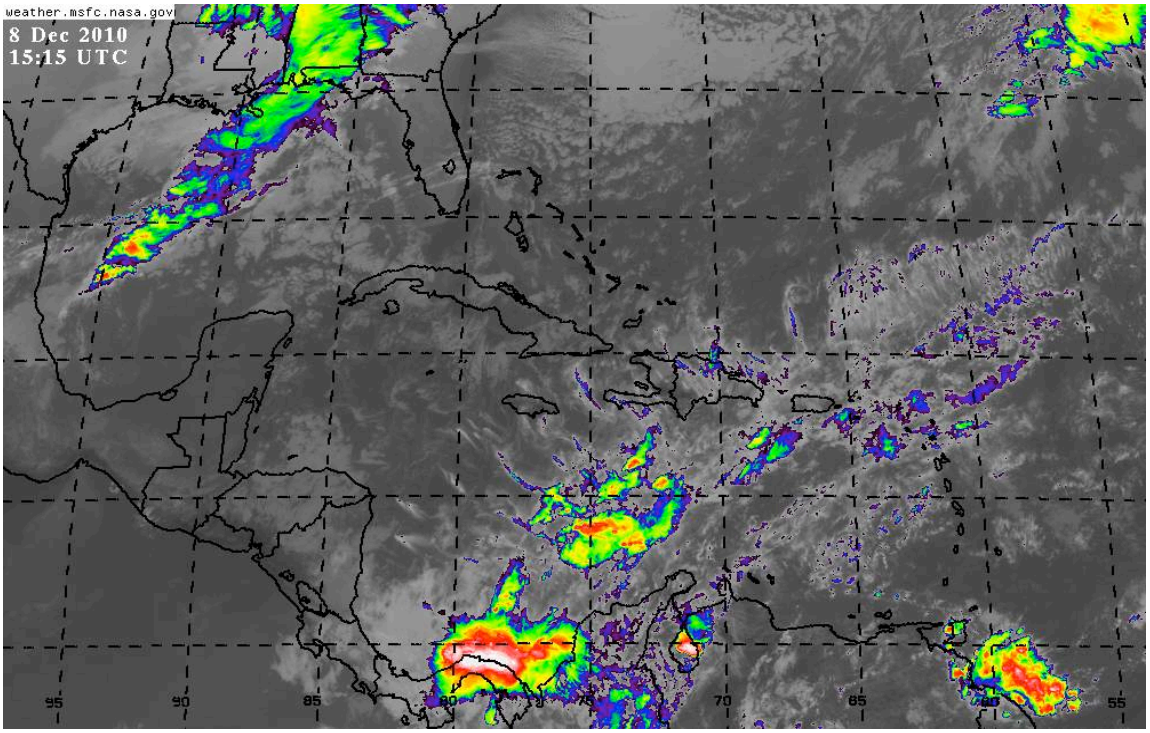


Figura 14. Imágenes satelitales infrarrojas del 7 de diciembre, mostrando la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.



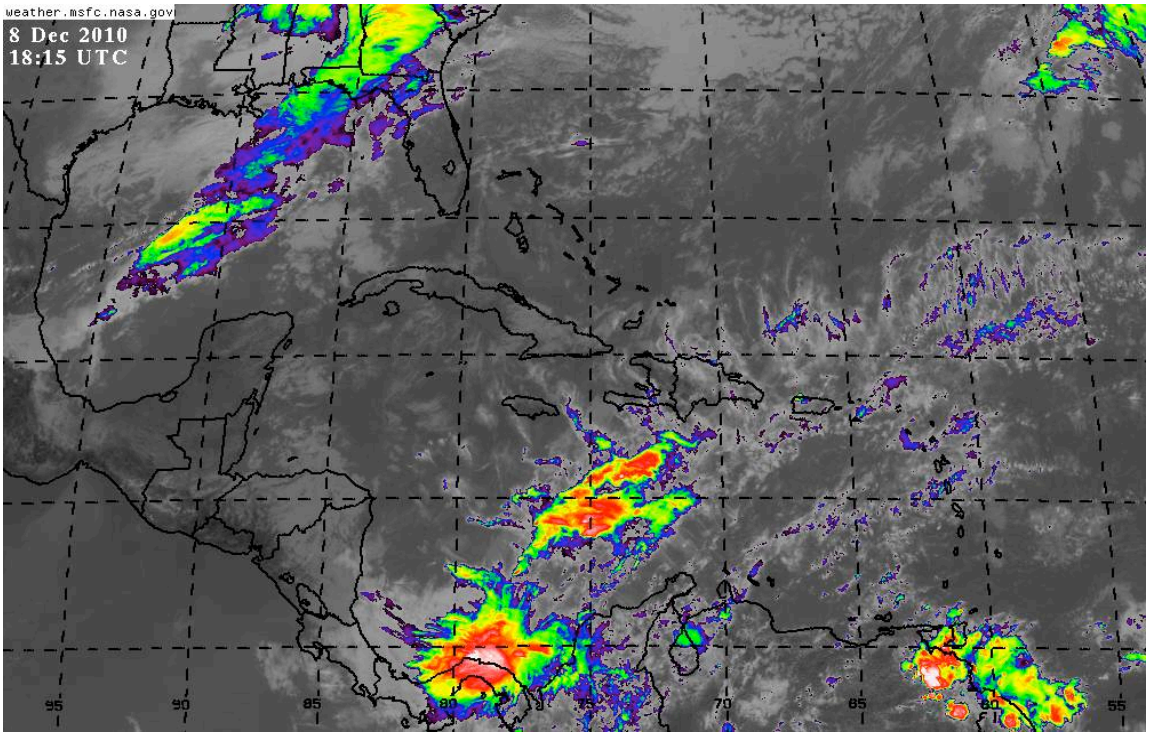


Figura 15. Imágenes satelitales infrarrojas del 8 de diciembre, mostrando la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

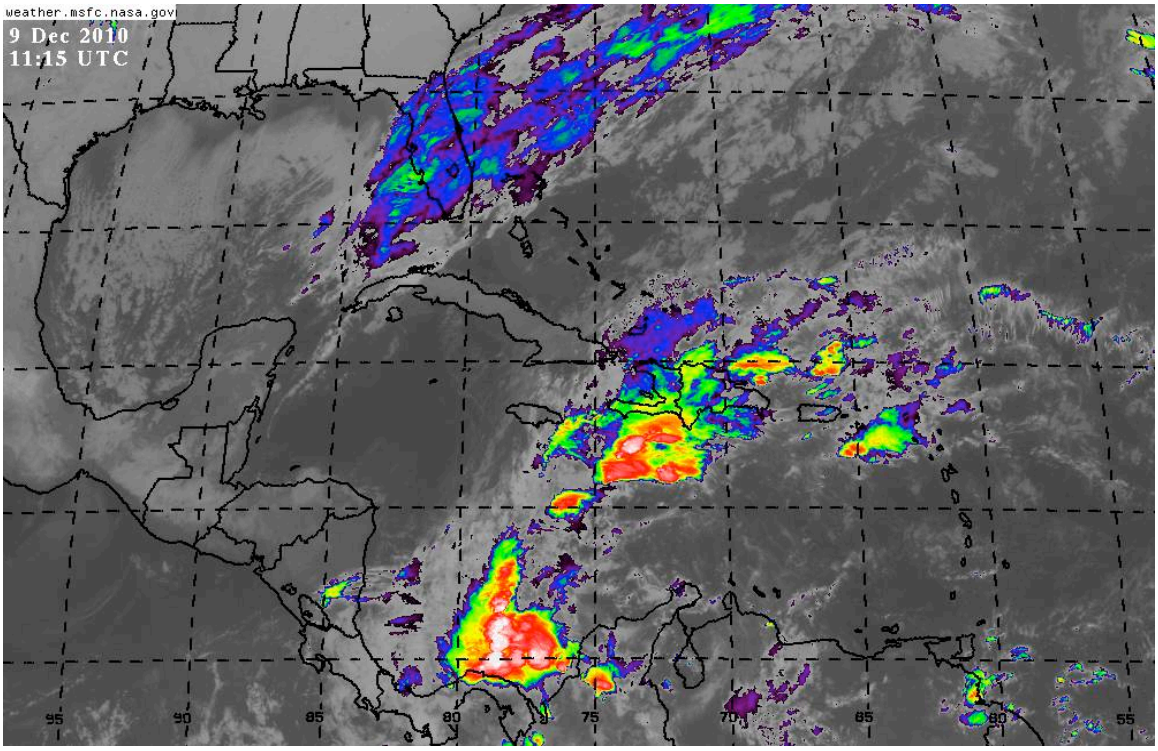


Figura 16. Imagen satelital infrarroja del 9 de diciembre, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

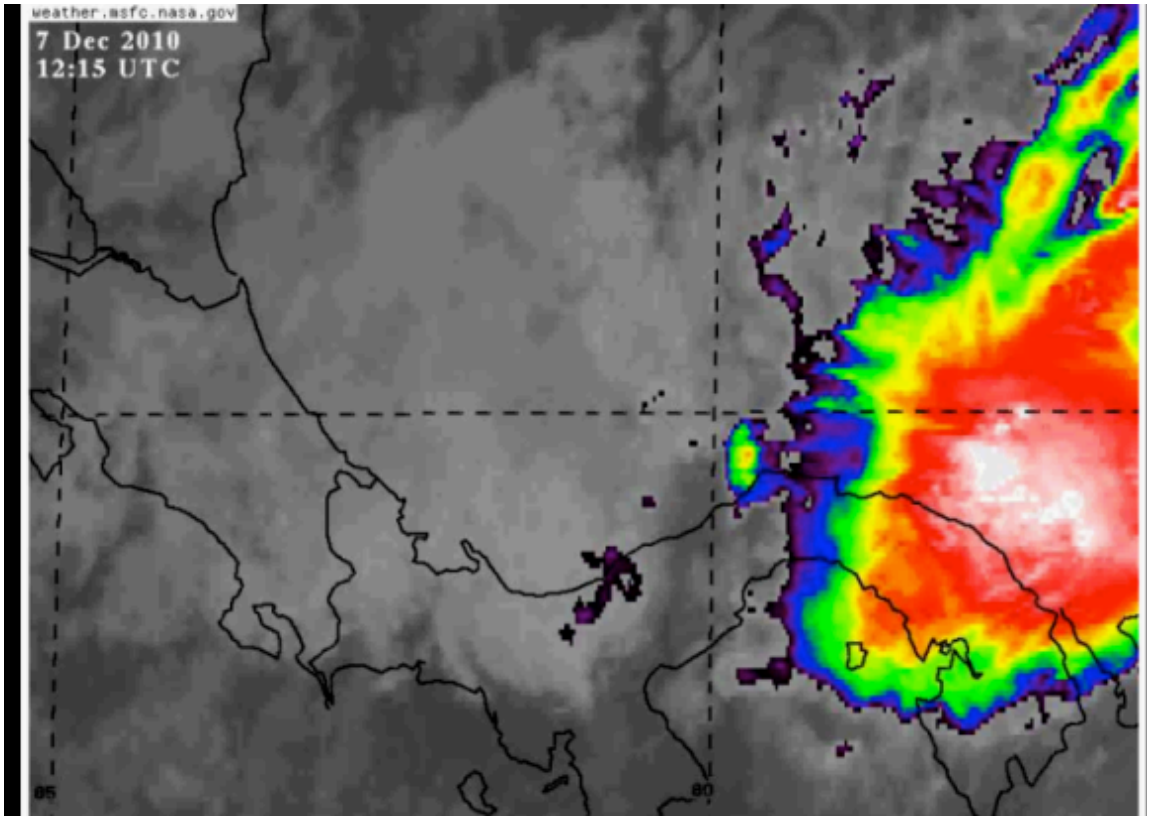


Figura 17. Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 12:15 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

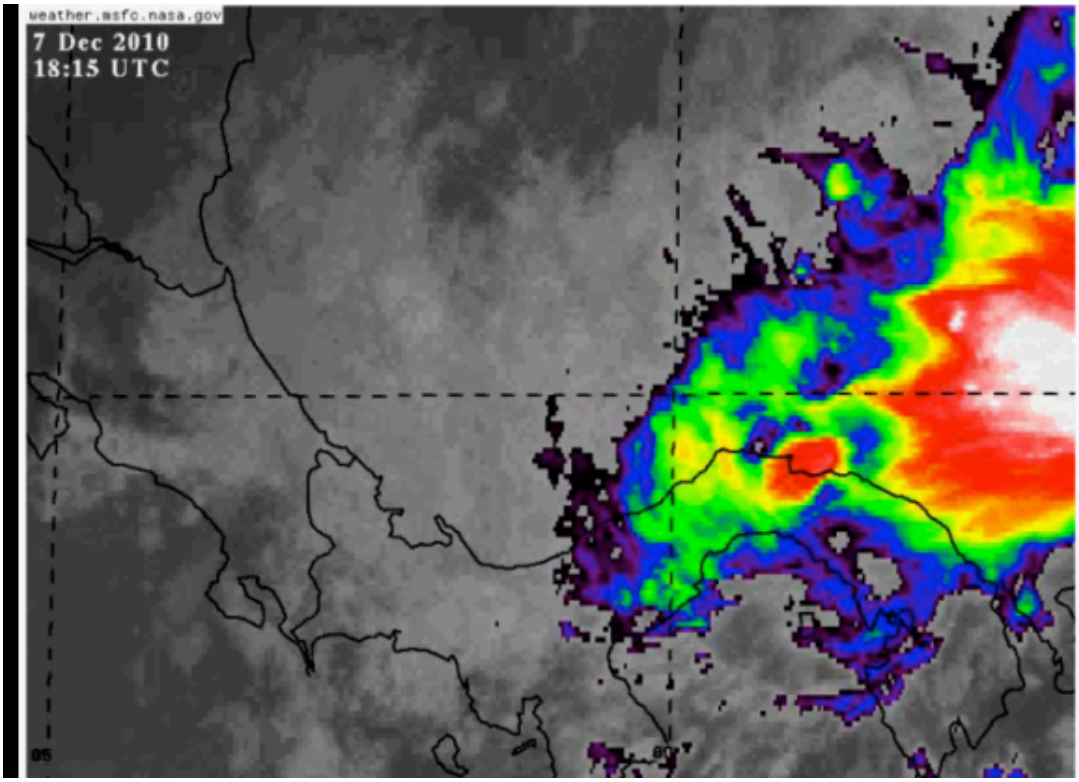


Figura 18. Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 1815 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

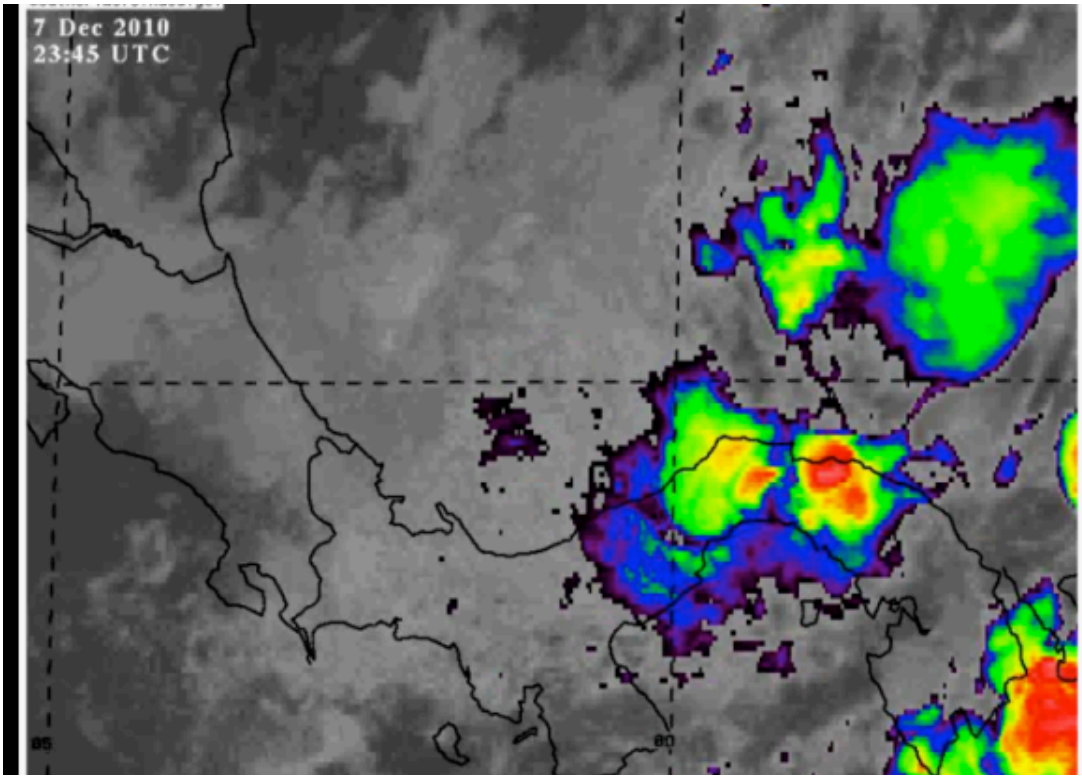


Figura 19. Imagen satelital infrarroja del 7 de diciembre a las 23:45 UTC, que muestra la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

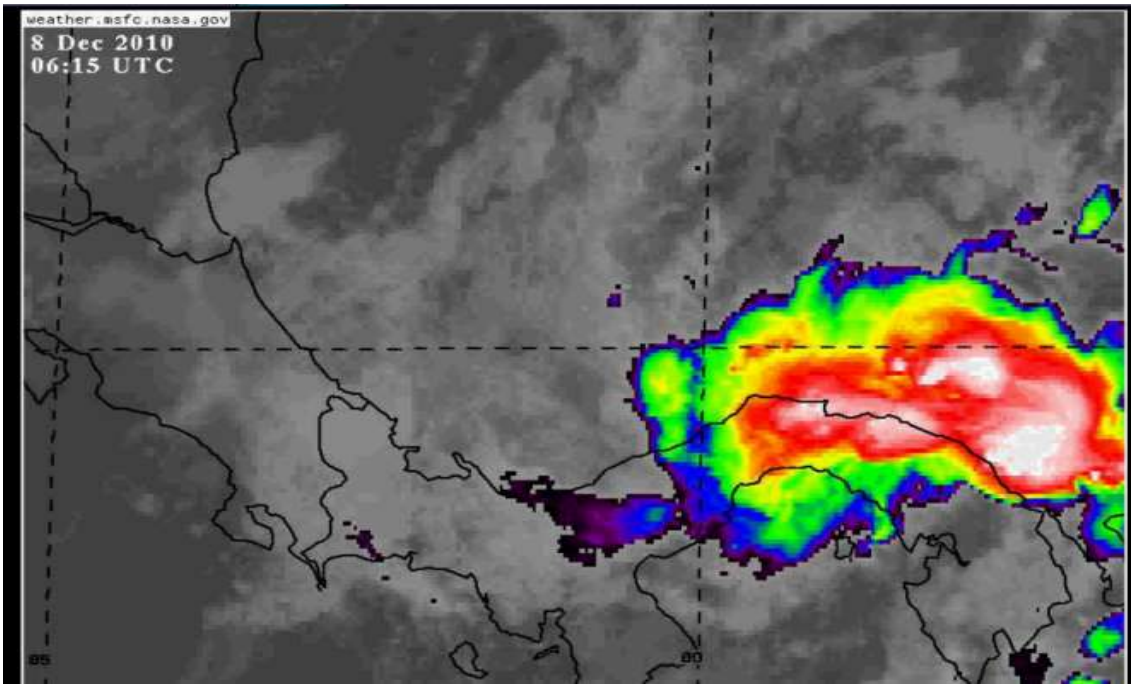


Figura 20 Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.

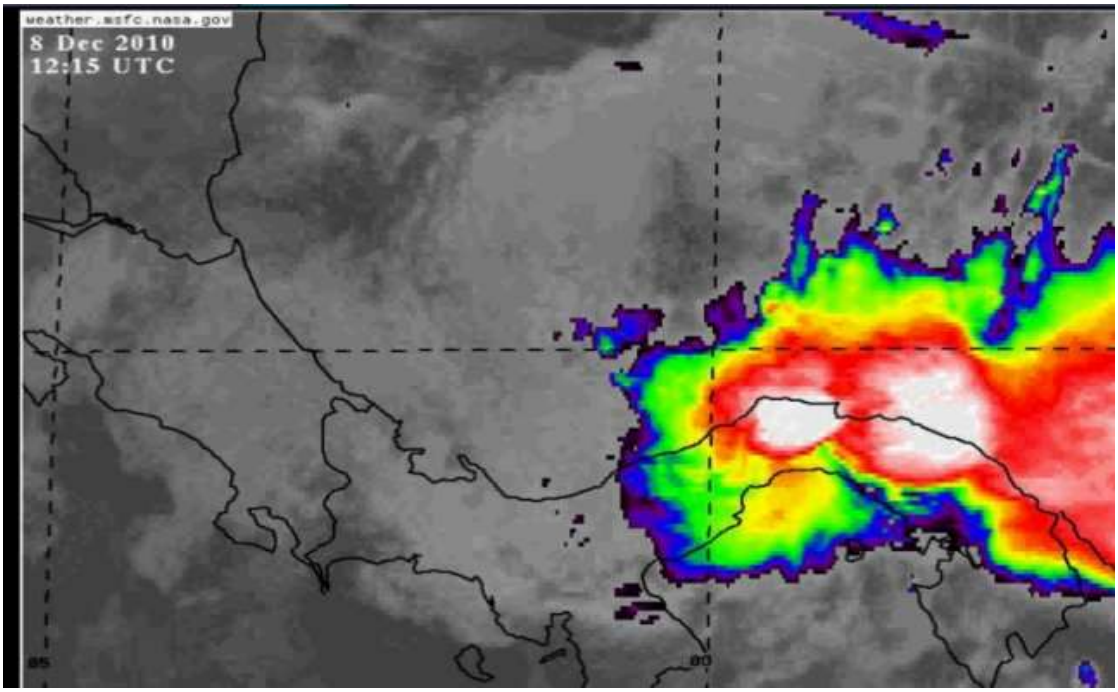


Figura 21 Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.

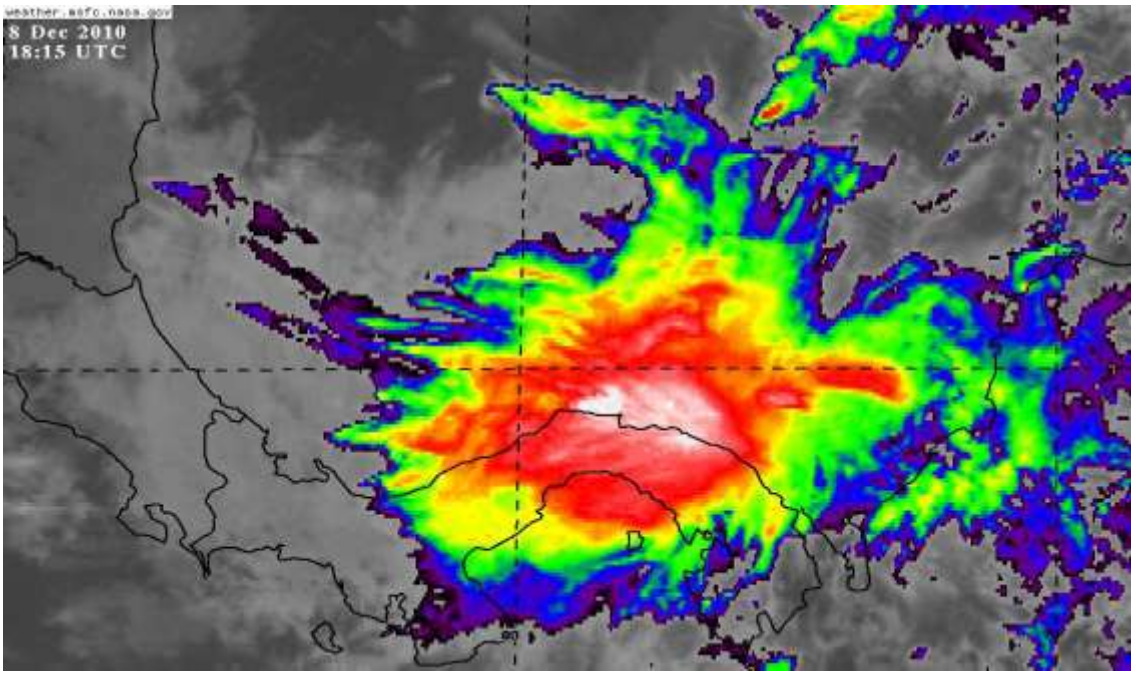


Figura 22 Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.

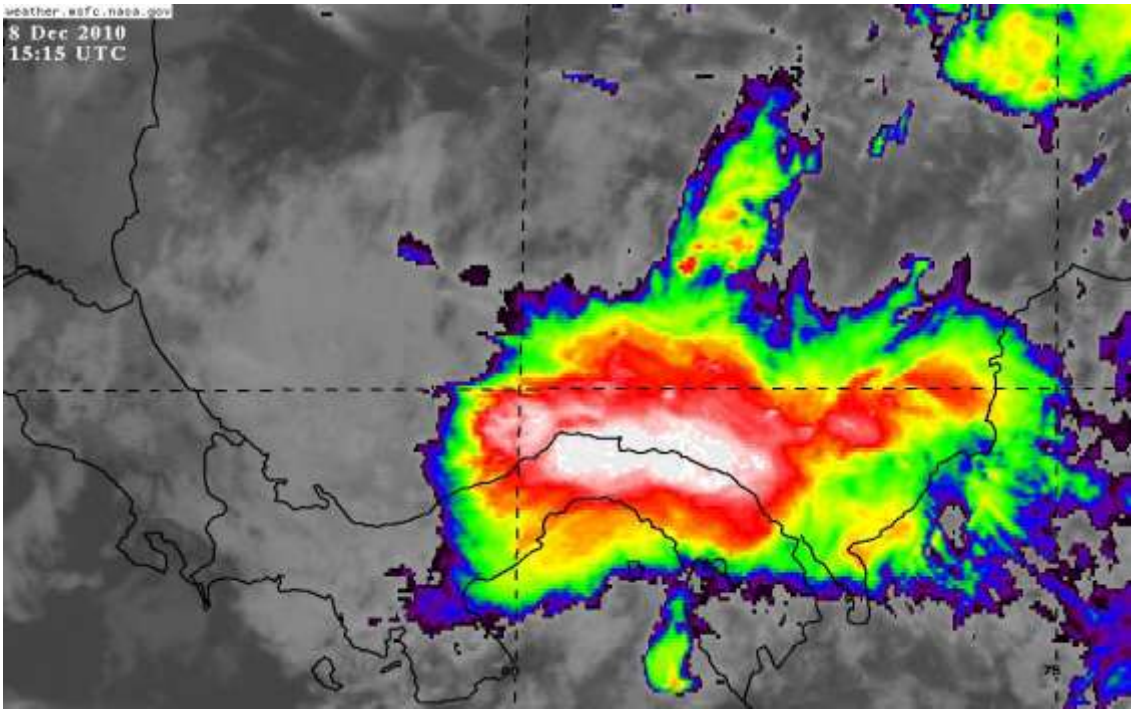


Figura 23 Imagen satelital infrarroja del 8 de diciembre que muestra el desarrollo de la tormenta sobre Panamá.

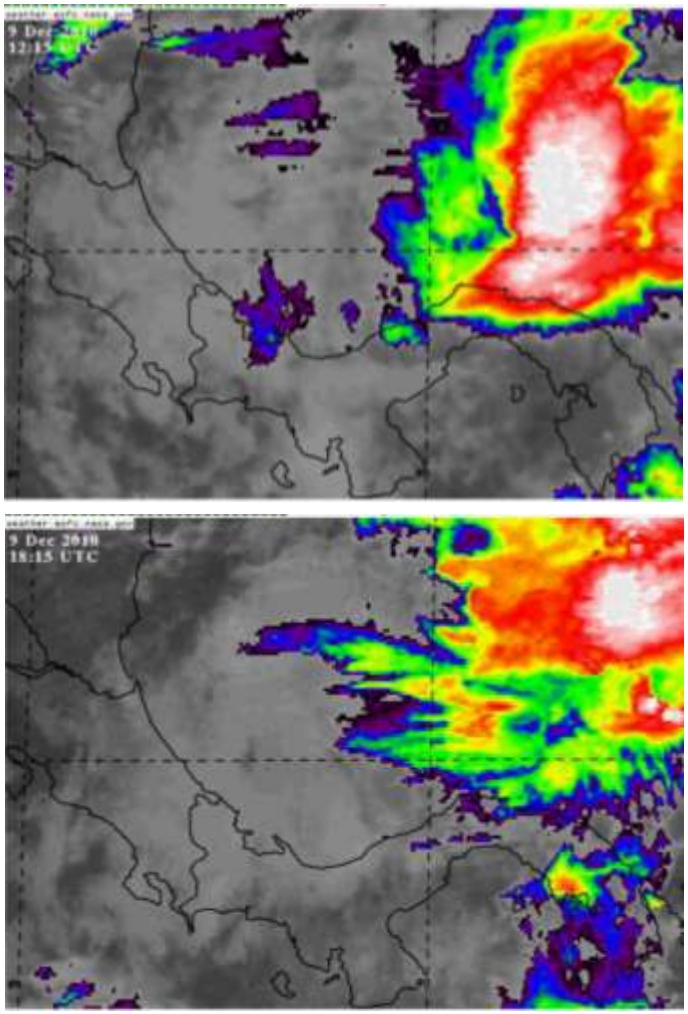


Figura 24 Imágenes satelitales infrarrojas del 9 de diciembre que muestran la ubicación de una zona de baja presión sobre Panamá.

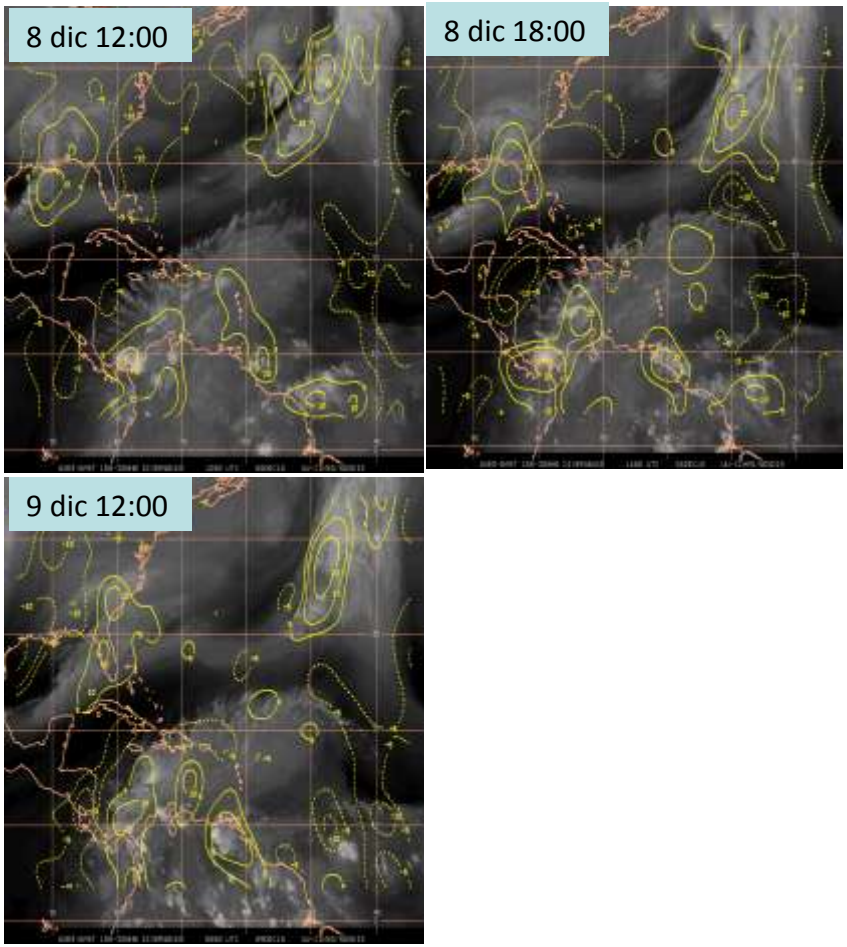


Figura 25 Imágenes satelitales de vapor de agua y análisis de divergencia en altura (200 mbar) del 8 de diciembre de 2010. (NOAA).

5.5 Análisis de los datos de humedad relativa y viento de superficie

La ACP opera 11 estaciones meteorológicas tipo A ubicadas en la CHCP y áreas operativas. La figura 26 muestra la distribución de las 6 estaciones meteorológicas que, durante la tormenta "La Purísima 2010", estaban funcionando.

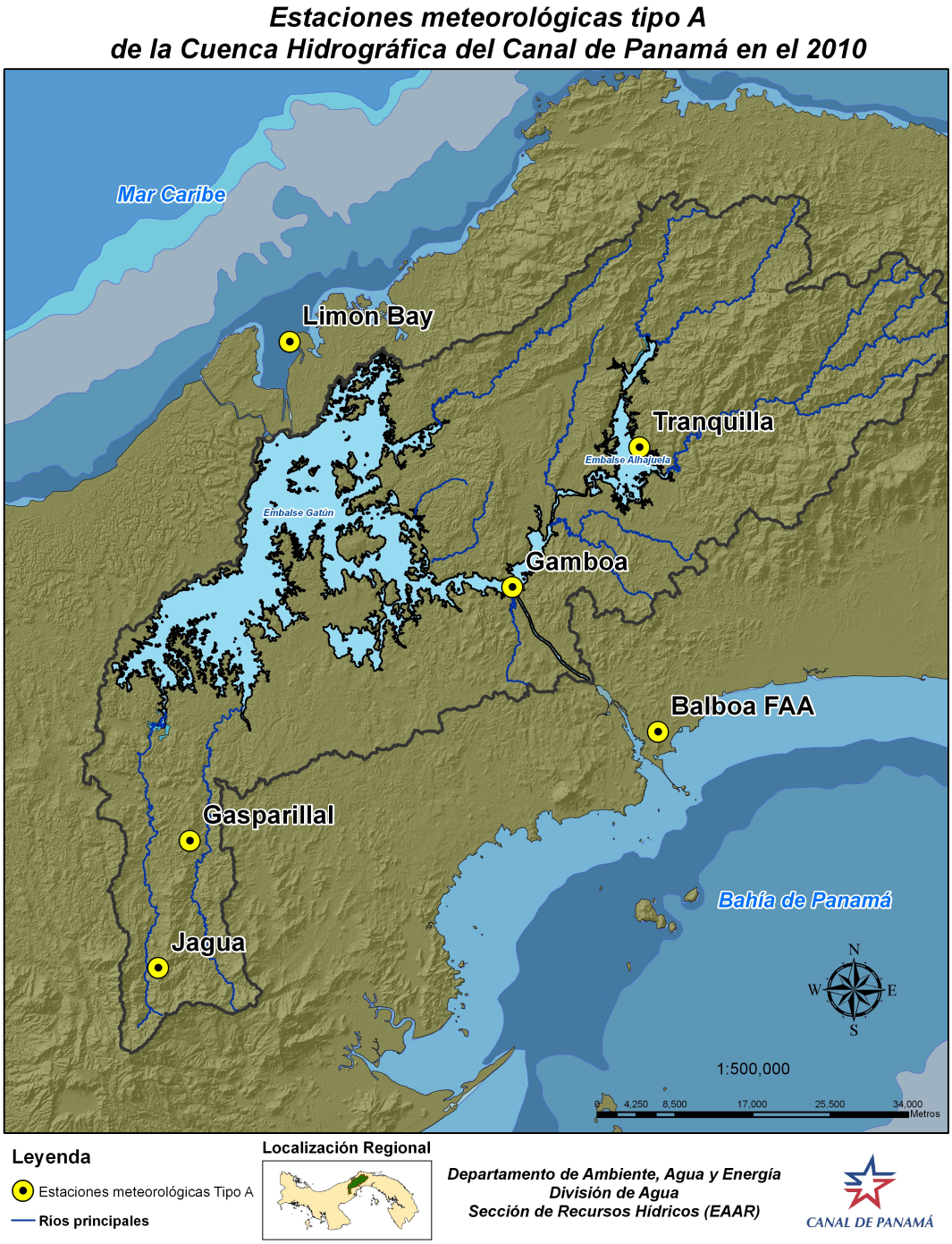


Figura 26 Estaciones meteorológicas tipo A ubicadas en la CHCP y áreas operativas del Canal de Panamá.

5.5.1 Humedad relativa

El cuadro 3 muestra el promedio diario de la humedad relativa de cada estación durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010, y el promedio mensual histórico durante el mes de diciembre. Las estaciones de Gamboa, Gasparillal, Jagua y Tranquilla muestran promedios diarios de humedad relativa entre 94% y 100% durante los días 7 y 8 de diciembre de 2010, y las estaciones de Limón Bay y Balboa FAA muestran promedios diarios de humedad relativa entre 88% y 97% durante el mismo período. Todos los valores de humedad relativa registrados en las estaciones meteorológicas operadas por la ACP entre el 7 y 9 de diciembre de 2010 son superiores a los respectivos promedios mensuales históricos de cada estación.

Cuadro 3 Promedio diario de humedad relativa de 6 estaciones meteorológicas operadas por la ACP entre el 7 y 9 de diciembre de 2010.

Estaciones	Periodo de registro	Humedad Relativa (%)			
		07-Dic	08-Dic	09-Dic	Promedio Mensual Diciembre *
Limón Bay (LMB)	2001-2009	88	93	s.d.	87.4
Gamboa (GAM)	2000-2009	~ 100	~ 100	s.d.	87.7
Gasparillal (GAD)	2003-2009	99	~ 100	s.d.	94.8
Jagua (JAG)	2007-2009	98	98	s.d.	94.1
Balboa FAA (FAA)	2000-2009	92	94	92	84
Tranquilla (TRA)	2007-2009	94	97	94	87.7

*Promedio de diciembre del periodo de registro

5.5.2 Viento de superficie

En el cuadro 4 se aprecia que la dirección de viento predominante en las estaciones meteorológicas operadas por la ACP durante los días 7 y 8 fue del noroeste, seguido de la componente norte noroeste (NNO) y oeste noroeste (ONO). Las figuras 27, 28, 29 y 30 muestran la rosa de los vientos y el viento resultante (línea roja) para las estaciones en Jagua, Limón Bay, Balboa FAA y Gamboa entre el 6 y 9 de diciembre de 2010.

Cuadro 4 Dirección del viento predominante y promedio de la magnitud del viento de 6 estaciones meteorológicas operadas por la ACP del 7 al 9 de diciembre de 2010.

Estaciones	Dirección del viento			Viento promedio de los tres días (m/s)
	07-Dic	08-Dic	09-Dic	
Limón Bay (LMB)	NNO	O	s.d.	6.47
Gamboa (GAM)	NO	ONO	s.d.	1.98
Gasparillal (GAD)	NNO	ONO	s.d.	5.24
Jagua (JAG)	NO	NO	s.d.	4.1
Balboa FAA (FAA)	NO	NO	NO	2.75
Tranquilla (TRA)	NNO	NO	NO	1.32

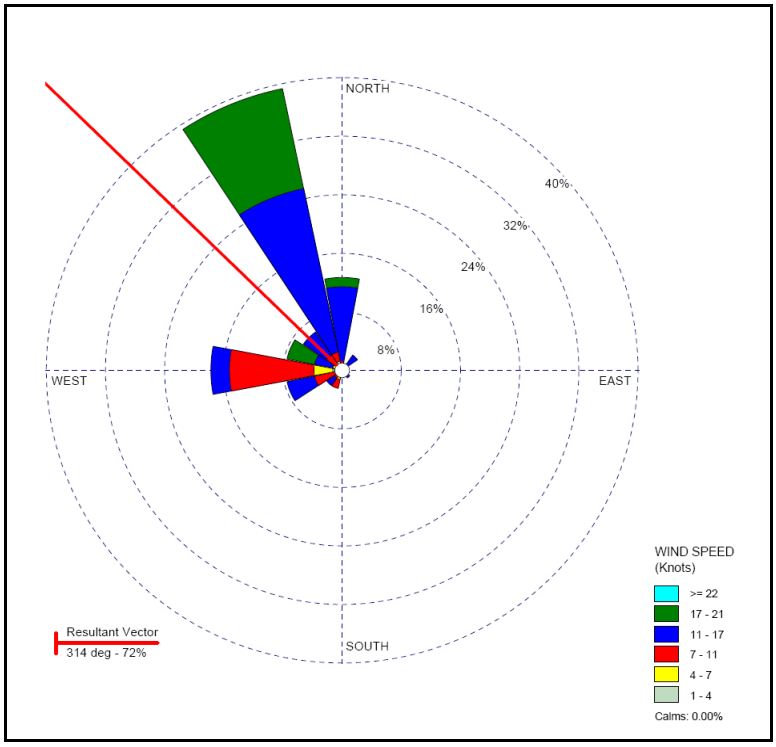


Figura 27. Rosa de los vientos de la estación meteorológica Limón Bay durante los días 6, 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

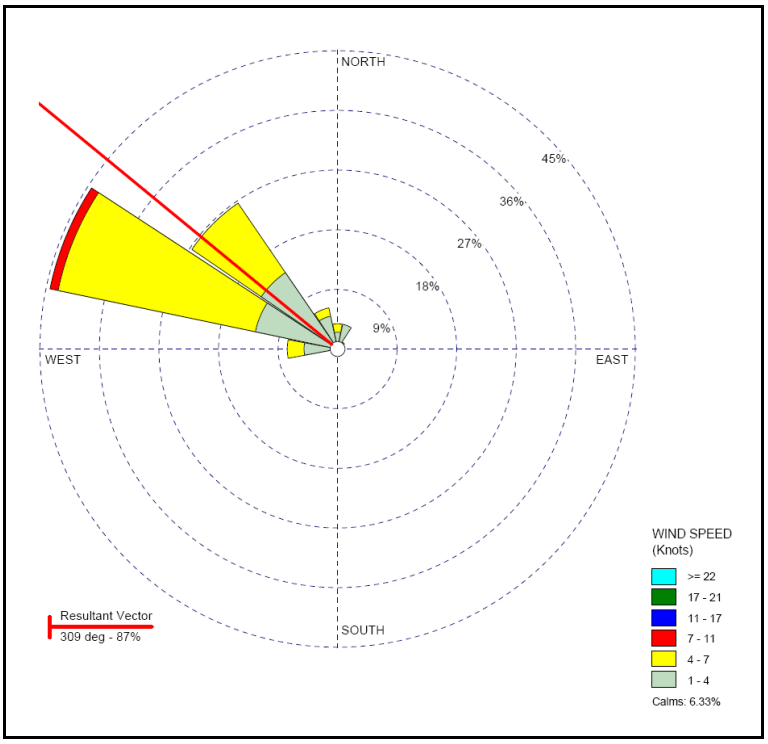


Figura 28. Rosa de los vientos de la estación meteorológica Gamboa durante los días 6, 7, 8 y 9 de diciembre de 2010**.**

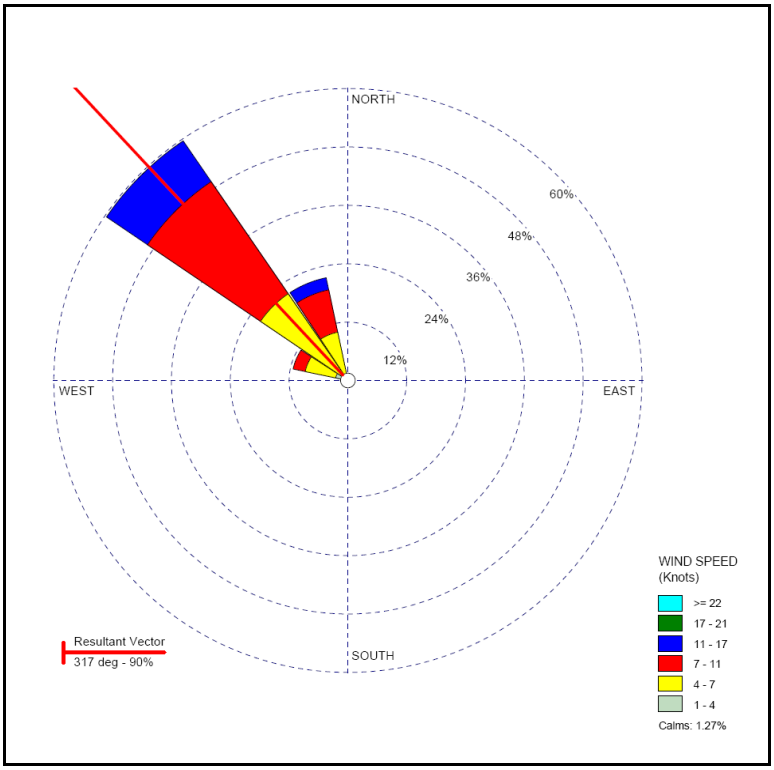


Figura 29. Rosa de los vientos de la estación meteorológica Jagua durante los días 6, 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

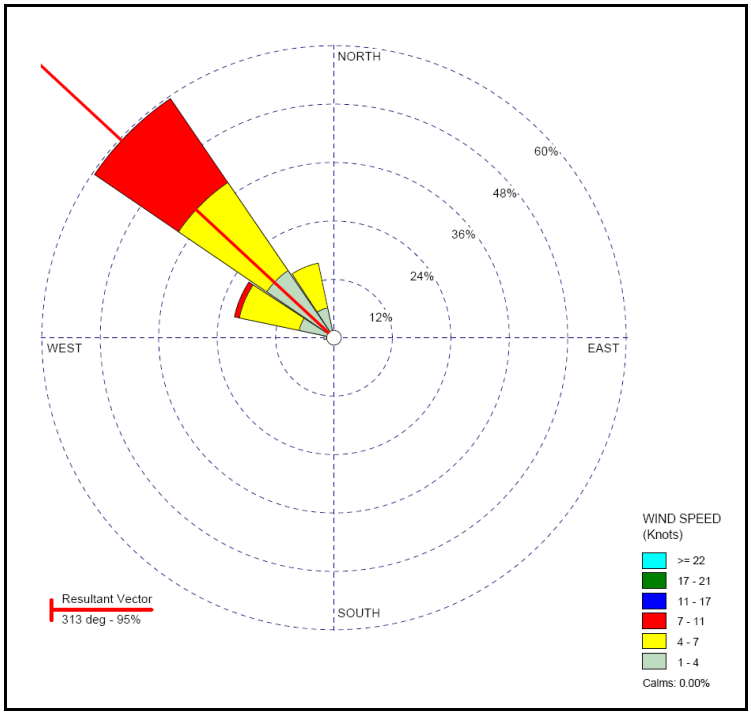


Figura 30. Rosa de los vientos de la estación meteorológica Balboa FAA durante los días 6, 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

5.6 Análisis del perfil atmosférico (radiosondeo)

Las radiosondas son cajas livianas y pequeñas desechables equipadas con sensores que registran distintos parámetros meteorológicos de la atmósfera. Todos los días desde la Estación de Radiosonda de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), a un globo con helio se le adapta un radiosonda que luego se eleva hasta unos 25 kilómetros de altura y durante su ascenso transmite los datos a una estación en tierra ubicada en el sector de Corozal oeste, que recibe y procesa la información. Los sensores de la radiosonda calculan la velocidad de los vientos a diferentes alturas en base al desplazamiento del globo, al igual que los cambios de la temperatura y humedad. La presión atmosférica también es medida a varios niveles mientras el globo asciende a través de la atmósfera. Esta información sirve para determinar varias condiciones meteorológicas, entre ellas la estabilidad atmosférica, información que es utilizada para el pronóstico de precipitación en la CHCP.

La observación de la atmósfera mediante radiosonda fue llevada a cabo por la Fuerza Aérea de Estados Unidos desde principios de los años cincuenta hasta 1999. Previendo la finalización de las operaciones del sondeo por el cierre de las bases militares estadounidenses en Panamá, las autoridades de la antigua Comisión del Canal de Panamá (PCC), en conjunto con la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA) y la entonces Dirección de Aeronáutica Civil (DAC), acordaron continuar las observaciones en altura. Estas instituciones estaban interesadas en continuar con las observaciones debido a la importancia para el pronóstico local del tiempo, el tránsito de los buques, la navegación aérea y el suministro de agua potable. En el año 2003 la ACP tomó la responsabilidad exclusiva de la operación de la estación de radiosonda, ubicándola en Corozal oeste.

Las figuras 31 a la 35 muestran los datos obtenidos por los radiosondeos realizados en Corozal oeste, estación MPCZ, a las 00:00 UTC y 12:00 UTC entre el 6 y el 10 de diciembre. Se puede observar que los vientos son mayormente norte en la parte baja de la atmósfera, con una ligera rotación contraria al sentido del reloj, lo cual es característico de la presencia de un centro de baja presión. Los vientos medios tienen un componente del este en los niveles medios, entre 700 y 300 mbar, particularmente el día 8 de diciembre a las 12:00 UTC. Los vientos arriba de 300 mbar son del oeste, con velocidades de hasta 55 nudos en ciertos niveles.

Se observa que el contenido de agua precipitable en la columna atmosférica se mantiene alto, arriba de dos pulgadas, durante todos los días de la tormenta, indicando gran cantidad de humedad en la atmósfera. Las pequeñas diferencias entre la temperatura del aire y punto de rocío en gran parte del perfil vertical, particularmente la parte baja y media, corrobora el alto nivel de saturación alcanzado durante los días de la tormenta.

La estabilidad atmosférica se puede estimar en base a la energía potencial convectiva disponible en la atmósfera (CAPE). Valores altos de CAPE, 1000 J/kg o más, son indicativo de tormentas severas. Se puede observar que durante el transcurso de la tormenta, los valores de CAPE no sobrepasan los 300 J/kg, lo cual dice que este indicador no fue significativo para esta tormenta.

Los niveles de condensación por ascenso, por convección y el nivel de convección libre son bajos entre el 7 diciembre a las 12:00 UTC y el 9 de diciembre a las 12:00 UTC, indicativo de que la atmósfera no requería de mecanismos intensos de convección por calentamiento o convergencia del viento, para seguir produciendo lluvia. Una vez alcanzados estos niveles críticos, estimados con los datos del radiosondeo, el proceso de condensación proveería la energía necesaria para seguir alimentando la tormenta.

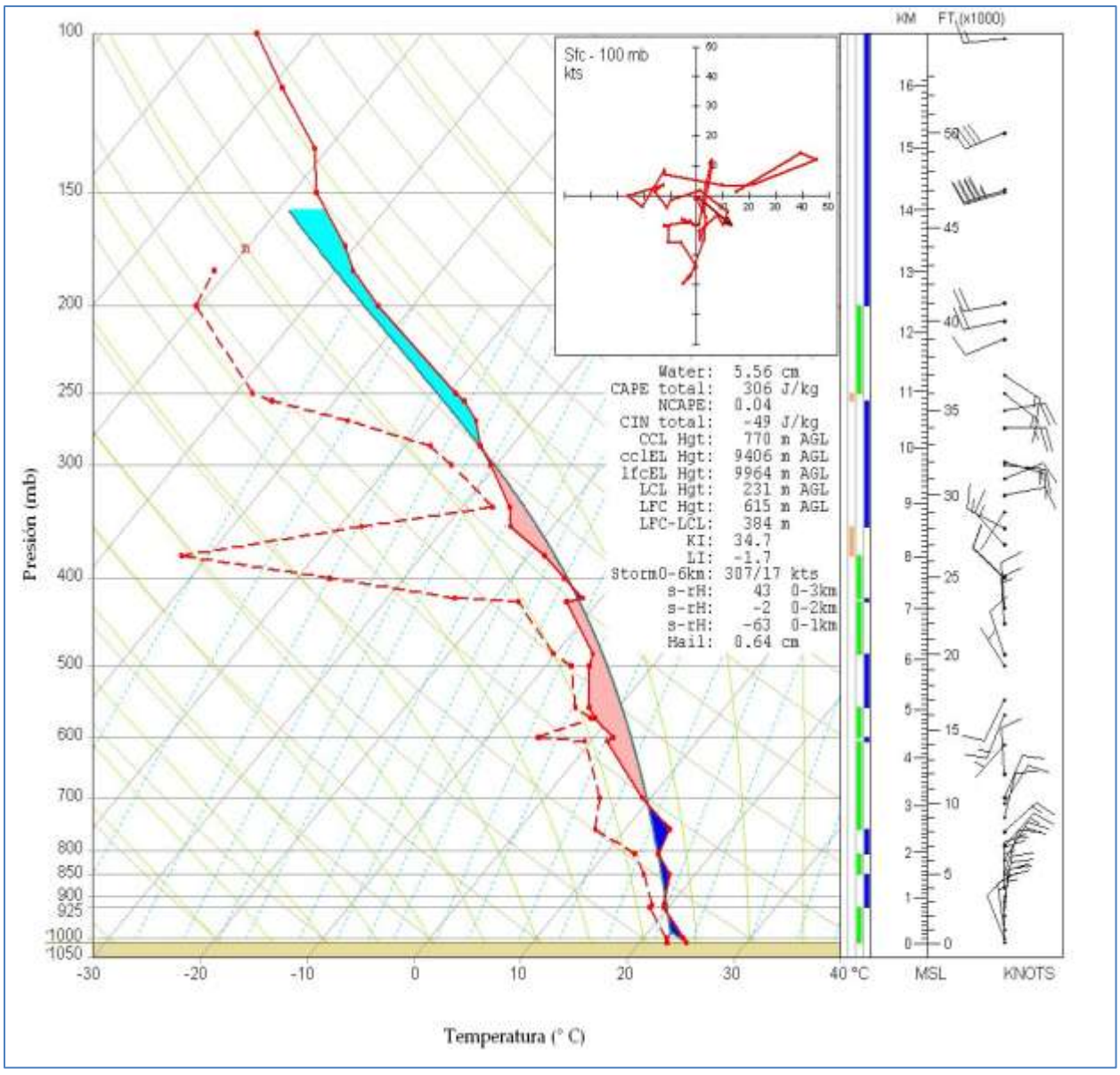


Figura 31 Radiosondeo de Corozal oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 7 de diciembre de 2010 a las 12:00 UTC.

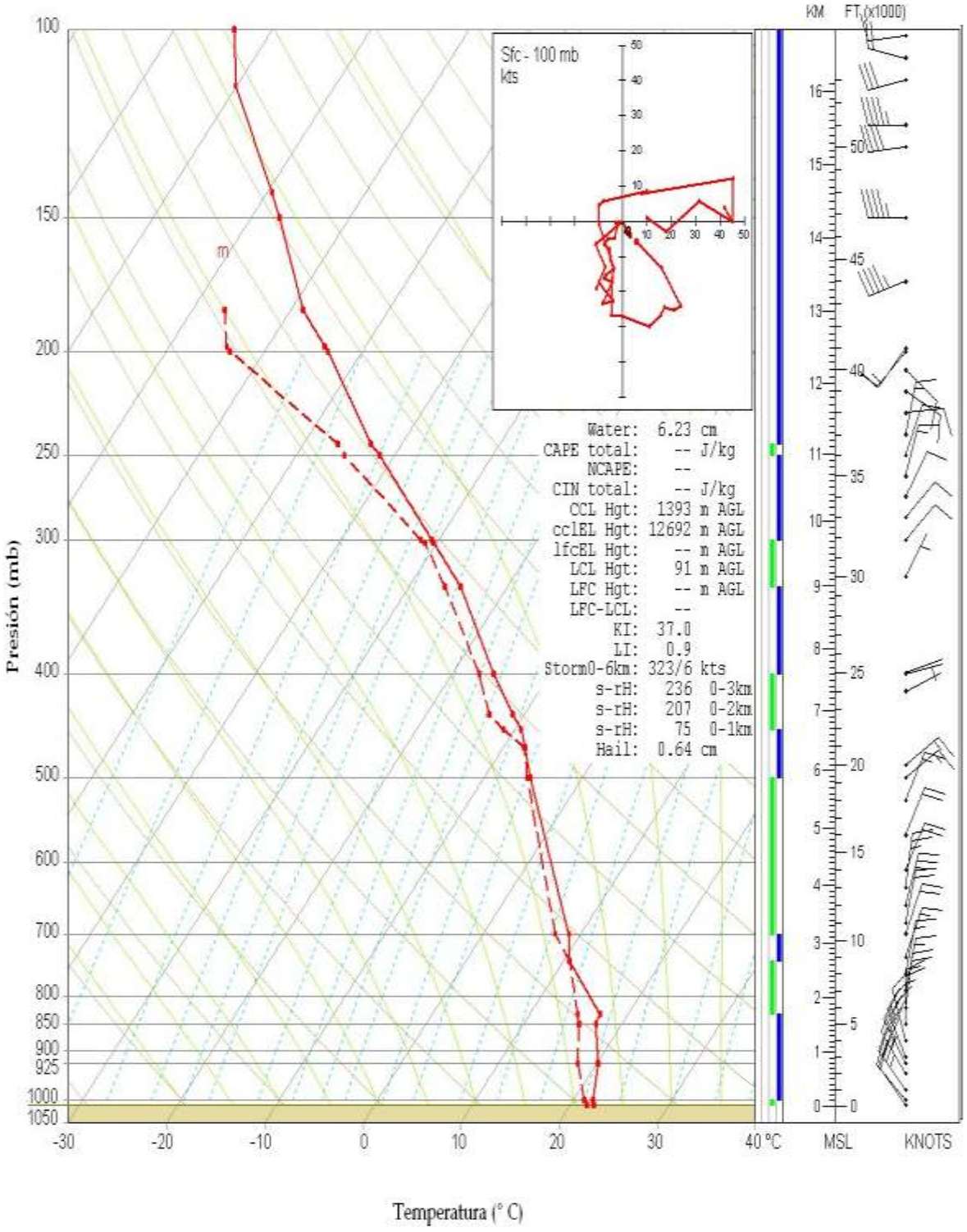


Figura 32 Radiosondeo de Corozal oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 8 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

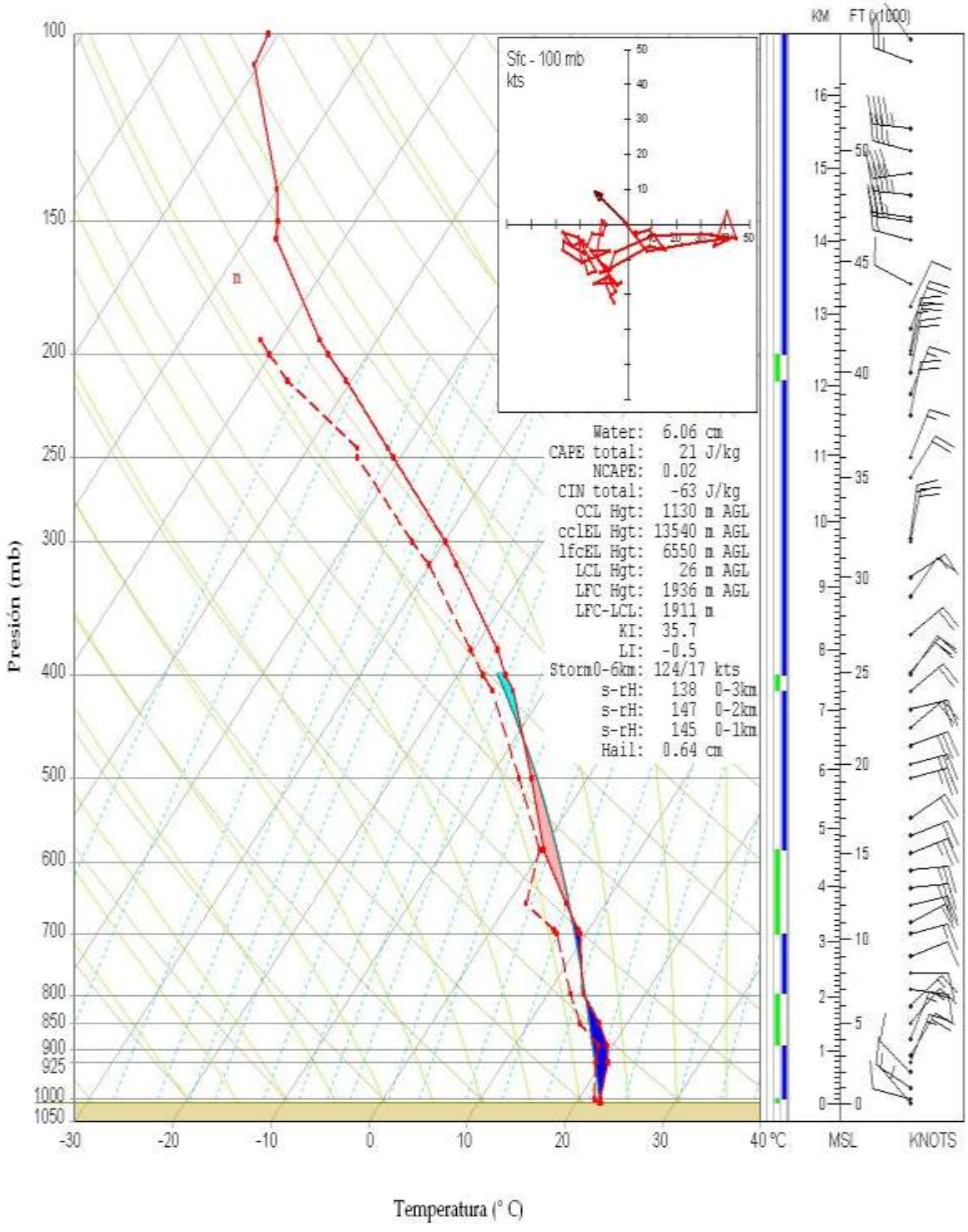


Figura 33 Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 8 de diciembre de 2010 a las 12:00 UTC.

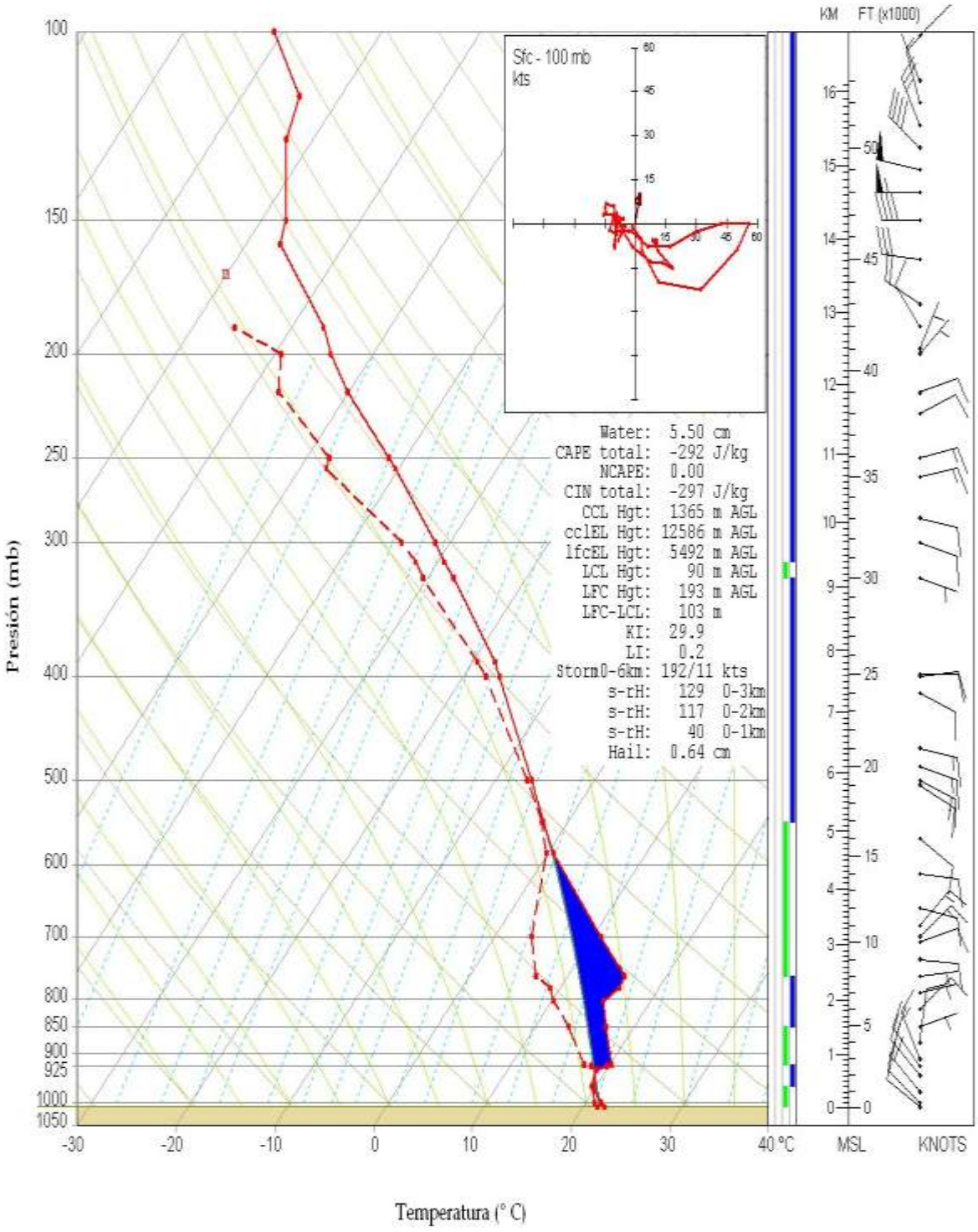


Figura 34 Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 9 de diciembre de 2010 a las 12:00 UTC.

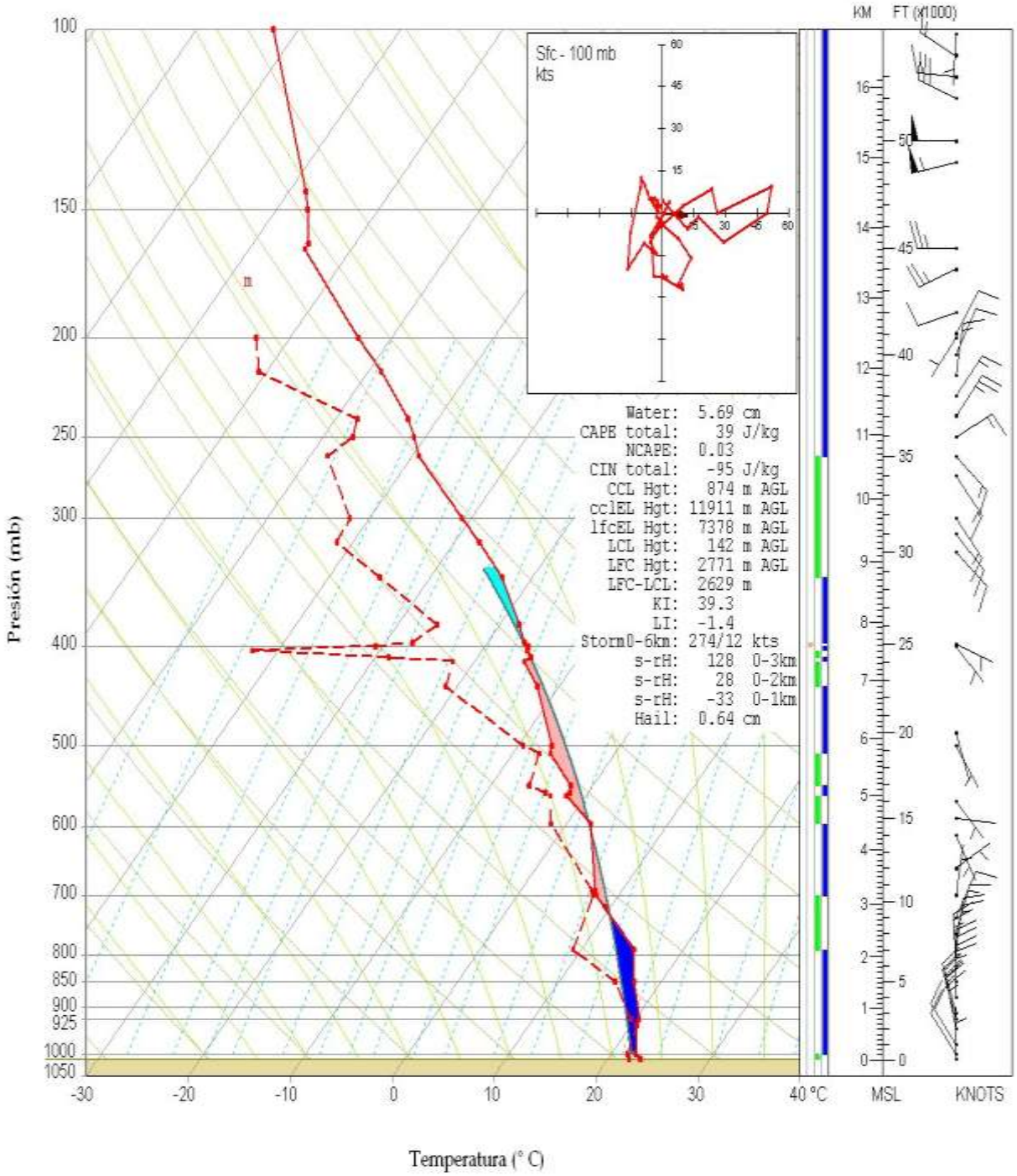


Figura 35 Radiosondeo de Corozal Oeste (8° 58’ 46” N, 79° 34’ 30” O) del 10 de diciembre de 2010 a las 00:00 UTC.

5.7 Precipitación

Para el mes de diciembre de 2010, la precipitación en la CHCP fue intermitente y dispersa durante los cinco primeros días del mes y empezó a intensificarse el día 6. El grueso de la tormenta se concentró los días 7, 8 y 9 de diciembre, con precipitaciones promedio en los tres días sobre toda la CHCP de 157, 183 y 43 mm, respectivamente, resultando un acumulado de 383 mm durante ese período. La precipitación se concentró principalmente en la parte alta de la cuenca del río Chagres, subcuenca del embalse Alajuela.

En el cuadro 5 se presenta un resumen de las precipitaciones registradas durante los tres días de la tormenta, los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010: el acumulado de los tres días, la precipitación total de diciembre 2010, la precipitación media histórica de diciembre, desde el inicio del registro de cada estación hasta 2009, en 40 estaciones ubicadas en la CHCP. Se incluyen los valores registrados en 9 estaciones operadas por ACP y 4 estaciones operadas por Etesa, ubicadas fuera de la CHCP, con el propósito de orientar las isoyetas en los lados sur y norte.

Se observa, en el mismo cuadro, que la estación pluviográfica Esperanza, localizada en la cabecera del río Chagres, fue la que registró la mayor cantidad de lluvia: 430, 506 y 153 mm, los días 7, 8 y 9 de diciembre, respectivamente, (de las 00:00 a las 24:00 horas) para un total de 1 089 mm durante los tres días; en la misma estación se registró la máxima intensidad de lluvia de 88 mm/h, entre las 3 y 4 h del 8 de diciembre. La estación que registró menos precipitación fue la de Gold Hill con un acumulado en los tres días de 159 mm.

En el mismo cuadro también se muestra el período de registro de cada estación y la relación entre la precipitación promedio histórica de diciembre y la registrada en diciembre de 2010. Se observa que en las estaciones con más de 70 años de registro, la precipitación de diciembre de 2010 fue cinco veces mayor que el promedio histórico de ese mes, en algunos casos, como en la estación Salamanca, que tiene registro desde 1900, la relación llegó hasta 7 veces mayor. Además, se presenta por estación, la precipitación máxima registrada en 24 horas continuas y el período en que ocurrió. La precipitación máxima acumulada en 24 horas continuas de la tormenta empezó el 7 de diciembre en todas las estaciones, el valor máximo se registró en la estación Esperanza con 788 mm, a partir de las 13 horas del 7 de diciembre. En la mayoría de las estaciones (el 40%), el máximo en 24 horas comenzó entre las 12 y 13 horas del 7 de diciembre.

Cuadro 5 Precipitación registrada durante la tormenta "La Purísima 2010" en las estaciones ubicadas en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) y sus alrededores.

No.		Estaciones	Registro desde	Precipitación en milímetros 07-Dic-10	08-Dic-10	09-Dic-10	7 al 9 Dic/10	Dic 2010	P máxima en 24 hrs. (mm)	hora inicial	Prom Dic hasta 2009	Rel dic10/dic histórico
1	ABU	Agua Buena	Abr-2007	151	104	32	287	536	233	7/12/10 1400 hr	---	
2	ACL	Agua Clara	Ene-1965	221	271	96	588	1655	440	7/12/10 1300 hr	306	5
3	ASA	Agua Salud #1	Ago-2009	127	164	31	322	1083	255	7/12/10 1200 hr	---	
4	ALA	Alhajuela	Jul-1899	128	149	40	317	687	251	7/12/10 1200 hr	135	5
5	ARC	Arca Sonia	Feb-1999	175	124	6	305	623	274	7/12/10 1200 hr	184	3
6	BBQ	Barbacoa	Ene-2008	148	142	8	298	868	237	7/12/10 1000 hr	---	
7	BCI	Barro Colorado	Abr-1925	138	154	22	314	1050	233	7/12/10 1100 hr	235	4
8	CNO	Caño	Ene-1912	125	139	9	273	768	221	7/12/10 1100 hr	173	4
9	CAN	Cañones	Sep-1947	118	115	114	347	913	186	7/12/10 0900 hr	199	5
10	CDL	Candelaria	Sep-1933	182	361	16	559	1472	499	7/12/10 1200 hr	305	5
11	CAS	Cascadas	Feb-1967	82	106	42	230	557	122	7/12/10 0700 hr	118	5
12	CCA	Cerro Cama	Abr-2000	203	137	7	347	983	270	7/12/10 0800 hr	174	6
13	CTO	Chagrecito	Jul-2010	368	378	126	872	2214	587	7/12/10 1200 hr	---	
14	CHM	Chamon	Nov-1999	306	250	100	656	1629	404	7/12/10 1200 hr	394	4
15	CHI	Chico	Nov-1932	199	164	10	373	891	337	7/12/10 1300 hr	170	5
16	CAB	Chico Cabecera	Abr-2009	190	392	41	623	1670	527	7/12/10 1200 hr	---	
17	CHR	Chorro	Sep-1947	140	124	33	297	857	197	7/12/10 0900 hr	164	5
18	CNT	Ciento	Abr-1947	149	178	60	387	1251	281	7/12/10 1100 hr	283	4
19	DBK	Dos Bocas	May-2000	280	475	126	881	1838	649	7/12/10 1300 hr	564	3
20	EMH	Empire Hill	Abr-1883	70	100	62	232	519	138	7/12/10 1100 hr	112	5
21	ESC	Escandalosa	Ene-1948	160	385	54	599	1613	478	7/12/10 1200 hr	338	5
22	EZA	Esperanza	Jun-1998	430	506	153	1089	2798	788	7/12/10 1300 hr	576	5
23	GAM	Gamboa	Jun-1881	78	100	26	204	530	112	7/12/10 0700 hr	143	4
24	GAD	Gasparillal	Jun-2000	93	96	45	234	677	115	7/12/10 1100 hr	135	5
25	GAT	Gatun	Ene-1905	173	223	44	440	1105	311	7/12/10 0700 hr	288	4
26	GOL	Gold Hill	Ene-2001	45	76	38	159	333	105	7/12/10 1500 hr	119	3
27	GUA	Guacha	Dic-1959	206	254	53	513	1252	338	7/12/10 0700 hr	211	6
28	VCG	Valle Central Gatún	Mar-2009	237	244	62	543	1244	333	7/12/10 0800 hr	---	
29	HUM	Humedad	Ago-1925	133	131	83	347	950	168	7/12/10 1100 hr	202	5
30	IBC	Isla Bruja Chiquita	Abr-2008	165	171	27	363	961	211	7/12/10 1300 hr	---	
31	JAG	Jagua	Feb-1998	39	70	53	162	705	77	7/12/10 1400 hr	226	3
32	MLR	Monte Lirio	Dic-1907	161	157	34	352	1191	255	7/12/10 0700 hr	255	5
33	PEL	Peluca	Oct-1933	200	340	32	572	1409	499	7/12/10 1300 hr	283	5
34	PBO	Punto Bohio	Abr-2008	155	164	47	366	1101	247	7/12/10 0700 hr	---	
35	RAI	Raices	Ene-1912	156	141	9	306	868	236	7/12/10 0800 hr	186	5
36	SAL	Salamanca	Ene-1900	172	215	27	414	1006	348	7/12/10 1100 hr	151	7
37	SMG	San Miguel	Abr-1941	197	424	66	687	1867	577	7/12/10 1300 hr	381	5
38	SCL	Santa Clara	May-2007	64	109	18	191	609	144	7/12/10 1300 hr	---	
39	TRA	Tranquilla	Mar-2005	164	172	12	348	745	312	7/12/10 1400 hr	---	
40	ZAN	Zanguenga	Mar-2004	109	90	3	202	617	158	7/12/10 1000 hr	---	
		Estaciones de precipitación operadas por ACP fuera de la CHCP										
41	BHT	Balboa Heights	Ene-1881	54	65	20	139					
42	CCO	Cerro Cocolí	May-2008	69	79	47	195					
43	CZL	Corozal Oeste	Mar-2005	71	78	44	193					
44	DHT	Diablo Heights	Ene-1983	49	73	36	158					
45	FAA	Balboa FAA	Abr-1998	51	72	10	133					
46	LMB	Limón Bay	Ene-1997	201	256	33	490					
47	MIR	Miraflores	Nov-1909	72	93	42	207					
48	AMA	Amador	Nov-2005	53	69	14	136					
49	CCL	Cocolí 326	Ago-2010	64	76	63	203					
		Estaciones de precipitación operadas por la Empresa de Transmisión eléctrica, S.A. (ETESA)										
50		Hato Pintado		113	28	2	143					
51		Tocumen		78	68	6	152					
52		Loma Bonita		65	86	5	156					
53		San Pedro		214	143	0	357					

5.7.1 Análisis de la variación espacial y temporal de la tormenta “La Purísima 2010” en la CHCP

Para determinar la precipitación promedio y la distribución espacial de la lluvia en la CHCP y para las 10 subcuencas principales se usó el método de isoyetas, técnica muy utilizada ya que considera la topografía y dirección de los vientos.

El mapa de isoyetas de la precipitación acumulada en los tres días, del 7 al 9 de diciembre de 2010 (de las 00:00 a la 24:00 h), se elaboró utilizando las 40 estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la CHCP y las 4 operadas por ETESA. Las isoyetas fueron ajustadas según un análisis de balance hídrico realizado en las subcuencas de los ríos que cuentan con estaciones hidrométricas (ver Figura 36). En las isoyetas se observa que en la región noreste del Canal la precipitación acumulada en los tres días oscila entre 300 y 1000 mm. Al suroeste, en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande, la lluvia fue menor; los valores varían entre 150 y 300 mm.

En la figura 37 se presenta el mapa de isoyetas del 8 de diciembre de 2010 (de la 00:00 a las 24:00 horas) de la CHCP. Para su elaboración se utilizaron las mismas 40 estaciones pluviométricas consideradas en el trazado de las isoyetas para el acumulado de los tres días, del 7 al 9 de diciembre de 2010. También se verificó su consistencia con los caudales registrados en las subcuencas principales de la CHCP. Estas isoyetas tienen la misma distribución de lluvia de los tres días acumulados debido a que el 8 de diciembre, en la mayoría de las estaciones se registró la mayor cantidad de lluvia.

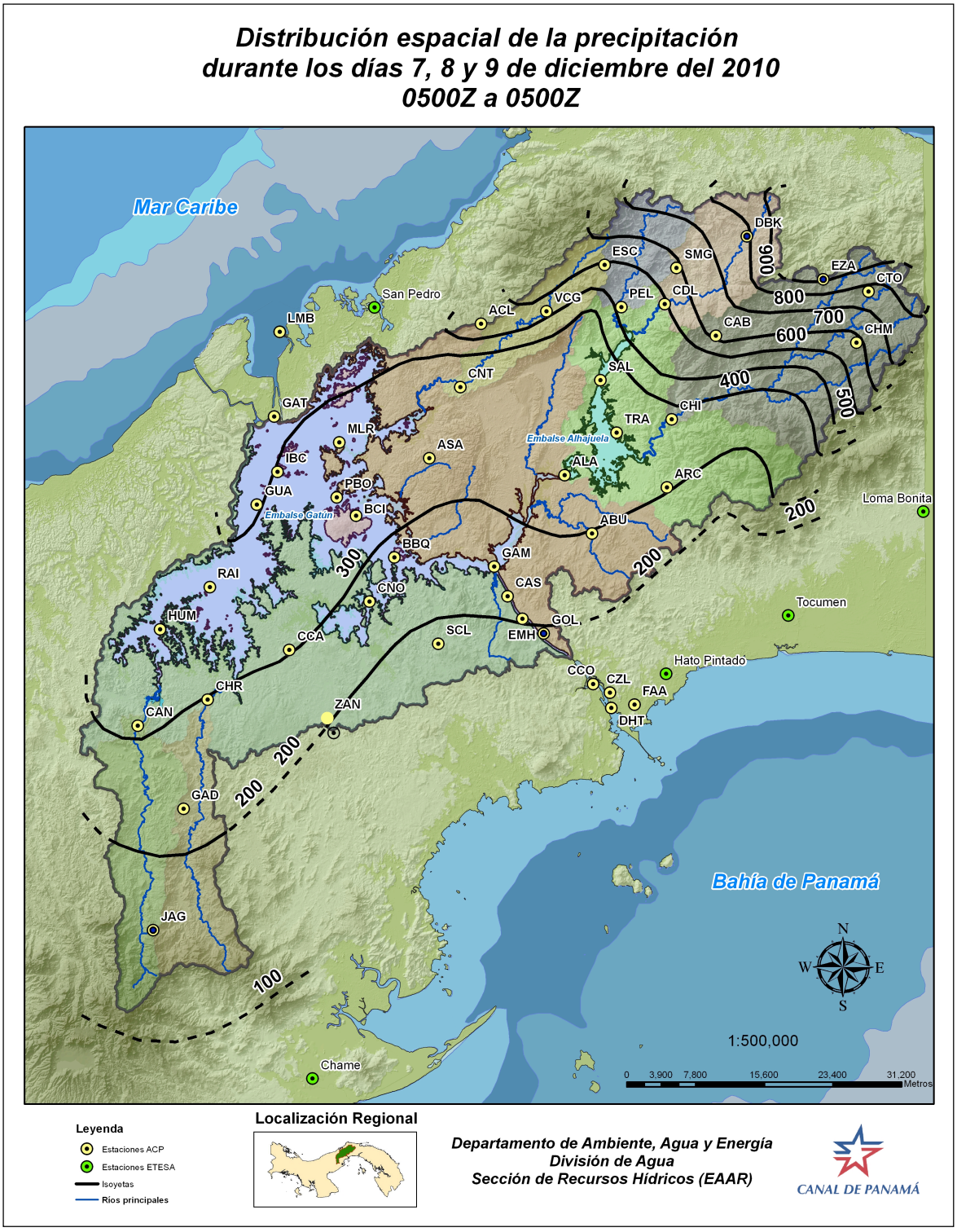


Figura 36 Mapa de isoyetas de la tormenta “La Purísima 2010” para la precipitación acumulada durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

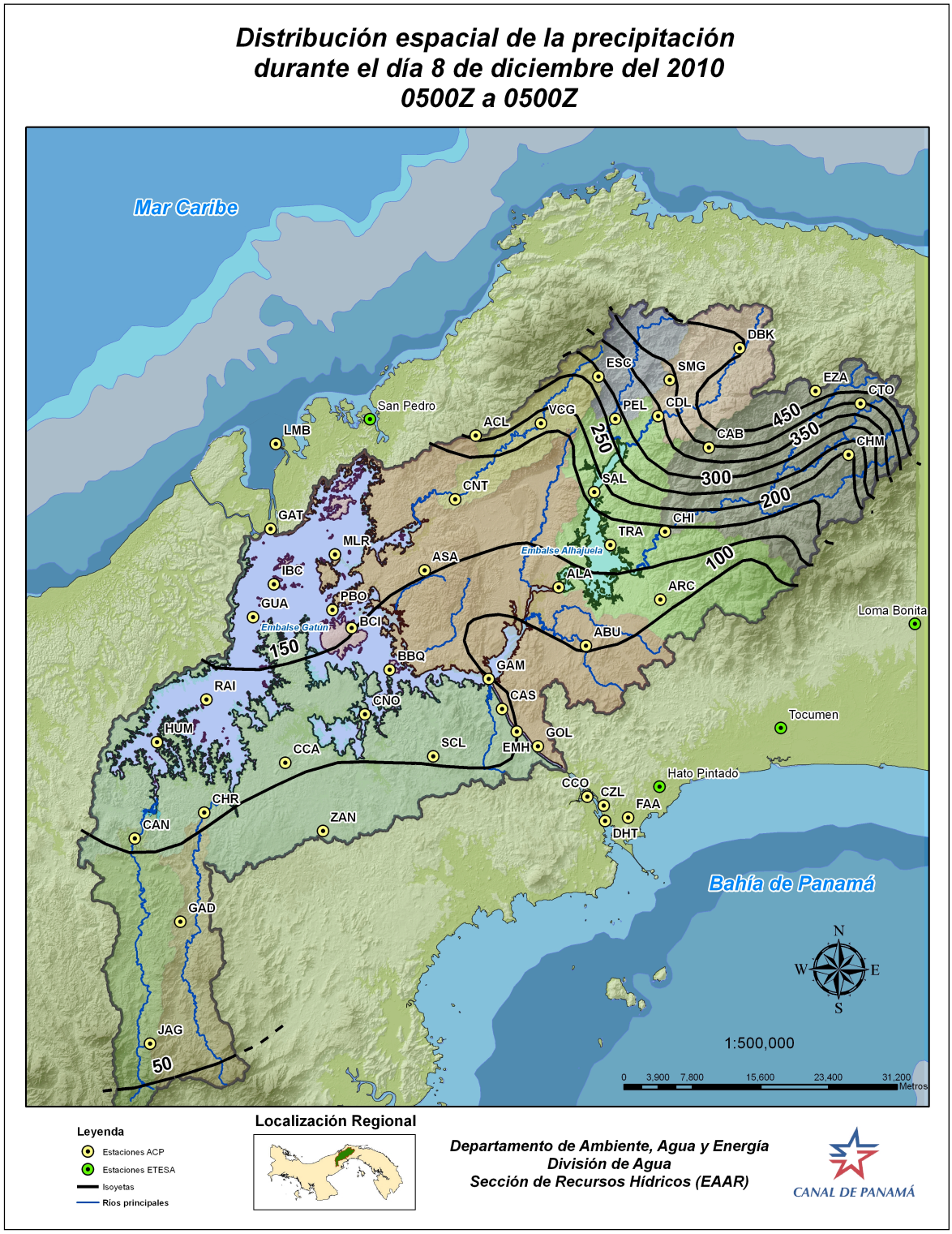


Figura 37 Mapa de isoyetas de la tormenta “La Purísima 2010” para la precipitación acumulada el 8 de diciembre de 2010 (00:00 a la 24:00).

De acuerdo con las isoyetas del acumulado de los tres días de la tormenta, del 7 al 9 de diciembre de 2010, la precipitación promedio de los tres días en las subcuencas principales de la CHCP varían entre 186 mm, en la subcuenca del río Trinidad hasta la estación hidrométrica El Chorro, ubicada al suroeste de la CHCP, y 821 mm en la subcuenca del río Pequení hasta la estación Candelaria, ubicada al noreste de la CHCP.

En el cuadro 6 se muestra la precipitación media para los días 7, 8 y 9 de diciembre (obtenida con Thiessen) y el acumulado de los tres días (isoyetas). Los valores diarios se ajustaron proporcionalmente para obtener el valor estimado mediante las isoyetas. Además, se presentan, por subcuenca, las precipitaciones promedio de diciembre de 2010, estimadas mediante el método de Thiessen.

Cuadro 6 Precipitación promedio de los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010, y del mes de diciembre del mismo año, en las subcuencas principales de la CHCP.

Subcuenca	Precipitación Promedio en mm				
	7 Dic-2010	8 Dic-2010	9 Dic 2010	7,8 y 9 Dic/2010	Dic-2010
Río Boquerón en Peluca (2)	216	406	56	678	1667
Río Pequení en Candelaria (3)	285	445	92	821	1784
Río Chagres en Chico (4)	247	316	85	648	1636
Madden Local (5)	152	189	22	363	930
Subcuenca Embalse Alhajuela	216	293	59	568	1395
Río Gatún en Ciento (1)	164	261	65	491	1560
Río Trinidad en El Chorro (6)	55	82	49	186	712
Río Cirí Grande en Los Cañones (7)	58	86	64	209	743
Gatún Sur (8)	116	123	32	271	804
Gatún Norte (9)	135	151	38	324	865
Embalse Gatún (10)	159	163	32	353	1044
Subcuenca Embalse Gatún (Downstream)	122	139	39	301	892
CHCP	157	183	43	383	1047

En la Figura 38 se muestra la ubicación de las subcuencas en la CHCP con el correspondiente valor promedio de precipitación, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

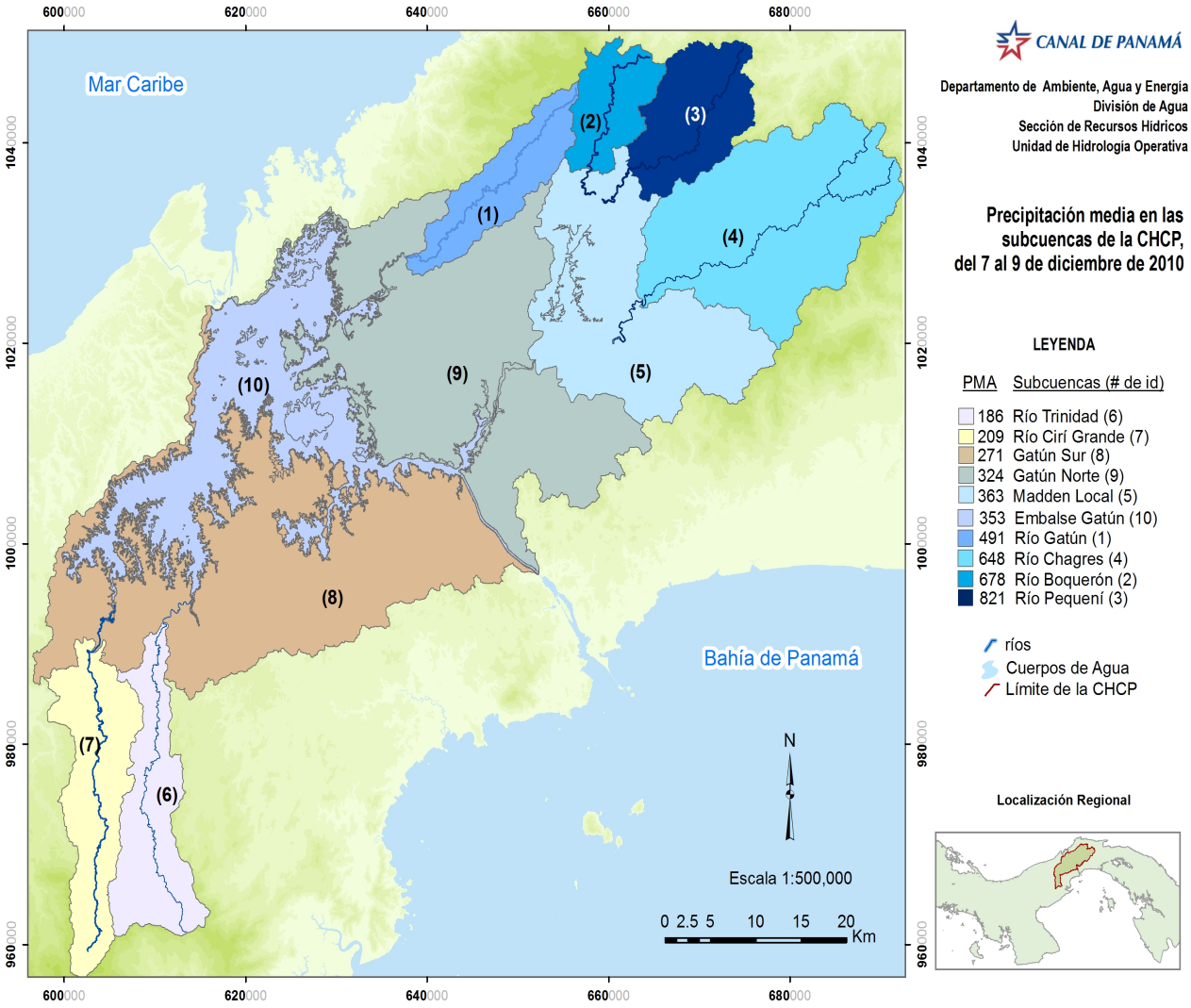


Figura 38 Precipitación media en las subcuencas de la CHCP, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

En la figura 39 se presentan las curvas masa de precipitación durante los tres días de la tormenta correspondiente a la CHCP y la de las estaciones que registraron la mayor y menor precipitación dentro de la cuenca, que fueron Esperanza y Gold Hill, respectivamente. Con las 40 estaciones ubicadas dentro de la cuenca se obtuvo la precipitación media cada hora en la CHCP del 7 al 9 de diciembre, aplicando el método de Thiessen. Con la precipitación promedio acumulada en los tres días, obtenida por los métodos de Isoyetas y Thiessen, se obtuvo un factor de ajuste dividiendo el resultado del primero por el segundo. Presumiendo que el de isoyetas es más confiable, con ese factor de ajuste se corrigió la precipitación media estimada cada hora por el método de Thiessen en la CHCP y en las subcuencas principales. Los valores promedio horarios acumulados ya ajustados se presentan con la línea roja en la misma figura. Se observa que la precipitación media en toda la cuenca en los tres días fue de 383 mm, la máxima en 24 horas fue de 272 mm, iniciando a las 12 horas del 7 de diciembre de 2010.

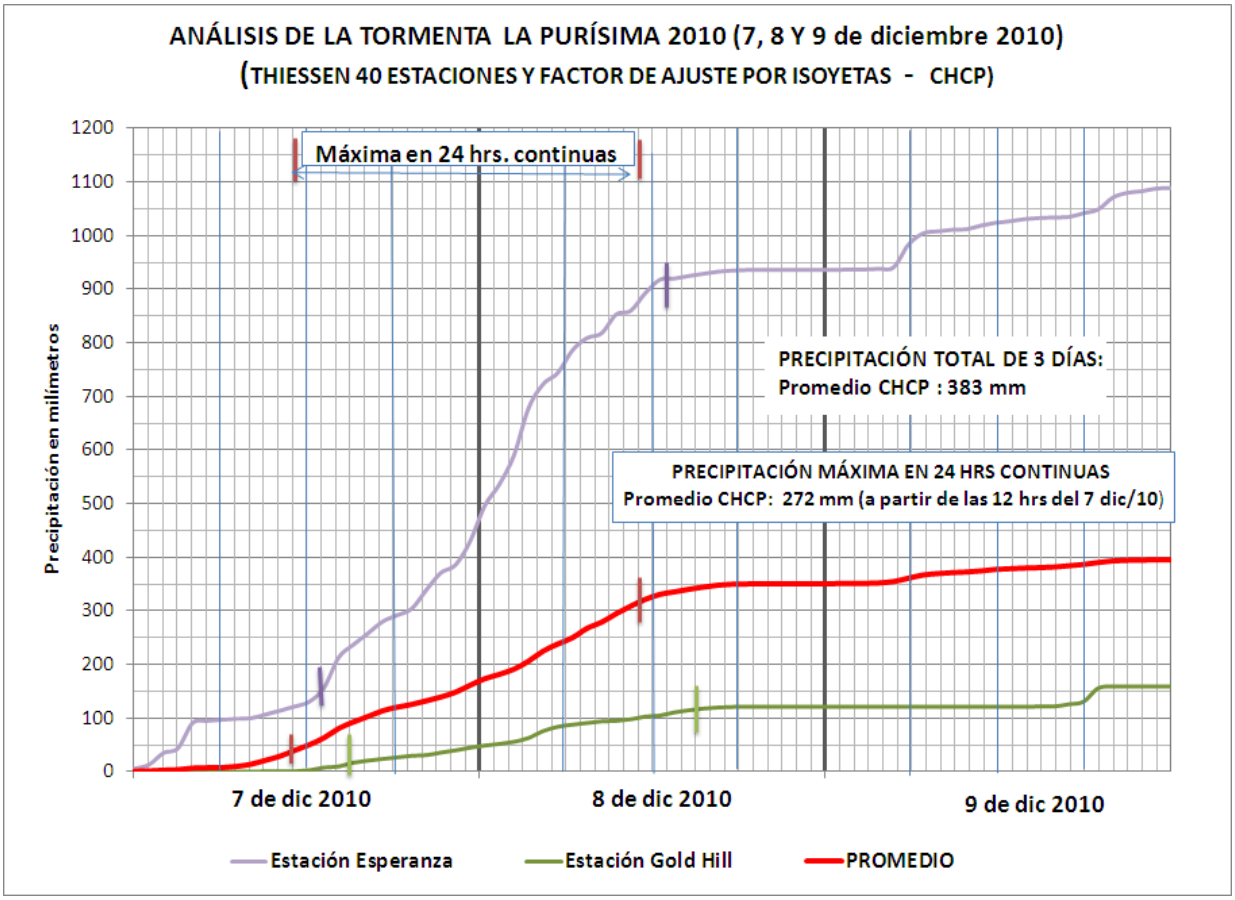


Figura 39 Curva masa de precipitación media durante los tres días de la tormenta en la CHCP.

5.7.2 Análisis de frecuencias de la precipitación máxima promedio en 24 horas continuas para la CHCP, subcuencas del embalse Gatún (aguas abajo de Madden) y embalse Alajuela, y 10 subcuencas principales.

Se realizó un análisis de frecuencia de la precipitación máxima promedio areal en 24 horas continuas para determinar los períodos de retorno asociados a la magnitud de la tormenta, en la CHCP, en las subcuencas del embalse Gatún aguas abajo y embalse Alajuela, y para las 10 subcuencas principales (ver Figura 38). Se aplicó la función de distribución de probabilidad General de Valores Extremos (FDP GVE), tomando como base el registro de 39 estaciones para toda la CHCP. De estas, 32 tienen influencia en la subcuenca del embalse Gatún y 16 en la subcuenca del embalse Alajuela. El período analizado fue de 39 años (1972-2010).

Los datos de precipitación para realizar el análisis de frecuencia del evento provienen de dos fuentes: datos generados por el estudio “Study of Extreme Precipitation over the Panama Canal Watershed” realizado por el Hydrologic Research Center en agosto de 2007, para el período

1972 a 2006, y datos extraídos directamente de la base de datos del modelo operativo de la sección de Recursos Hídricos PanMap (Panamá-Precipitación Media Areal, según su nombre en español), para el período 2007 a 2010.

El sistema PanMap permite recopilar, analizar y distribuir las precipitaciones totales cada 15 minutos, para cada cuadrícula de un kilómetro cuadrado de la superficie de drenaje de la cuenca del Canal, calculadas por la integración que resulta de la red pluviométrica de la CHCP y la precipitación estimada por el radar meteorológico (banda S) operado por la sección de Recursos Hídricos. Los valores de precipitación estimados por el radar para cada cuadrícula, cada 15 minutos, se suman al final de cada hora y los totales se comparan con los datos de las estaciones de precipitación en tierra. Si los valores estimados por el radar, comparados con los pluviógrafos, están fuera de un rango previamente establecido, se realiza un ajuste por sesgo y luego se integran con los de tierra, obteniéndose la mejor distribución espacial de precipitación en la cuenca.

Eliminados los errores por sesgo, basados en los datos horarios se calcularon los totales máximos de precipitación diaria en 24 horas, usando ventanas móviles, y se obtuvieron 39 valores máximos anuales (período 1972 a 2010).

Para detectar datos dudosos (outliers) se aplicó el método descrito en la publicación del Water Resources Council (Estimating Peak Flow Frequencies for Natural Ungaged 1981) basado en el promedio y desviación estándar de los logaritmos de las series de datos y un factor de frecuencia que depende de la longitud del registro.

Con este método se detectaron 10 valores fuera de la tendencia general de los datos para la tormenta “La Purísima 2010” y un valor de 318 mm en la subcuenca de Madden local para la tormenta del 3 de abril de 2007. En todos los casos se consideraron válidos para el análisis de frecuencias los valores de lluvias registrados. Las series de datos se presentan en la figura 40 y cuadro 7. La precipitación máxima promedio en 24 horas de la tormenta “La Purísima 2010” comparada con el valor más alto registrado hasta el año 2009, para las tres cuencas principales: CHCP, embalse Gatún aguas abajo y embalse Alajuela, es del orden de 1.5 veces mayor, y con respecto al promedio del período 1972-2009 es de casi tres veces, indicando la severidad de la tormenta.

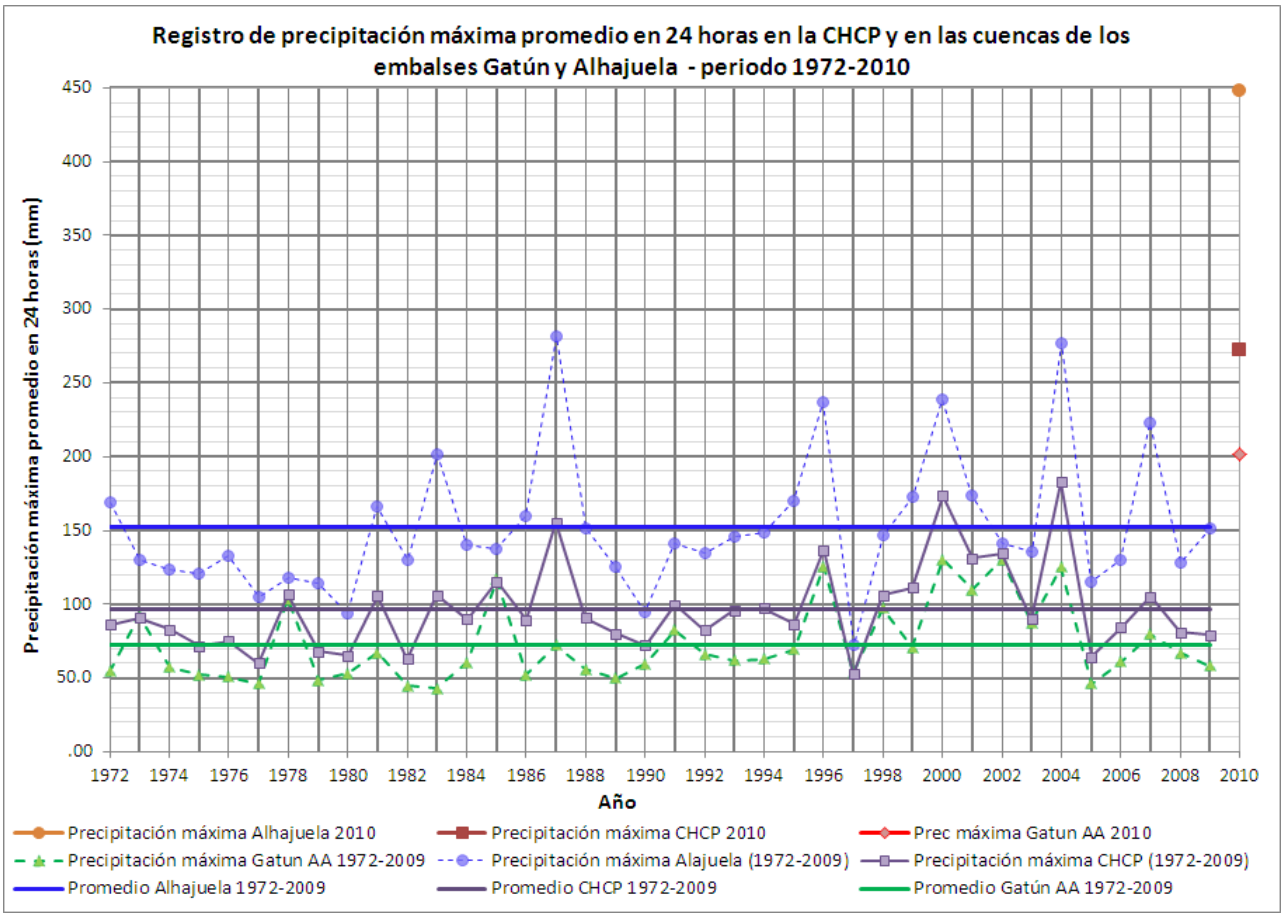


Figura 40 Registro de precipitación máxima promedio en 24 horas en la CHCP y en las cuencas de los embalses Gatún y Alajuela en el período 1972-2010.

Nota: Los valores de los cuadros resaltados en amarillo implican la importancia del dato.

Cuadro 7 Precipitaciones máximas promedio en mm en 24 horas continuas en la CHCP - período 1972-2010.

Año	(1) CHCP	(2) Embalse Gatún AA	(3) Embalse Alhajuela	(1) Río Gatún	(2) Río Boquerón	(3) Río Pequení	(4) Río Chagres	(5) Madden Local	(6) Río Trinidad	(7) Río Cirí Grande	(8) Gatún Sur	(9) Gatún Norte	(10) Embalse Gatún
1972	86.1	54.5	169	110	244	286	85.9	66.8	66.3	68.1	50.7	64.8	67.0
1973	90.6	92.0	130	91.1	194	216	98.8	100	95.2	96.7	88.4	80.9	101
1974	82.8	57.3	123	121	169	160	97.3	73.5	63.7	62.9	46.5	78.2	76.5
1975	71.8	52.0	120	105	181	173	126	82.8	77.2	77.3	51.1	61.8	84.1
1976	75.0	50.8	133	100.0	168	171	111	80.0	46.5	46.1	45.8	59.3	78.7
1977	60.0	46.3	105	84.9	151	171	84.4	65.1	56.2	56.7	36.8	67.5	52.5
1978	107	103	118	120	131	134	144	124	136	136	87.3	84.2	87.0
1979	68.2	48.3	115	91.5	184	183	137	114	44.7	45.7	46.8	77.6	63.2
1980	65.3	53.3	94.2	82.5	124	148	194	157	73.7	72.6	53.2	64.5	101
1981	106	66.9	166	134	216	231	135	95.1	55.7	55.7	63.4	103	83.8
1982	62.9	44.9	130	78.8	179	211	126	84.7	55.3	54.4	41.3	73.3	55.7
1983	106	43.1	201	161	330	330	130	93.3	38.9	39.1	38.7	66.8	72.0
1984	90.0	60.5	140	120	179	162	209	171	62.1	62.8	50.6	102	65.6
1985	115	117	137	134	139	168	143	119	96.0	99.3	101	138	167
1986	89.3	52.2	160	96.8	180	224	157	89.2	43.1	44.1	42.9	71.8	59.5
1987	155	72.1	282	156	343	466	200	131	66.6	67.5	60.0	94.0	103
1988	90.8	55.9	152	139	200	160	123	128	51.7	52.8	51.2	67.8	66.9
1989	80.0	49.6	126	120	225	200	114	88.7	43.0	42.6	41.7	74.9	61.7
1990	72.4	59.8	94.3	98.0	117	124	126	112	58.6	58.9	56.6	98.5	95.9
1991	99.4	82.2	141	126	173	167	152	107	83.1	83.5	70.2	80.1	98.5
1992	82.5	66.1	135	100	190	209	129	81.5	71.9	73.4	54.5	95.1	77.4
1993	95.8	62.2	146	103	180	209	134	107	72.9	74.8	51.5	104	90.5
1994	97.1	62.7	149	120	232	252	108	64.6	51.0	52.0	51.8	65.0	82.4
1995	86.6	69.6	170	121	275	298	144	105	51.1	52.7	55.9	74.7	123
1996	137	126	237	205	337	320	208	147	164	166	122	92.7	131
1997	52.4	53.7	72.3	69.7	97.5	106	83.9	73.1	51.6	52.3	42.0	85.6	71.5
1998	106	97.1	147	147	210	184	152	99.2	78.4	78.5	83.2	92.1	146
1999	111	70.8	173	128	213	226	180	121	68.8	69.2	53.9	76.7	106
2000	174	130	239	182	251	285	290	209	100	106	112	143	153
2001	131	110	174	130	204	239	234	162	87.1	91.3	98.1	121	133
2002	134	130	141	80.1	192	254	174	107	137	159	183	55.8	207
2003	89.9	87.4	136	96.0	167	214	129	70.6	105	128	95.4	74.4	95.9
2004	183	125	277	224	307	355	317	184	87.3	81.2	110	112	142
2005	64.3	46.0	115	96.1	165	181	98.2	91.0	54.2	69.6	70.6	86.2	64.5
2006	84.3	61.1	130	172	188	205	122	93.4	88.7	73.8	69.5	67.7	64.5
2007	105	79.7	223	201	327	354	197	318	76.5	93.1	80.5	194	115
2008	81.0	67.2	128	99.5	200	199	105	117	72.6	70.0	60.1	78.1	80.2
2009	79.1	58.2	152	146	239	241	109	80.8	67.8	62.8	77.3	65.3	69.9
2010	272	201	448	392	572	644	477	317	100	111	184	247	250
1972-2009													
Promedio	96.5	72.8	152	123	205	221	148	114	73.7	75.7	68.3	86.6	94.6
DS	29.8	26.4	47.0	36.9	61.1	73.6	53.0	48.2	27.6	30.1	29.7	27.1	34.6
CV	0.308	0.364	0.309	0.299	0.298	0.332	0.359	0.424	0.374	0.398	0.434	0.313	0.366
Coef. Asim	1.25	1.05	1.27	1.04	0.81	1.26	1.50	2.42	1.49	1.54	1.88	2.11	1.34
Coef. Curt.	1.59	-0.10	1.58	0.73	0.31	2.13	2.46	8.08	2.58	2.30	4.84	5.89	1.78
Mínimo	52.4	43.1	72.3	69.7	97.5	106	83.9	64.6	38.9	39.1	36.8	55.8	52.5
Máximo	183	130	282	224	343	466	317	318	164	166	183	194	207
2010/Max	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.4	1.5	1.0	0.6	0.7	1.0	1.3	1.2
2010/Prom	2.8	2.8	2.9	3.2	2.8	2.9	3.2	2.8	1.4	1.5	2.7	2.9	2.6

Las series de datos se ordenaron de mayor a menor y se les asignó una distribución de probabilidad empírica por medio de la fórmula de Weibull. Los parámetros de la FDP GVE fueron determinados con el método de momentos lineales (MOL). La calidad del ajuste de las series de datos a la FDP GVE se evaluó por medio del coeficiente de correlación entre los valores observados ordenados y los correspondientes valores ajustados y del Error Estándar Medio (EEM) expresado en términos relativos. Este parámetro varió entre 4.0 y 8.2 % (Cuadro 8).

Cuadro 8 Ajuste de los parámetros de la FDP GVE a precipitaciones máximas promedio en 24 horas en la CHCP para el período de 1972-2010.

Subcuenca	FDP	Método de Ajuste	Bondad de Ajuste		Parámetros de Ajuste			Periodos de retorno en años			Pmax 2010 (mm)	Tr (años)
			R	EEM (%)	μ	α	κ	50	100	200		
Rio Boqueron	GVE	MOL	0.9673	7.5	175.5635	47.6559	-0.1992	457	534	623	572	136
Rio Pequení	GVE	MOL	0.9784	6.1	185.3571	52.9355	-0.2407	528	631	752	644	108
Rio Chagres	GVE	MOL	0.9782	6.0	121.0808	33.6755	-0.3217	384	476	591	477	101
Madden Local	GVE	MOL	0.9730	6.0	91.2547	25.8836	-0.3336	299	374	468	317	60
Rio Gatún	GVE	MOL	0.9610	5.7	104.5557	26.7613	-0.2841	296	358	434	392	138
Gatún Norte	GVE	MOL	0.9783	5.6	73.4668	14.7993	-0.3779	205	257	324	247	89
Embalse Gatún	GVE	MOL	0.9930	4.5	77.4582	23.0421	-0.2582	233	281	338	250	65
Gatún Sur	GVE	MOL	0.9797	6.5	54.0987	17.2050	-0.3026	182	226	280	184	51
Rio Trinidad	GVE	MOL	0.9904	4.0	61.0999	18.6751	-0.1204	154	176	199	100	7
Rio Ciri Grande	GVE	MOL	0.9911	4.2	61.5590	18.9549	-0.1808	169	198	230	111	9
Embalse Alhajuela	GVE	MOL	0.9705	8.2	128.8690	31.2855	-0.2930	357	433	526	448	113
Embalse Gatún AA	GVE	MOL	0.9807	6.5	59.3727	17.2914	-0.2848	183	224	273	201	69
CHCP	GVE	MOL	0.9781	5.5	81.8474	20.9730	-0.2569	223	266	318	272	108

De acuerdo con el análisis de frecuencia, la precipitación máxima promedio en 24 horas de la tormenta “La Purísima 2010”, para la CHCP tiene un período de retorno de 108 años, para la subcuenca del embalse Gatún de 69 años y para la subcuenca del embalse Alajuela de 113 años. Con excepción de la subcuenca del embalse Gatún, estos períodos de retorno indican que la tormenta “La Purísima 2010” fue un evento extraordinario con probabilidad de ocurrencia menor al 1%. En las figuras 41, 42 y 43 se presentan los resultados del análisis de frecuencia.

Los resultados del análisis de frecuencia para las 10 subcuencas principales (Cuadro 7) indican que las lluvias más extremas ocurren en la parte noreste de la CHCP: subcuencas del río Gatún, Boquerón, Pequení, Chagres y Madden local, con cantidades entre 358 y 631 mm para un período de retorno de 100 años. En las subcuencas de Gatún norte y embalse Gatún, en la parte central de la CHCP, los valores son más moderados, entre 257 y 281 mm y disminuyen al suroeste, en las subcuencas de Gatún sur y de los ríos Trinidad y Cirí Grande, con valores entre 176 y 226 mm para el mismo período de retorno.

Durante la tormenta “La Purísima 2010” hubo un comportamiento similar, pero con menor probabilidad de ocurrencia en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún, en donde se determinaron períodos de retorno del orden de 150 años (Figura 44).

En las subcuencas de los ríos Pequení y Chagres los períodos de retorno fueron estimados del orden de 100 años. En estas subcuencas ubicadas en la parte noreste de la CHCP las precipitaciones máximas promedio en 24 horas variaron entre 392 y 644 mm.

En la subcuenca de Madden local, en las subcuencas de la parte central de la CHCP y en la subcuenca de Gatún sur los períodos de retorno estimados variaron entre 50 y 90 años con precipitaciones máximas promedio en 24 horas entre 184 y 317 mm (Figura 45). Al suroeste de la CHCP la tormenta de "La Purísima 2010" fue un evento ordinario con períodos de retorno bajos entre 5 y 10 años, y valores de precipitación máxima del orden de 100 mm (Figura 46). La distribución geográfica de estos resultados se puede apreciar en la figura 47.

Además se observó que de 71 tormentas independientes analizadas en el período 1940-2010, cinco de las mayores tormentas se dieron en el año 2010 y de éstas, las tres mayores tormentas del registro analizado ocurrieron durante el año 2010.

Los datos de precipitación para realizar el análisis de frecuencia del evento provienen de dos fuentes: datos generados por el estudio "Study of Extreme Precipitation over the Panama Canal Watershed" realizado por el Hydrologic Research Center en agosto de 2007, para el período 1972 a 2006 y datos extraídos directamente de la base de datos del modelo operativo de la sección de Recursos Hídricos PanMap (Panamá-Precipitación Media Areal, según su nombre en español), para el período 2007 a 2010.

En el cuadro 9 se presenta un extracto con las 10 mayores tormentas extraídas del período 1940-2009 (Georgakakos, et. al. 2011), y el dato de precipitación para la tormenta "La Purísima 2010" se generó en la sección de Recursos Hídricos y proviene del ajuste por isoyetas realizado para la CHCP.

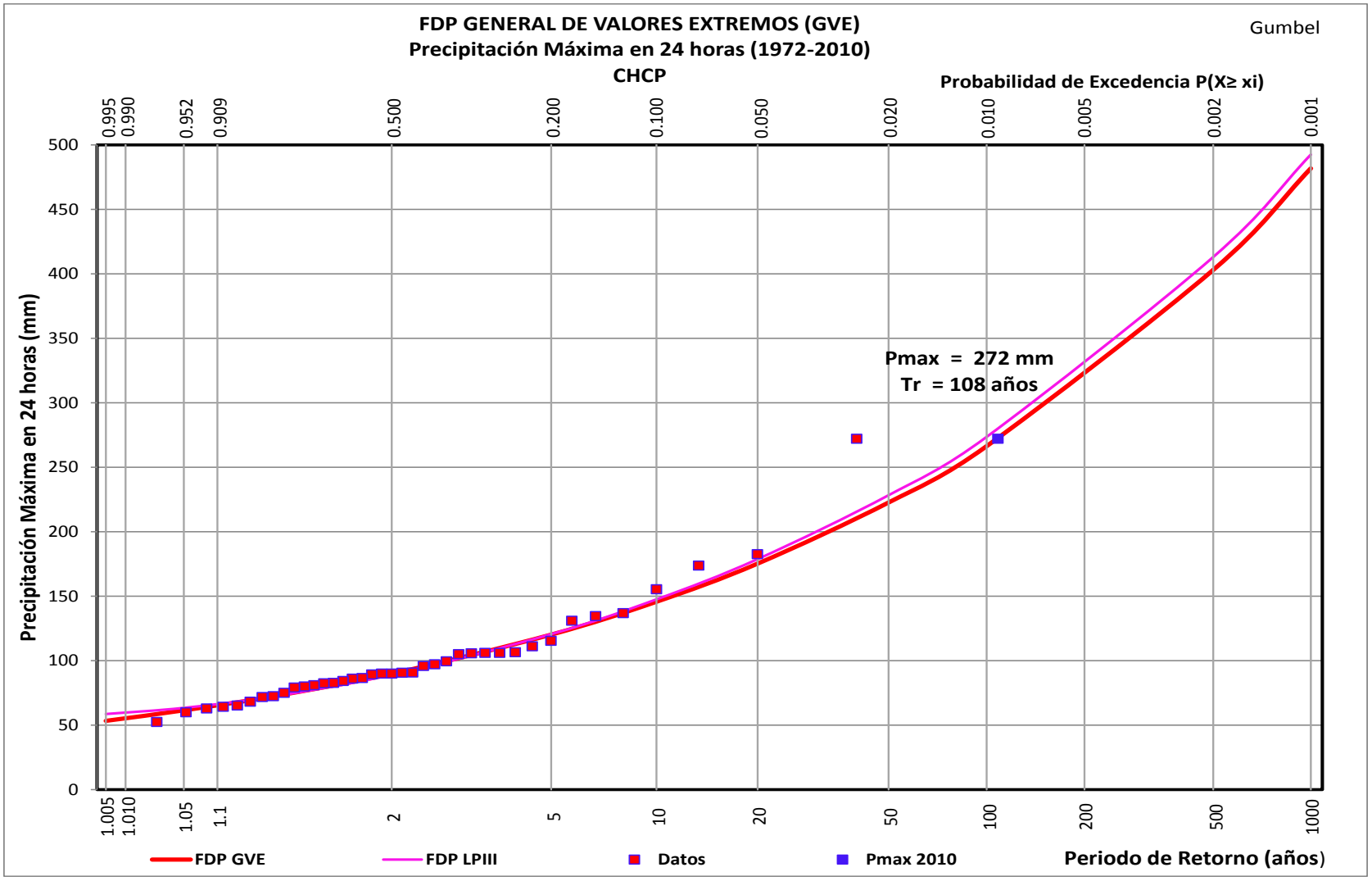


Figura 41 Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá.

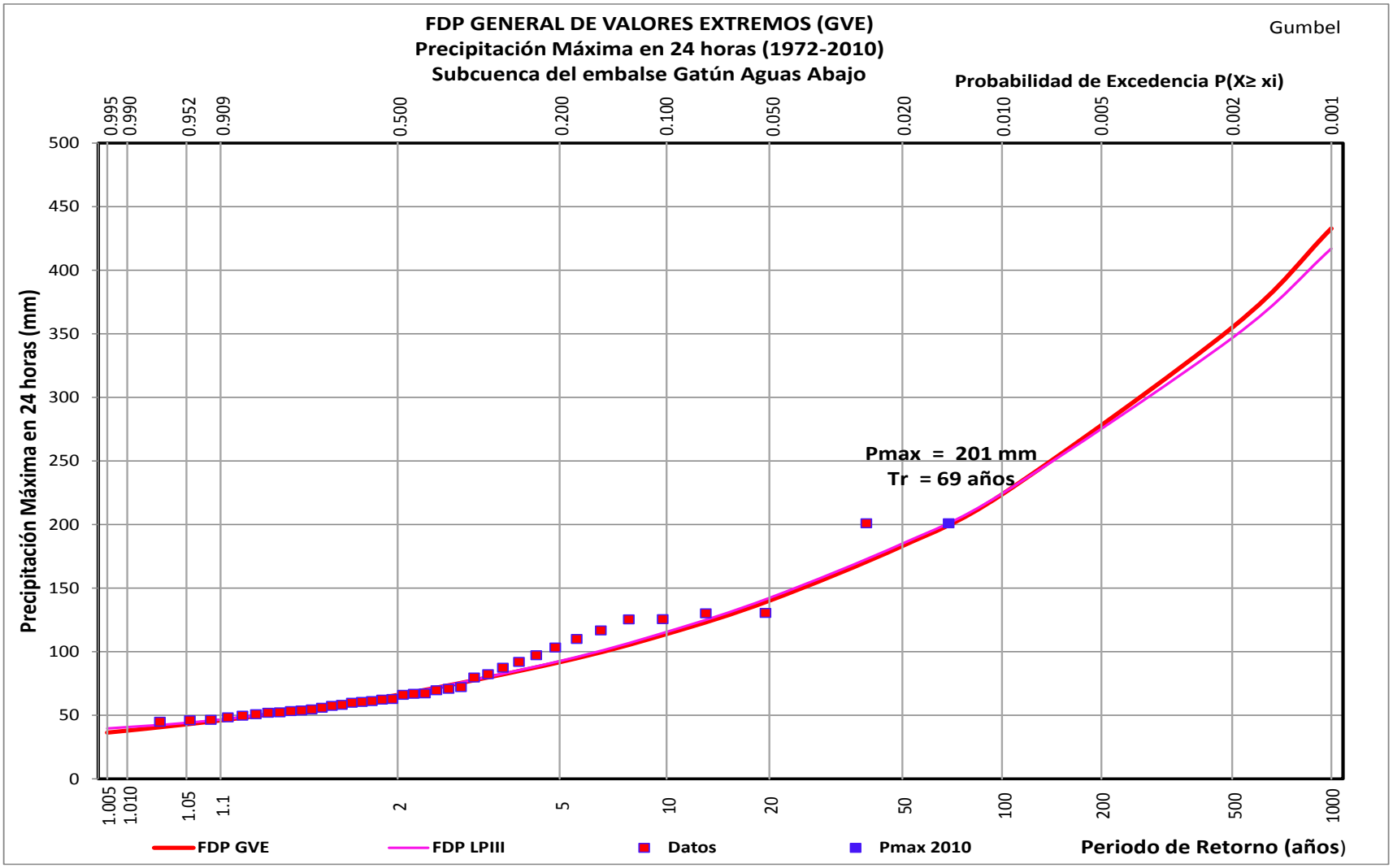


Figura 42 Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca de Gatún aguas abajo.

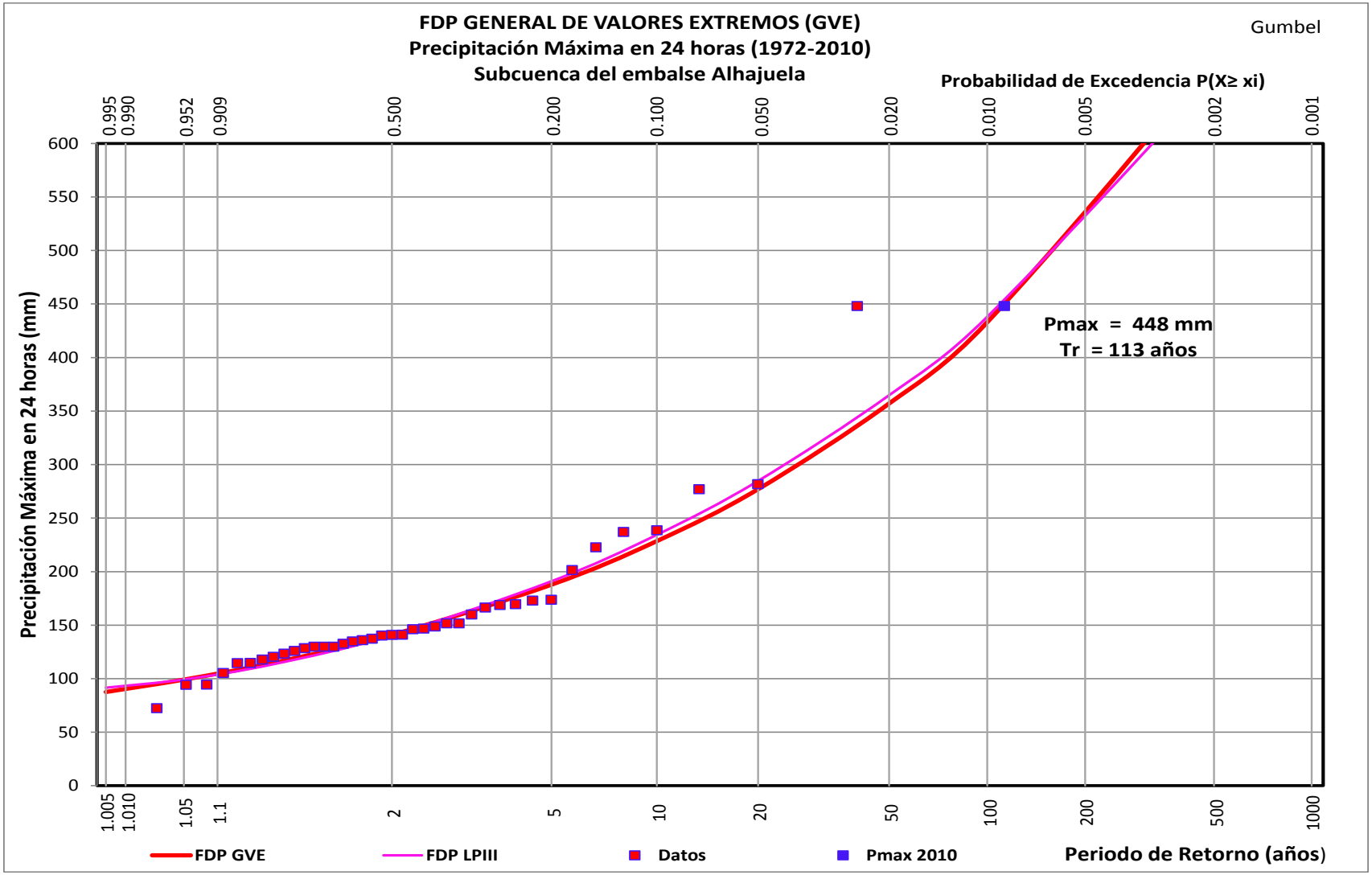


Figura 43 Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca del embalse Alajuela.

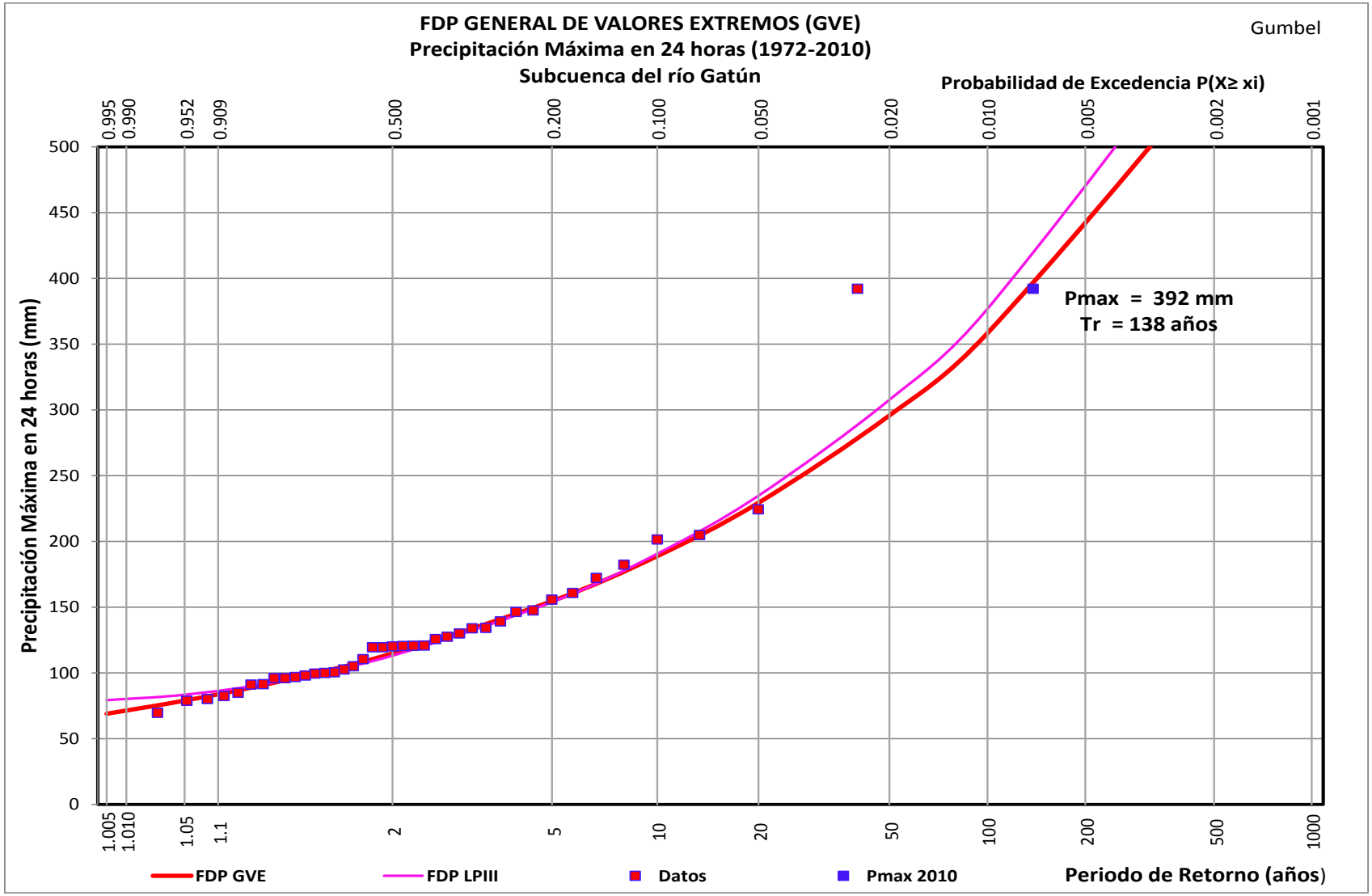


Figura 44 Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca del río Gatún.

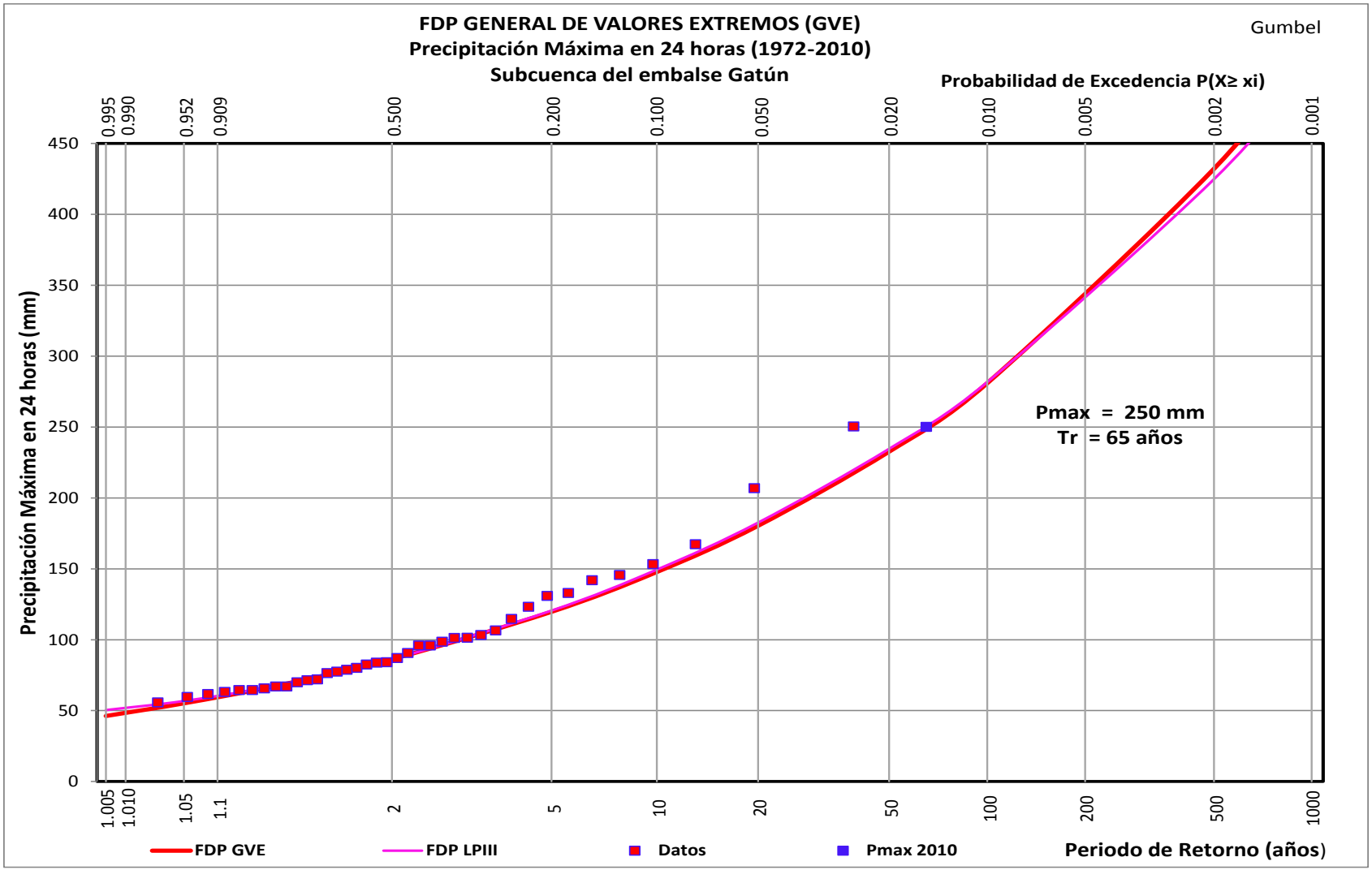


Figura 45. Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca embalse Gatún

.

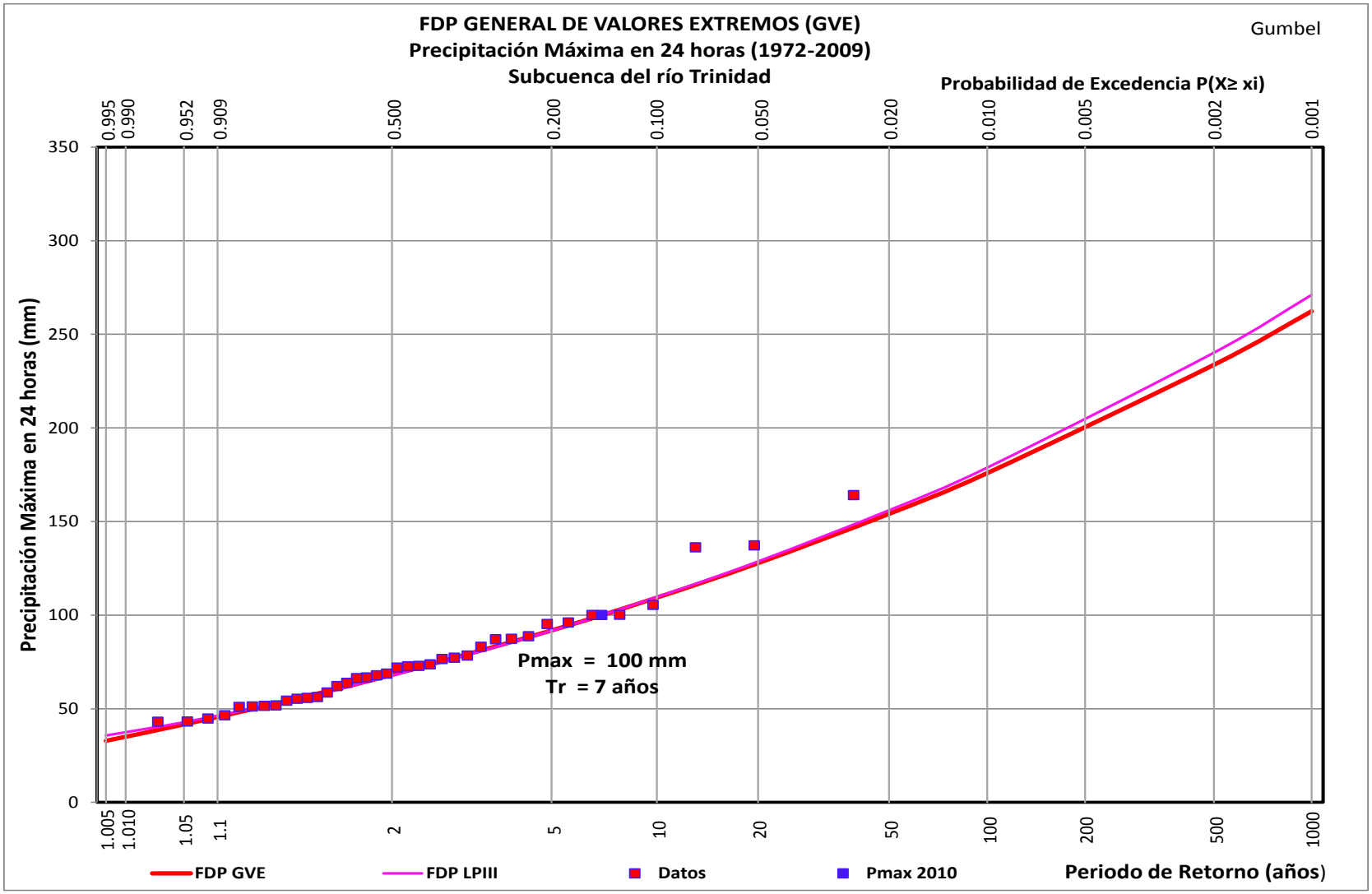


Figura 46 Análisis de frecuencia de precipitación máxima promedio en 24 horas para la subcuenca del río Trinidad.

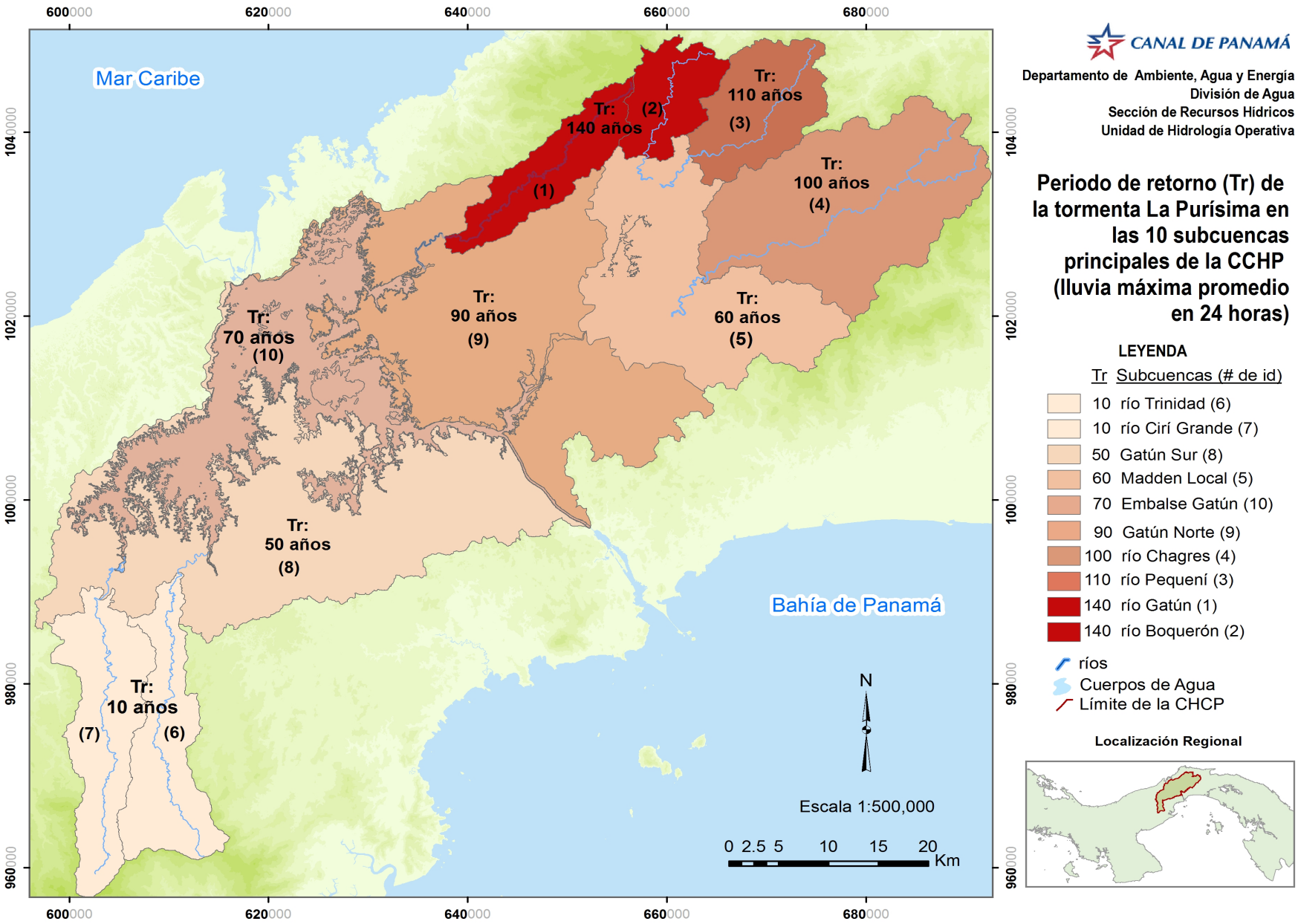


Figura 47 Períodos de retorno de la tormenta “La Purísima 2010” según el área geográfica analizada en la CHCP.

Cuadro 9. Las diez mayores tormentas en 24 horas para el período 1940-2010.

Rango	CHCP		Gatún A. Abajo		Madden	
	Año	P (mm)	Año	P (mm)	Año	P (mm)
1	2010	272	2010	201	2010	448
2	2004	183	2000	130	1987	282
3	2000	174	2002	130	2004	277
4	1987	155	1996	126	2000	239
5	1996	137	2004	125	1996	237
6	2002	135	1985	117	2007	223
7	2001	131	2001	110	1983	201
8	1985	115	1978	103	2001	198
9	1999	111	1998	97.1	1999	173
10	1978	107	1973	92.0	1995	170

Fuente: Georgakakos, et. al. 2011 y sección de Recursos Hídricos.

5.7.3 Análisis de frecuencias de la precipitación en el mes de diciembre en la CHCP.

Los registros de precipitación mensual para los meses de diciembre del período 1970 a 2010 de 37 estaciones fueron analizados para determinar su homogeneidad. No todas las estaciones tenían sus datos completos, ya sea porque aún no habían sido instaladas o por mal funcionamiento del pluviómetro. Algunos pocos datos pudieron ser corregidos verificando la información diaria.

En un principio los datos faltantes fueron estimados por correlación. Para esto fue considerada la estación más cercana y que tuviera su pluviómetro expuesto a condiciones similares al pluviómetro de los datos faltantes. Se observó mediante este proceso valores de correlación dentro del rango de bueno a excelente.

Una vez estimados los datos faltantes por correlación, se procedió a verificar la consistencia de todos los datos de precipitación utilizando el método de las dobles acumuladas comparando los datos de la estación en estudio con otra estación o grupo de estaciones que se tomaron como patrón. Durante los análisis se determinaron seis zonas dentro de la cuenca del Canal en donde el comportamiento de los datos de las estaciones pluviográficas pertenecientes a cada zona era muy similar y por ende presentaron buenos coeficientes de determinación (R^2).

Diciembre se caracteriza por ser un mes de transición de la temporada lluviosa a la seca, resultado del alejamiento del país de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ). Históricamente, durante este mes, los mayores aportes de precipitación se dan con la llegada de los empujes fríos del hemisferio norte que interactúan con la ITCZ. La tormenta “La Purísima 2010” ocurrió por la interacción entre un sistema de baja presión y un sistema frontal. Las precipitaciones durante “La Purísima 2010” y días posteriores del 25 al 28 del mes de diciembre

fueron de tal magnitud, que este mes presentó registros de precipitación que prácticamente quintuplicó el promedio histórico de los meses de diciembre para el período 1970-2009 y estuvo por encima del 60% del mayor registro que se tenía hasta entonces y que pertenecía a diciembre de 1999. Al igual que en los casos anteriores, se aplicó la función de distribución de probabilidad General de Valores Extremos (FDP GVE), a la serie de precipitación promedio del mes de diciembre en la CHCP, correspondiente al período 1970-2010. El análisis de frecuencia para la precipitación del mes de diciembre de 2010, que fue de 1047 mm para la CHCP, también resultó con un período de retorno del orden de 110 años.

6 HIDROLOGÍA

6.1 Caudales

Los principales ríos de la CHCP (Chagres, Pequení, Boquerón, Gatún, Cirí Grande y Trinidad), durante los primeros meses de 2010, venían registrando caudales por debajo del promedio histórico producto de la prolongación de El Niño de finales de 2009, que se presentaba con característica moderada en la cuenca del Canal. Sin embargo, en la región suroeste de la cuenca ese período deficitario cambia bruscamente en noviembre de 2010 y para la región noreste (subcuenca del embalse Alajuela), en diciembre 2010, producto de las lluvias extraordinarias que se registraron durante esos dos últimos meses del año, superando los caudales históricos anuales registrados en todas las estaciones hidrométricas ubicadas en la CHCP, generando en un corto tiempo inundaciones y deslizamientos de tierra, principalmente en las cuencas altas de los ríos Chagres y Pequení.

6.1.1 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Chagres y Pequení hasta las estaciones hidrométricas.

La estación hidrométrica Chico está ubicada en el río Chagres a dos kilómetros aguas arriba de la comunidad Emberá Drua, en la provincia de Panamá, distrito de Panamá. Sus coordenadas geográficas son: 9° 15’ 49” de latitud norte y a 79° 30’ 35” de longitud oeste. El área de drenaje hasta la estación es de 407 km^2. Dispone de información de niveles y caudales desde marzo de 1933. Cuenta con un registrador de niveles de burbuja WaterLog, un radar sónico, almacenador de datos y transmisión por telemetría de información de niveles cada 15 minutos.

La estación hidrométrica Candelaria se encuentra a 600 metros aguas arriba de la confluencia del río Pequení con la quebrada Candelaria, en la provincia de Panamá, distrito de Panamá, cerca del poblado de San Juan de Pequení rural, frente a la escuela San Juan de Pequení Indígena. Sus coordenadas geográficas son: 9° 22’ 58” de latitud norte y a 79° 30’ 59” de longitud oeste. El área de drenaje hasta la estación es de 145 km^2. Dispone de información de niveles y caudales desde septiembre de 1933. Cuenta con registrador de niveles de boyas, almacenador de datos y transmisión por telemetría de información de niveles cada 15 minutos.

En la figura 48 se muestran las subcuencas de los ríos Chagres hasta la estación Chico y Pequení hasta la estación Candelaria, con la ubicación de las estaciones de precipitación disponibles dentro y en los alrededores de estas, con sus correspondientes datos de precipitación

acumulada del 7 al 9 de diciembre de 2010, en milímetros (valor superior en la fracción en el círculo), y de diciembre de 2010, seguido por el promedio histórico de diciembre de cada estación (valor inferior de la fracción en el círculo). A aquellas estaciones con menos de 10 años no se les calculó el promedio histórico del mes de diciembre.

En la parte alta de estas dos subcuencas se registraron las máximas precipitaciones durante los tres días, específicamente en las estaciones Esperanza, Dos Bocas y Chagrecito, con 1089 mm, 882 mm y 872 mm, respectivamente. En la estación Esperanza, la precipitación del mes de diciembre de 2010 fue 2796 mm, cinco veces el promedio histórico de diciembre en esa estación. En el resto de las estaciones la relación (P dic-2010/P dic histórico) varió entre 3 y 5 veces.

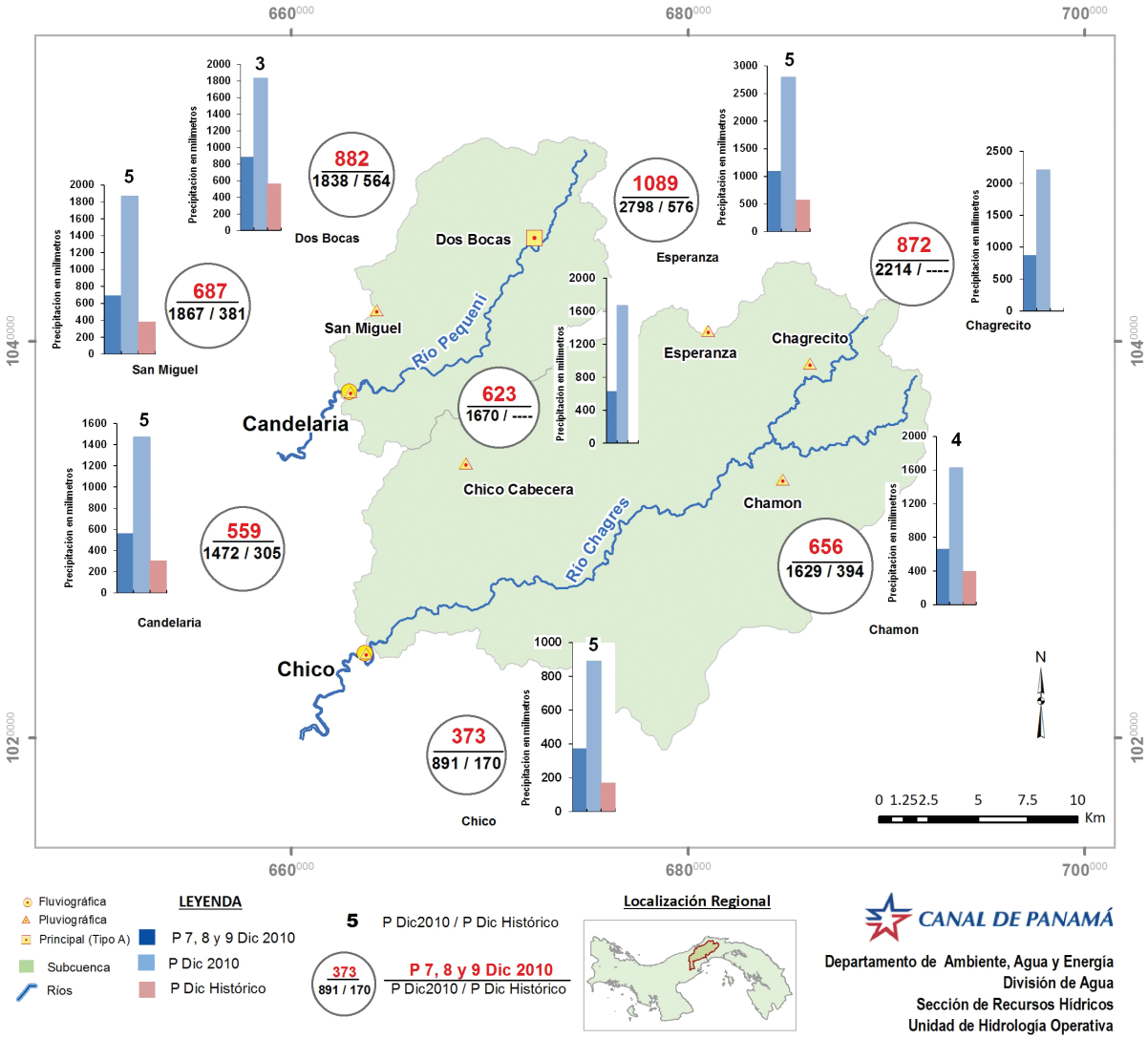


Figura 48 Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Chagres y Pequení con los valores de precipitación durante la tormenta.

En las figuras 49 y 50 se muestran las curvas masa de precipitación, desde el 7 de diciembre a las 00:00 h hasta el 9 de diciembre a las 24:00 h, de las estaciones ubicadas en las subcuencas de los ríos Chagres y Pequení, respectivamente. La curva masa de precipitación representa la lluvia acumulada *versus* el tiempo, que en este caso es de una hora, la pendiente de la tangente en cualquier punto de la curva representa la intensidad instantánea en ese tiempo. En las mismas figuras también se muestra, para el mismo período, la curva masa de precipitación promedio de cada subcuenca, estimada mediante Thiessen y ajustada por isoyetas y la máxima precipitación acumulada en 24 horas continuas con el período de ocurrencia.

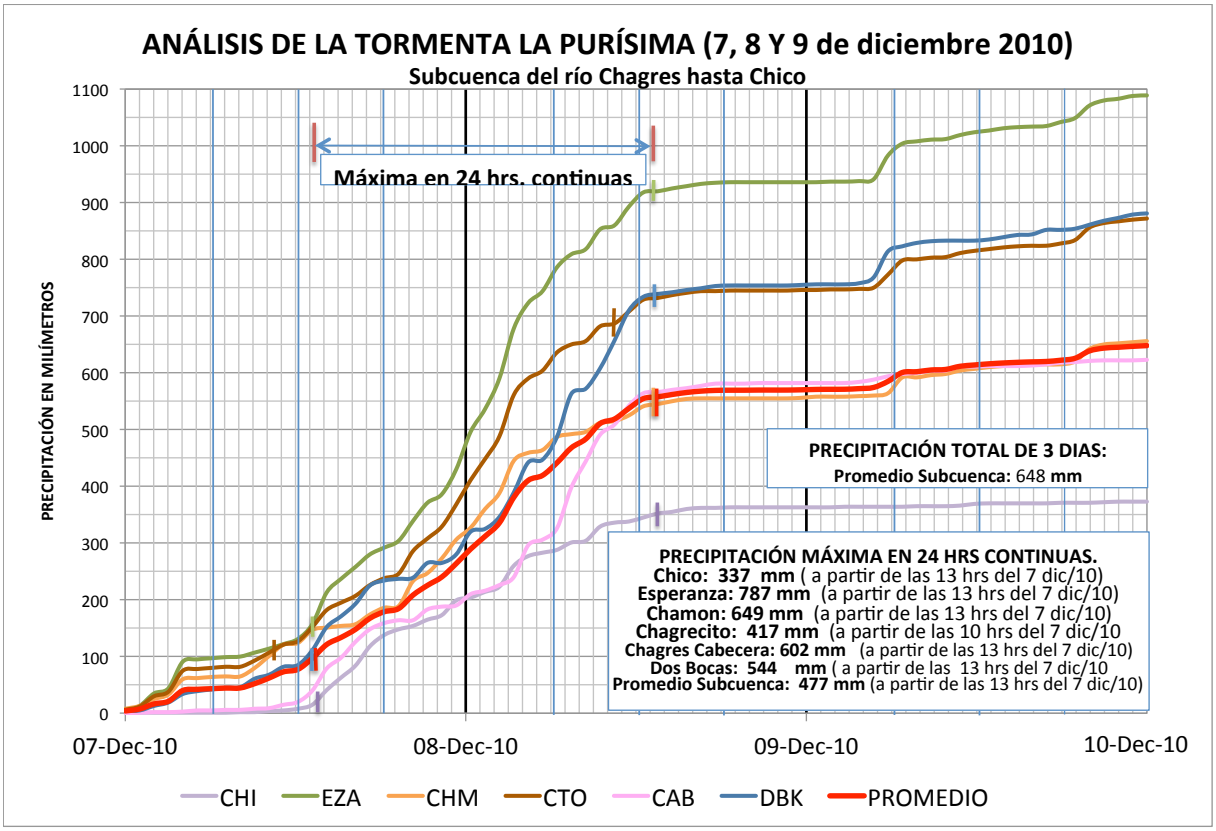


Figura 49 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Chagres hasta Chico.

La precipitación media durante los tres días en la subcuenca del río Chagres hasta la estación hidrométrica Chico, por el método de isoyetas es 648 mm y por el método de Thiessen es 701 mm, la diferencia es de 8%. En la subcuenca del río Pequení hasta la estación Candelaria ocurre lo contrario, el valor promedio de la subcuenca estimado por el método de isoyetas (821 mm) es superior al estimado por el método de Thiessen (773 mm), la diferencia es 6%. Se considera más confiable el valor obtenido por el método de isoyetas.

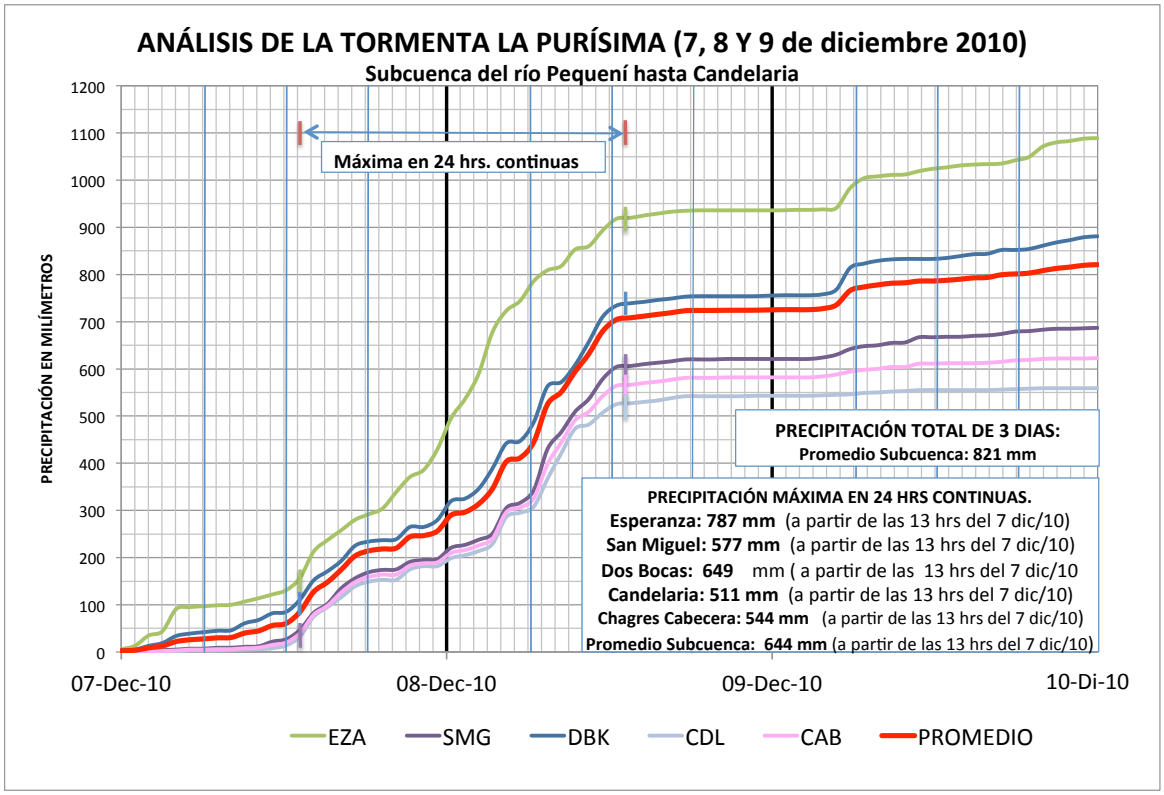


Figura 50 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Pequení hasta Candelaria.

La precipitación máxima en 24 horas dentro de la subcuenca del río Chagres hasta la estación hidrométrica Chico varía entre 387mm registrada en la estación Chico, y 788 mm en la Esperanza. La precipitación máxima en 24 horas promedio en la subcuenca fue de 477 mm a partir de las 13 horas del 7 de diciembre de 2010. En la subcuenca del río Pequení, la mínima se registra en la estación Candelaria con 511 mm, y la máxima en la Esperanza con 787 mm. La precipitación máxima 24 horas promedio en la subcuenca fue de 644 mm.

Durante diciembre de 2010 en el río Chagres, en la estación Chico, se presentaron dos períodos de fuerte acumulación de lluvias: del 7 al 9 y del 26 al 28.

La elevación máxima ocurrida el 8 de diciembre fue de 96.21 m (315.65 pies, y una altura de aproximadamente 13 metros medidos desde su nivel base) y el 26 de diciembre, 89.62 m (294.02 pies), fueron los dos picos más altos registrados en la estación Chico durante el año 2010.

La elevación máxima de la crecida del 8 de diciembre de 2010 fue determinada mediante levantamiento topográfico, debido a que la crecida dejó fuera de servicio los equipos transmisores y registradores de datos. El registrador de niveles (WaterLog) se reinstaló el 16 de diciembre de 2010. Durante la falla del equipo, el hidrograma de la crecida de campo necesaria para reproducir el hidrograma de la crecida del 8 de diciembre de 2010, el 1 de febrero de 2011 se realizó una gira a la estación Chico en el río Chagres. En la figura 51 se muestra la foto con los colaboradores de la ACP y otros que asistieron a la gira a realizar las investigaciones.

Figura 51 Colaboradores de la ACP y terceros que asistieron a la gira de campo el 1 de febrero de 2011 a realizar las investigaciones necesarias para reproducir el hidrograma de la crecida del 8 de diciembre de 2010 en la estación Chico del río Chagres.

De la sección de Recursos Hídricos, de pie de izquierda a derecha: Edison Gómez, palanquero; José Asprilla, trabajador de mantenimiento; Eriberto Ramos, mecánico; Gerardo Leis, hidrólogo; Johnny Cuevas, hidrólogo; Alonso García, palanquero; Abelardo Bal, hidrólogo; Jorge Espinosa, gerente de la sección EAAR; lugareño; José Arrue de la Unidad de Seguridad e Higiene

Industrial; Tomás García, hidrólogo; Robert Stallard, Servicio Geológico de Estados Unidos; lugareño; lugareña; lugareño; Ajax Murillo, hidrólogo. De rodillas, de izquierda a derecha: Wellington Luck, asistente de trabajos de oficina; Wilfrido Prado, trabajador de mantenimiento y Manuel Peñalosa, palanquero.

En esta gira se obtuvo Información muy valiosa de parte de los moradores del poblado Emberá que se encuentra en las riberas del río Chagres a la altura de la cota de 260 pies PLD. Uno de los moradores informó con certeza que la crecida máxima en ese punto se dio entre las 0:500 y 06:00 horas del 8 de diciembre de 2010 y también se inspeccionó rastros de la crecida dejadas por sedimentos en las hojas de la vegetación, los cuales se marcaron para posteriormente determinar la elevación máxima alcanzada por el río Chagres en el sitio de la estación.

En la figura 52 se muestra el hidrograma de caudales horario del río Chagres en la estación Chico, del 7 al 9 de diciembre de 2010 y el histograma de precipitación horaria media de la subcuenca. Según los moradores del área y la salida del modelo hidrológico, el caudal máximo instantáneo ocurrió a las 06:00 horas del 8 de diciembre y fue aproximadamente 3531 m^3/s (124670 pie^3/s), la intensidad máxima de lluvia promedio en la subcuenca fue de 49 mm/h y se presentó entre las 03:00 y 04:00 horas del 8 de diciembre.

El hidrograma de la crecida del 8 de diciembre de 2010, en la estación Chico en el río Chagres, también se reconstruyó con el modelo HEC-RAS con el fin de corroborar, con otra metodología, el hidrograma obtenido con el modelo Sacramento, ambos resultados fueron similares.

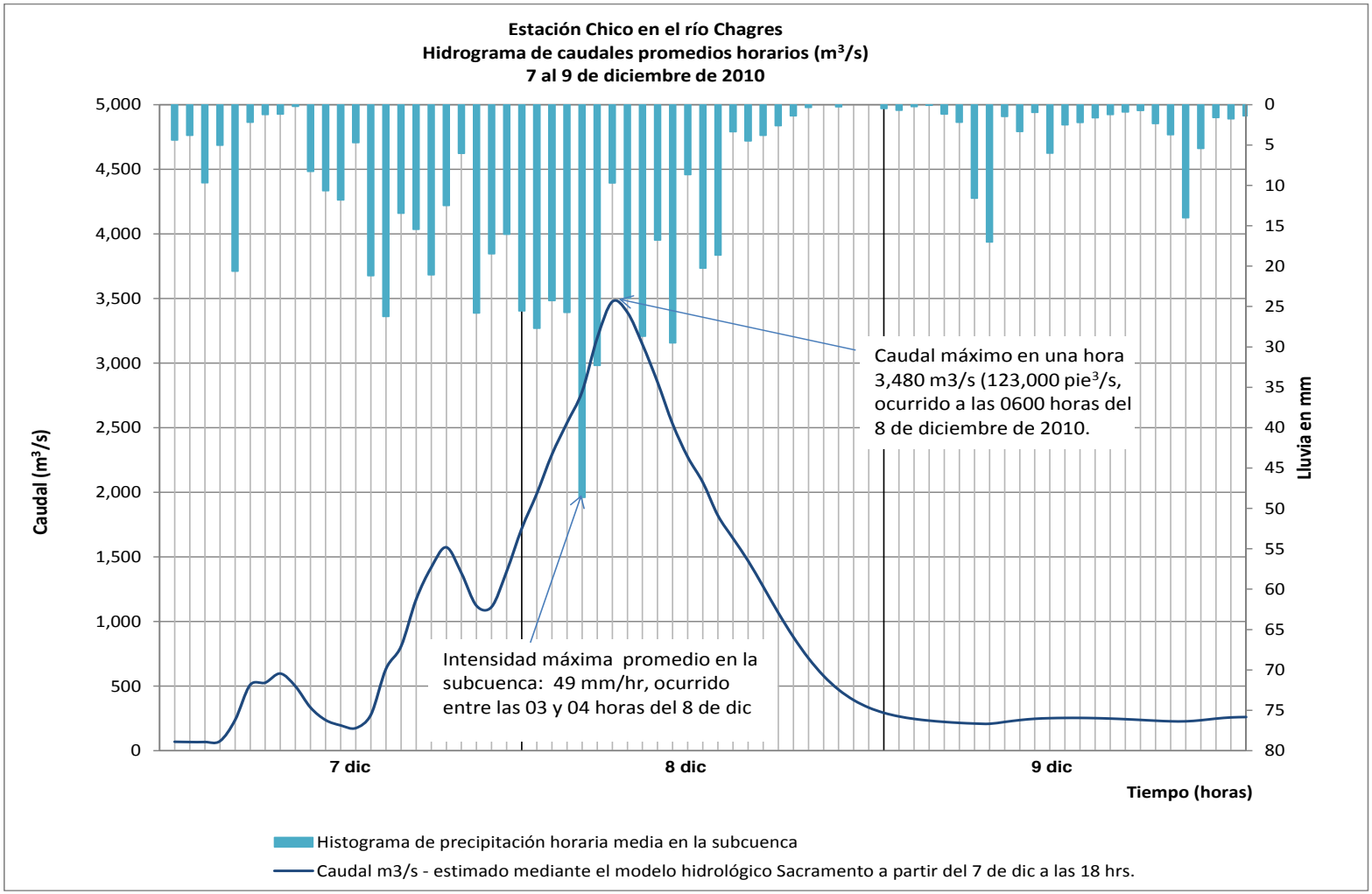


Figura 52 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de diciembre de 2010. Río Chagres hasta Chico. El hidrograma fue reconstruido con el modelo Sacramento.

En la estación Candelaria, el nivel máximo instantáneo alcanzado por el río fue de 90.32 metros (296.34 pies), le corresponde un caudal máximo instantáneo de 1620 m^3/s, registrado a las 08:00 horas del 8 de diciembre. La intensidad de lluvia máxima promedio en la subcuenca fue de 75 mm/h y se dio entre las 07:00 y 08:00 horas del 8 de diciembre, ver figura 53.

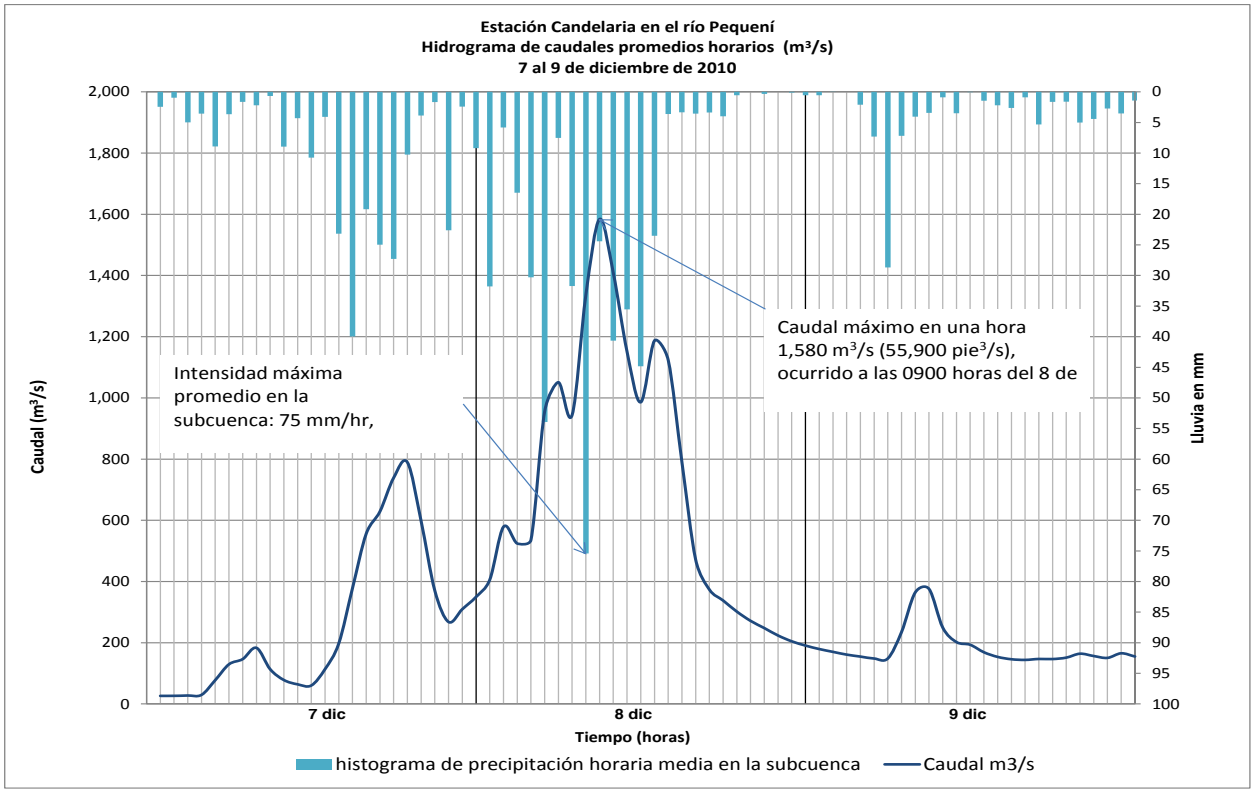


Figura 53 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de diciembre de 2010. Río Pequení hasta Candelaria.

6.1.2 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún hasta las estaciones hidrométricas.

La estación hidrométrica Peluca está ubicada en el río Boquerón a 400 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Peluca, en la provincia de Colón, distrito de Colón, en el poblado de Boquerón arriba, frente a la escuela del mismo nombre. Sus coordenadas geográficas son: 9° 22' 48" de latitud norte y a 79° 33' 40" de longitud oeste. El área de drenaje hasta la estación es de 90.6 km^2. Dispone de información de niveles y caudales desde septiembre de 1933. Cuenta con un registrador de niveles de boya, almacenador de datos y transmite por telemetría información de niveles cada 15 minutos.

La estación hidrométrica Ciento se encuentra ubicada en el río Gatún a 6.4 kilómetros aguas arriba del puente de la carretera Transístmica, en la provincia de Colón, distrito de Colón. Sus coordenadas geográficas son: 9° 17' 52" de latitud norte y a 79° 43' 41" de longitud oeste.

La superficie de drenaje hasta la estación es de 119 km^2. Dispone de información de niveles y caudales desde abril de 1943. Cuenta con un registrador de niveles WaterLog, almacenador de datos y transmite por telemetría información de niveles cada 15 minutos.

En la figura 54 se muestra la ubicación de las estaciones de lluvia dentro y en los alrededores de las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún, con los datos básicos de la tormenta. Se observa que en la subcuenca del río Boquerón, la estación Dos Bocas es la de mayor registro de lluvia durante los tres días de la tormenta, con 882 mm; le sigue San Miguel, con 687 mm. En la subcuenca del río Gatún, Escandalosa fue la que registró el mayor acumulado en los tres días, 599 mm, le sigue Aguas Claras con 588 mm. Los menores acumulados en los tres días se registraron en las estaciones ubicadas a la salida y parte baja de la subcuenca.

En las figuras 55 y 56 se muestra las curvas masa de precipitación, desde el 7 de diciembre a las 00:00 horas hasta el 9 de diciembre a las 24 horas, de las estaciones ubicadas en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún, respectivamente. La precipitación media en la subcuenca del río Boquerón hasta la estación hidrométrica Peluca, del 7 al 9 de diciembre de 2010, según el método de isoyetas, es 678 mm, y en la subcuenca del río Gatún hasta la estación Ciento, es 491 mm. De igual manera, la precipitación máxima en 24 horas continuas promedio en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún es de 572 mm y 392 mm, a partir de las 13 y 12 horas del 7 de diciembre de 2010, respectivamente.

En la figura 57 se muestra el hidrograma de caudales horario registrado en la estación Peluca en el río Boquerón, del 7 al 9 de diciembre de 2010 y el histograma de precipitación horaria media de la subcuenca. Según los registros de niveles cada 15 minutos en la estación, la elevación máxima alcanzada por el río durante la tormenta fue de 89.91 metros (294.97 pies), al cual le corresponde un caudal máximo instantáneo de 1100 m^3/s (38845 pie^3/s) ocurrido a las 11 horas del 8 de diciembre. La intensidad máxima de lluvia promedio en la subcuenca fue de 77 mm/h y se presentó entre las 07 y 08 horas del 8 de diciembre.

De la misma forma, en la figura 58 se muestra el hidrograma de caudales horarios y el histograma de precipitación horaria media de la subcuenca del río Gatún hasta la estación Ciento, el nivel máximo instantáneo alcanzado por el río fue de 39.33 metros (129.02 pies), le corresponde un caudal máximo instantáneo de 530 m^3/s (18701 pie^3/s), registrado a las 11:00 horas del 8 de diciembre. La intensidad de lluvia máxima promedio en la subcuenca fue de 44.3 mm/h y se dio entre las 07:00 y 08:00 h del 8 de diciembre.

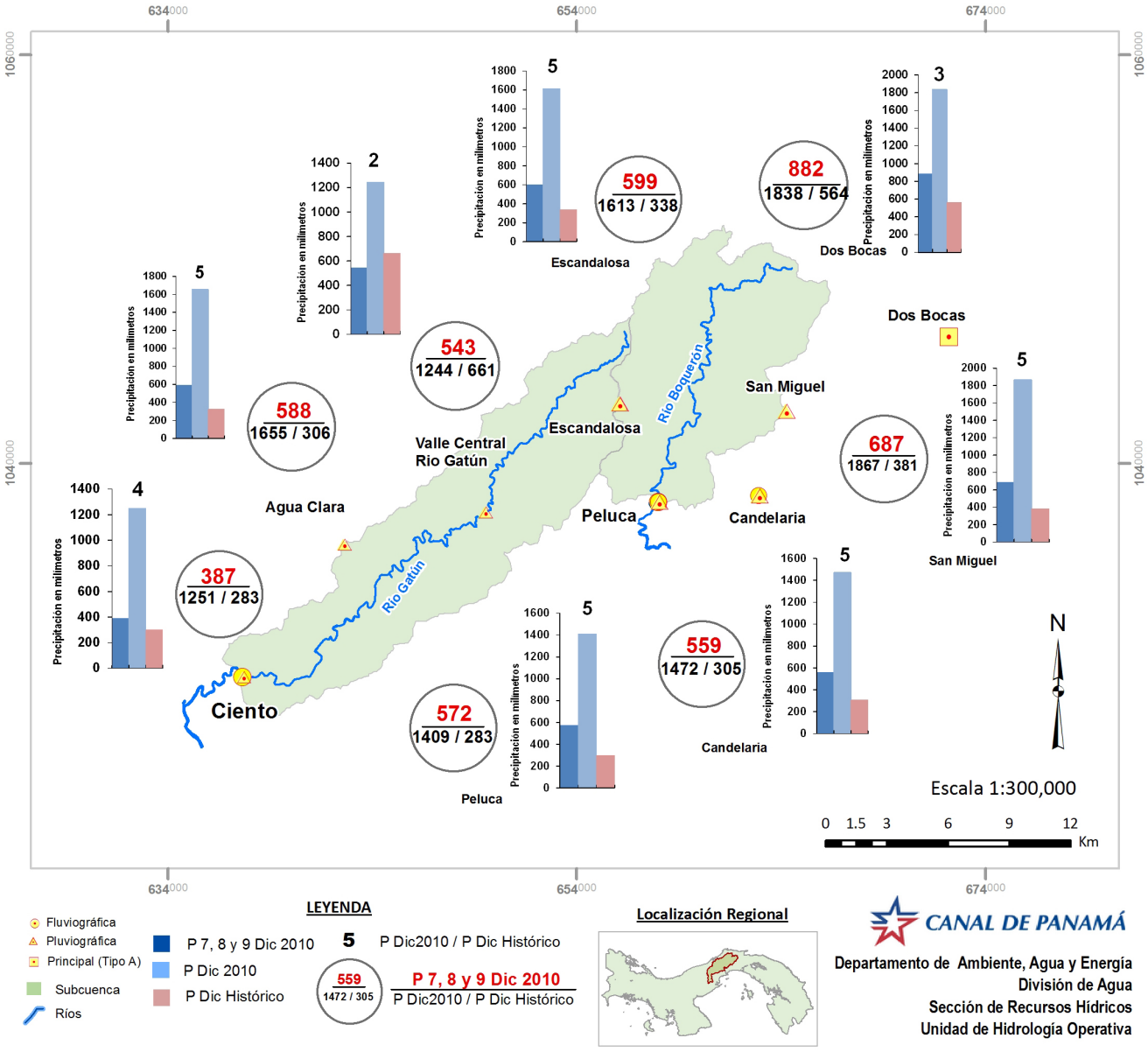


Figura 54 Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Boquerón y Gatún con los valores de precipitación durante la tormenta.

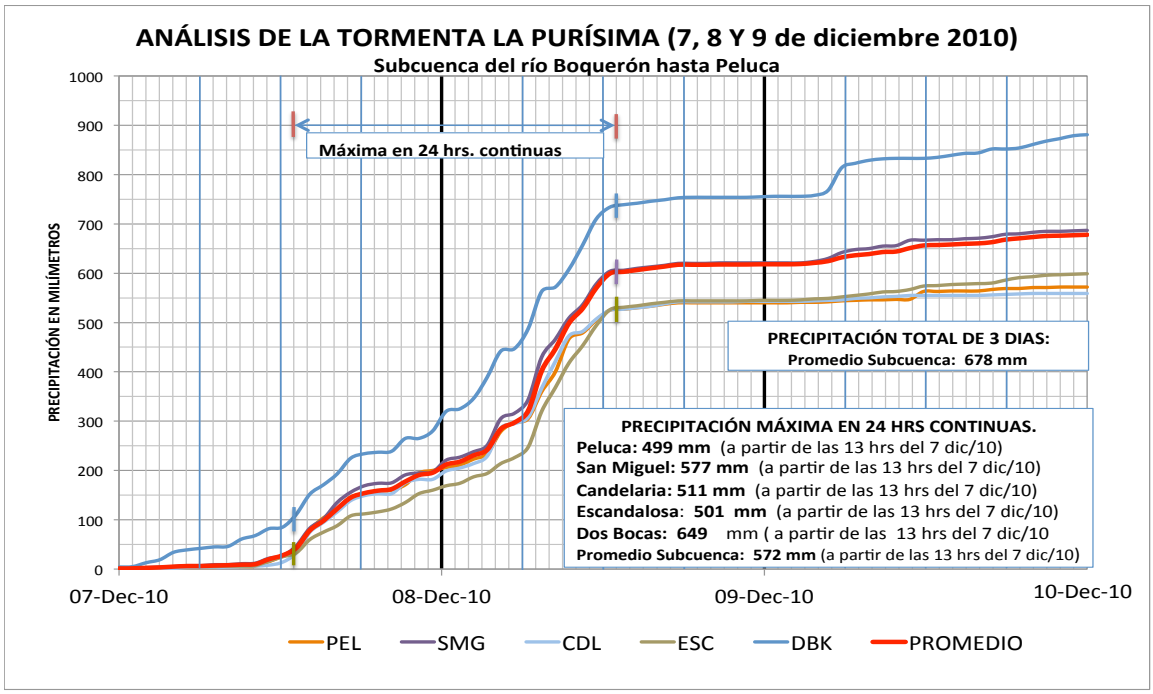


Figura 55 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Boquerón hasta Peluca.

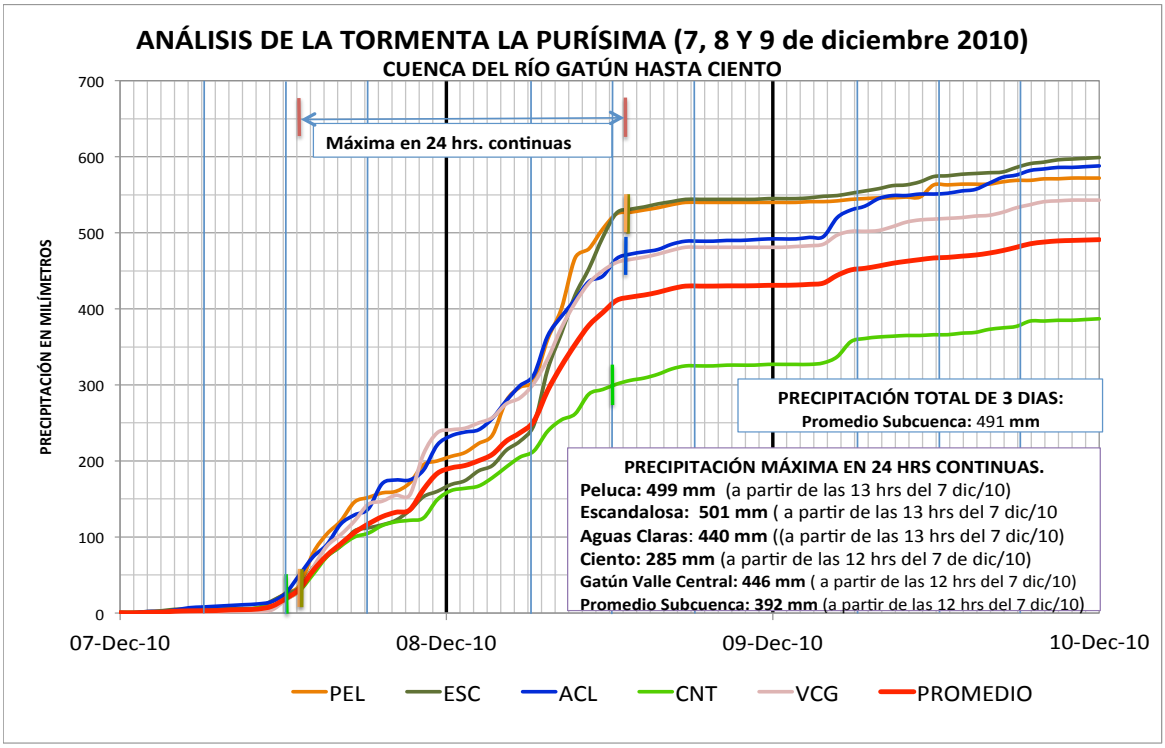


Figura 56 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Gatún hasta Ciento.

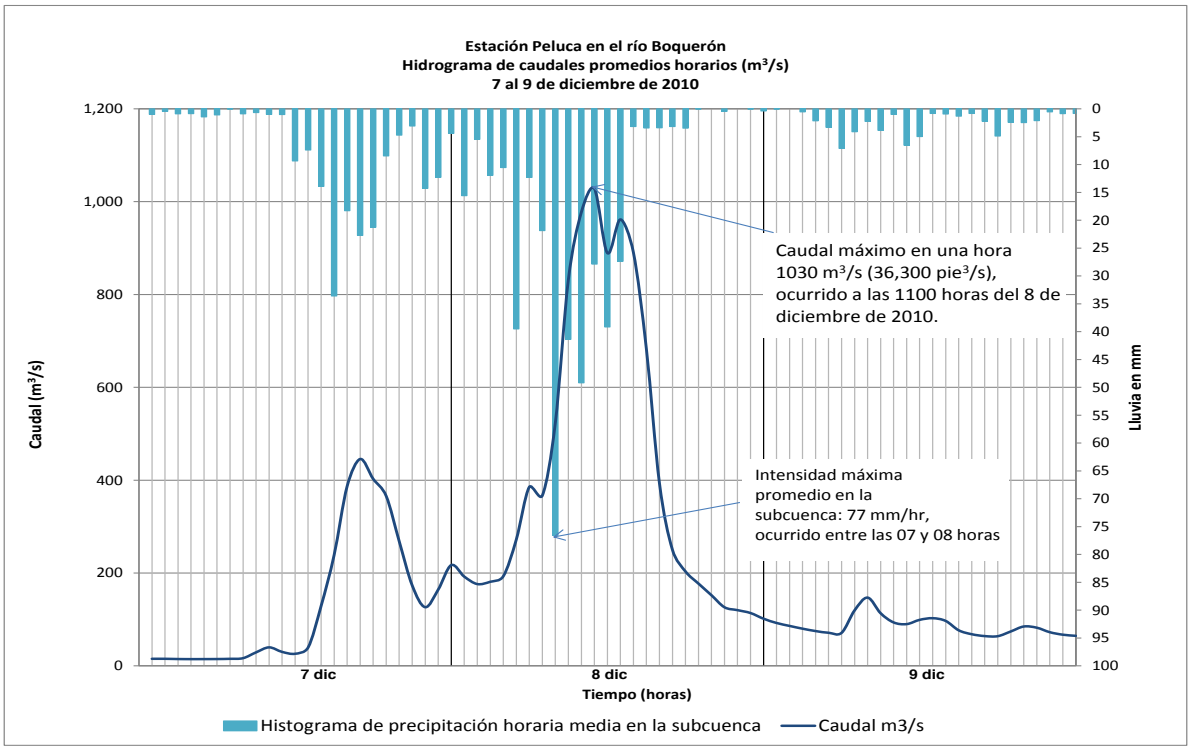


Figura 57 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Boquerón hasta Peluca.

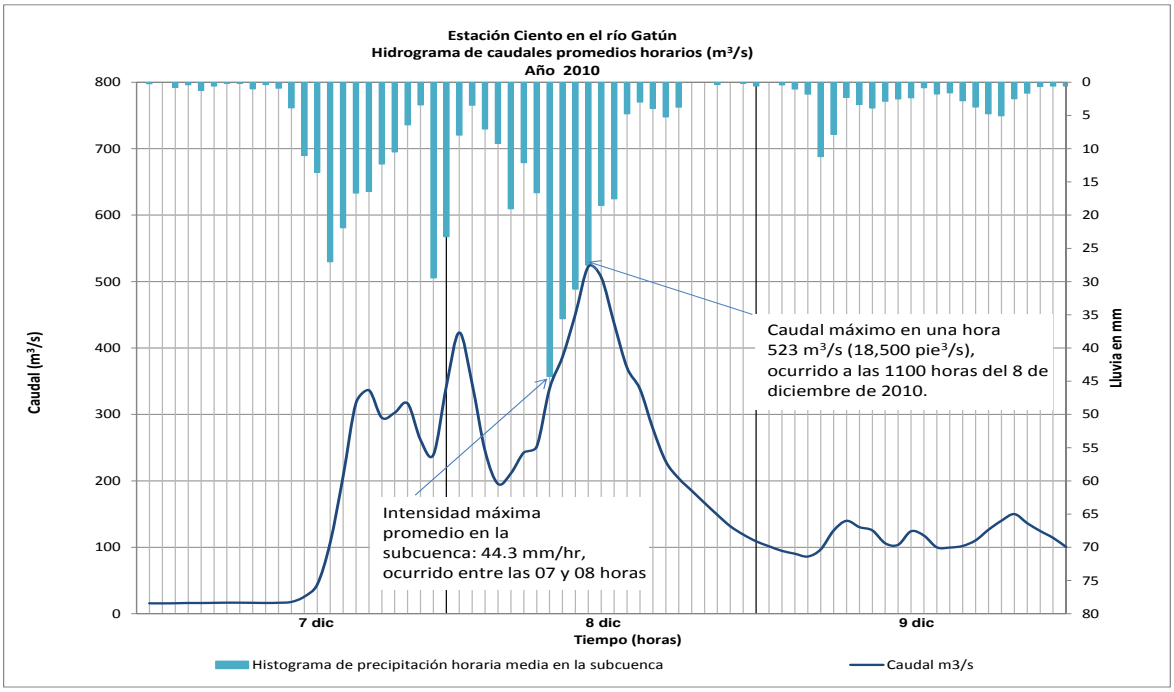


Figura 58 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Gatún hasta Ciento.

Los caudales máximos instantáneos registrados en las estaciones hidrométricas de la CHCP producto de la tormenta "La Purísima 2010" fueron comparados con los máximos de las inundaciones del huracán Mitch en Centroamérica y con la envolvente mundial de crecidas (ver Figura 59). Se observa que están dentro de la envolvente centroamericana y tienen el mismo orden de magnitud de algunos máximos registrados en Honduras durante el huracán Mitch.

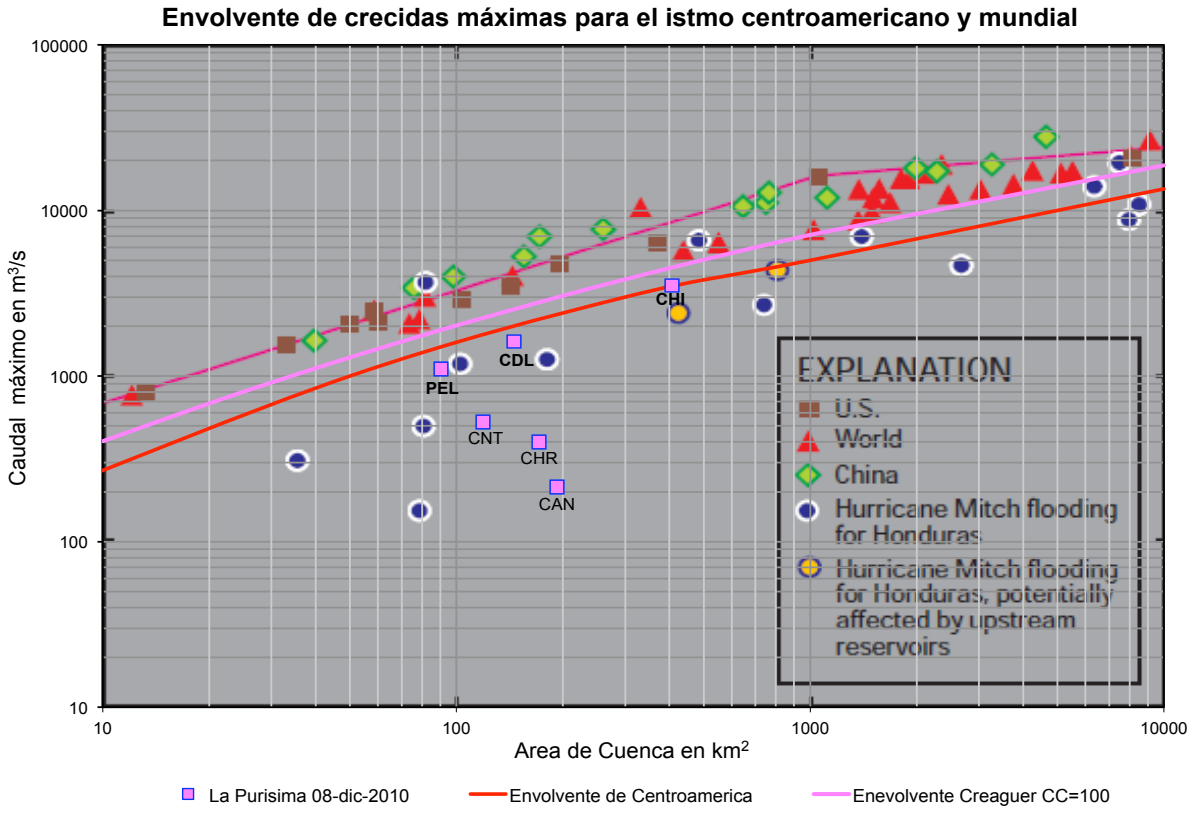


Figura 59 Envolvente de crecidas máximas para el istmo centroamericano y mundial. Fuente: U.S. Geological Survey, U.S. Dept. of the Interior, Mark E. Smith, Jeffrey V. Phillips and Norman E. Spahr, Hurricane Mitch: Peak Discharge for Selected River in Honduras, 2002.

6.1.3 Análisis de los caudales en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande hasta las estaciones hidrométricas.

La estación hidrométrica El Chorro está ubicada en el río Trinidad a 1.2 kilómetro aguas arriba del puerto de Trinidad, cerca del poblado Los Chorros de Trinidad en el distrito de Capira, provincia de Panamá. Sus coordenadas geográficas son: 8° 58' 32" de latitud norte y a 79° 59' 25" de longitud oeste. El área de drenaje hasta la estación es de 171 km^2. Dispone de información de niveles y caudales desde septiembre de 1947. Cuenta con un registrador de

niveles de boya, almacenador de datos y transmite por telemetría información de niveles cada 15 minutos.

La estación hidrométrica Los Cañones se encuentra ubicada en el río Cirí Grande a 3.2 kilómetros aguas arriba del poblado Los Chorros de Cirí, en el distrito de Capira, provincia de Panamá. Sus coordenadas geográficas son: 8° 56' 56" de latitud norte y a 80° 03' 45" de longitud oeste. El área de drenaje hasta la estación es de 192 km^2.

Dispone de información de niveles y caudales desde septiembre de 1947. Cuenta con un registrador de niveles de boya, almacenador de datos y transmite por telemetría información de niveles cada 15 minutos.

En la figura 60 se muestra la ubicación de las estaciones de lluvia dentro y en los alrededores de las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande, con los datos básicos de la tormenta. Se observa que a pesar de que las precipitaciones durante la tormenta fueron menores que las que se registraron al noreste de la CHCP, la lluvia de diciembre de 2010 registrada en las estaciones fue de 3 a 5 veces el promedio histórico de diciembre.

En las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande, la estación Cañones es la de mayor registro de lluvia durante los tres días de la tormenta, con 347 mm, le sigue Chorro, con 297 mm. Los menores acumulados en los tres días se registraron en las estaciones ubicadas en la parte media y alta de la subcuenca, con 234 mm en Gasparillal y 162 mm en Jagua.

En las figuras 61 y 62 se muestran las curvas masa de precipitación, desde el 7 de diciembre a las 00 horas hasta el 9 de diciembre a las 24 horas, de las estaciones ubicadas en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande, respectivamente. La precipitación media en la subcuenca del río Trinidad hasta la estación hidrométrica El Chorro, del 7 al 9 de diciembre de 2010, según el método de isoyetas, es 186 mm, y en la subcuenca del río Cirí Grande hasta la estación Los Cañones, es 209 mm. De igual manera, la precipitación máxima en 24 horas continuas promedio en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande es de 100 mm y 111 mm, a partir de las 09:00 h del 7 de diciembre de 2010.

En la figura 63 se muestra el hidrograma de caudales horarios registrado en la estación El Chorro en el río Trinidad, del 7 al 9 de diciembre de 2010 y el histograma de precipitación horaria media de la subcuenca. Según los registros de niveles en la estación cada 15 minutos, la elevación máxima alcanzada por el río durante la tormenta fue de 32.43 metros (106.39 pies), al cual le corresponde un caudal máximo instantáneo de 174 m^3/s (6131 pie^3/s) ocurrido a las 15:00 h del 7 de diciembre. La intensidad máxima de lluvia promedio en la subcuenca fue de 16.6 mm/h y se presentó entre las 10:00 y 11:00 h del 7 de diciembre. Cabe señalar que el caudal máximo instantáneo en el año 2010 en la estación Trinidad El Chorro, no ocurrió durante la tormenta "La Purísima 2010", más bien se registró el 21 de noviembre de 2010, con un caudal pico de 402 m^3/s (14206 pie^3/s).

De la misma forma, en la figura 64 se muestra el hidrograma de caudales horarios y el histograma de precipitación horaria media de la subcuenca del río Cirí Grande hasta la estación

Los Cañones; el nivel máximo instantáneo alcanzado por el río fue de 106.29 metros (348.71 pies), le corresponde un caudal máximo instantáneo de 188 m^3/s, (6637 pie^3/s), registrado a las 19:00 h del 8 de diciembre. La intensidad de lluvia máxima promedio en la subcuenca fue de 16.6 mm/h y se dio entre las 10:00 y 11:00 h del 7 de diciembre.

Al igual que en la estación El Chorro, en la estación Los Cañones, la crecida máxima instantánea del año 2010 no se presentó durante los tres días de la tormenta, sino antes, el 22 de noviembre de 2010, con 214 m^3/s (7570 pie^3/s).

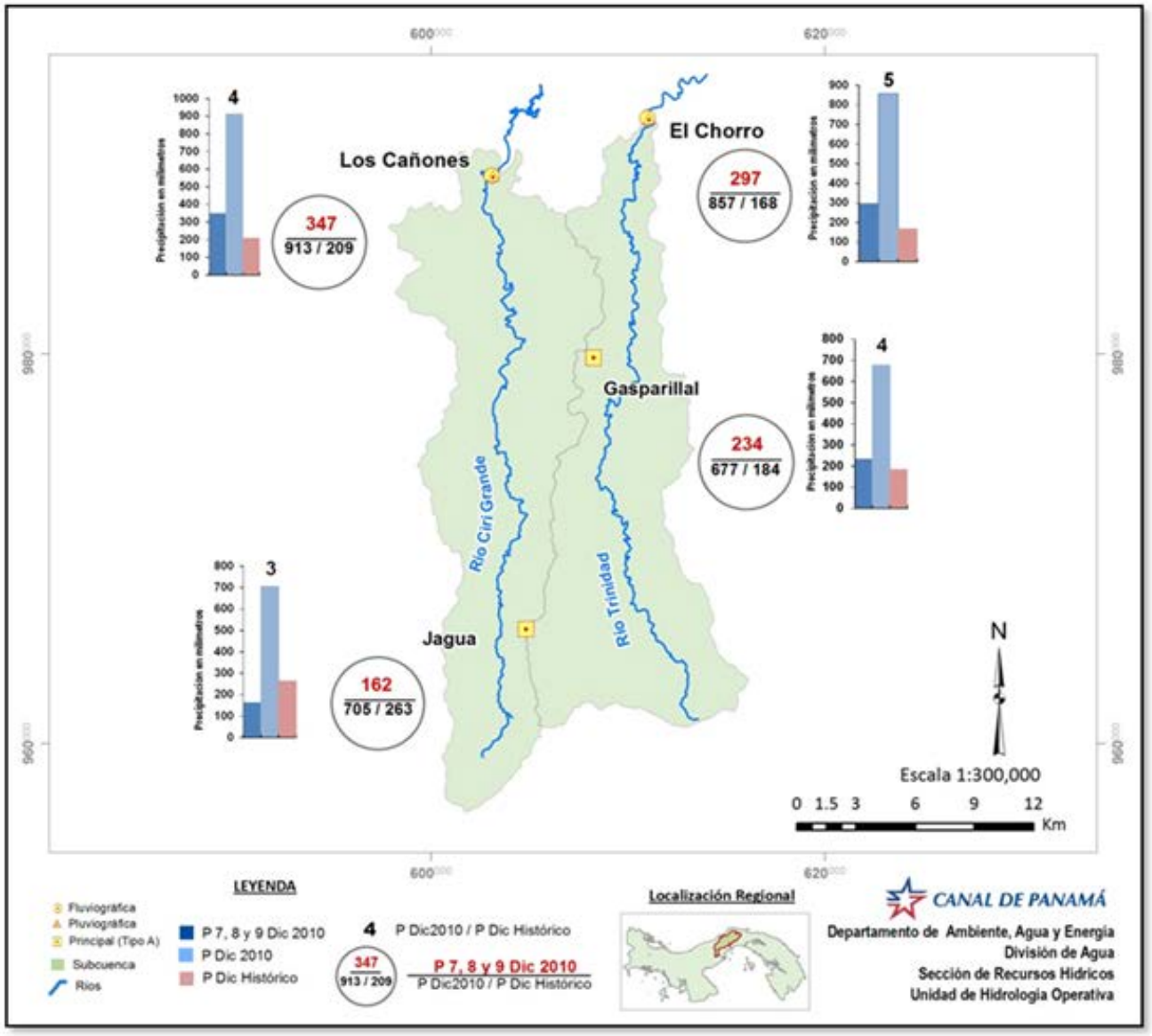


Figura 60 Ubicación de las estaciones de precipitación en las subcuencas de los ríos Trinidad y Cirí Grande con los valores de precipitación durante la tormenta.

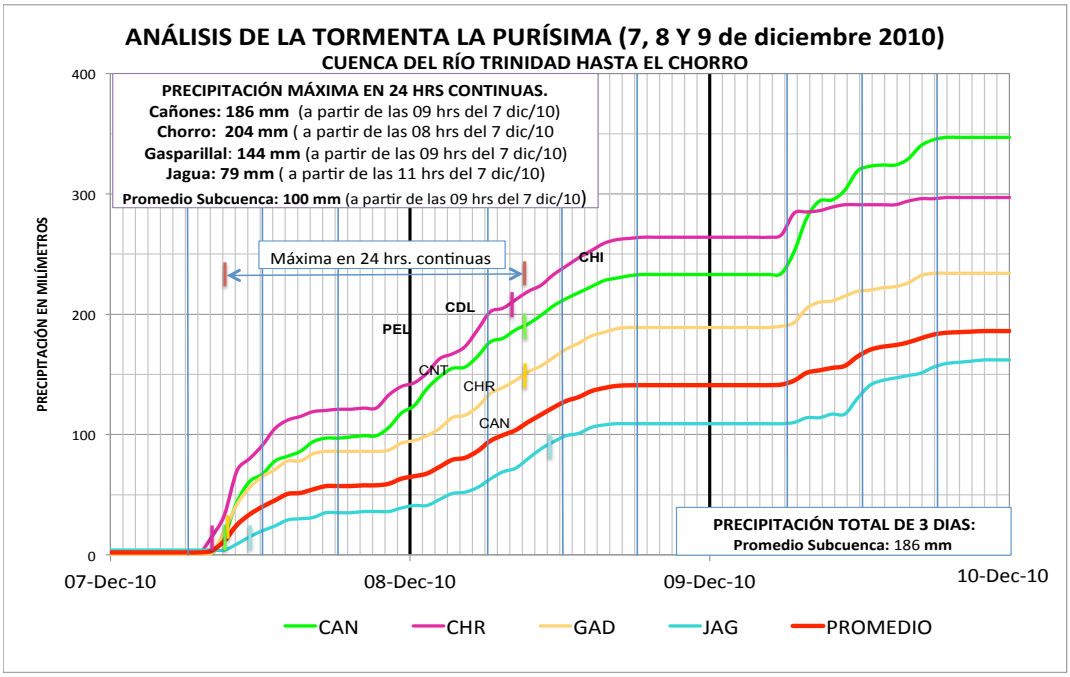


Figura 61 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Trinidad hasta El Chorro.

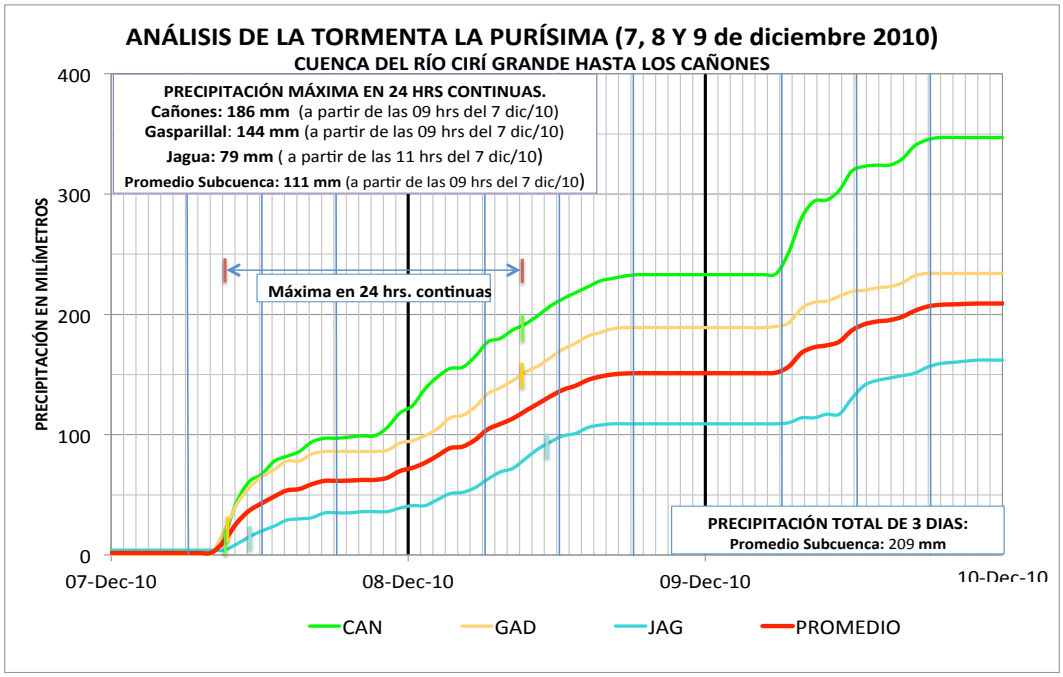


Figura 62 Curva masa de precipitación horaria de las estaciones ubicadas en la subcuenca del río Cirí Grande hasta Los Cañones.

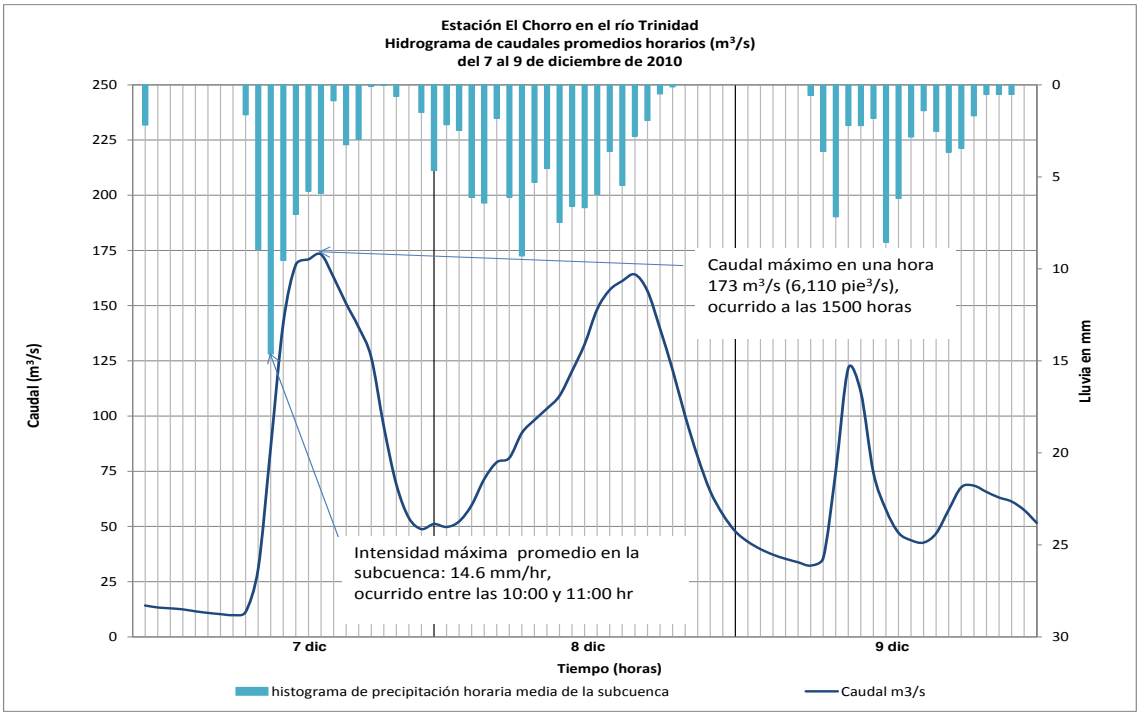


Figura 63 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Trinidad hasta El Chorro.

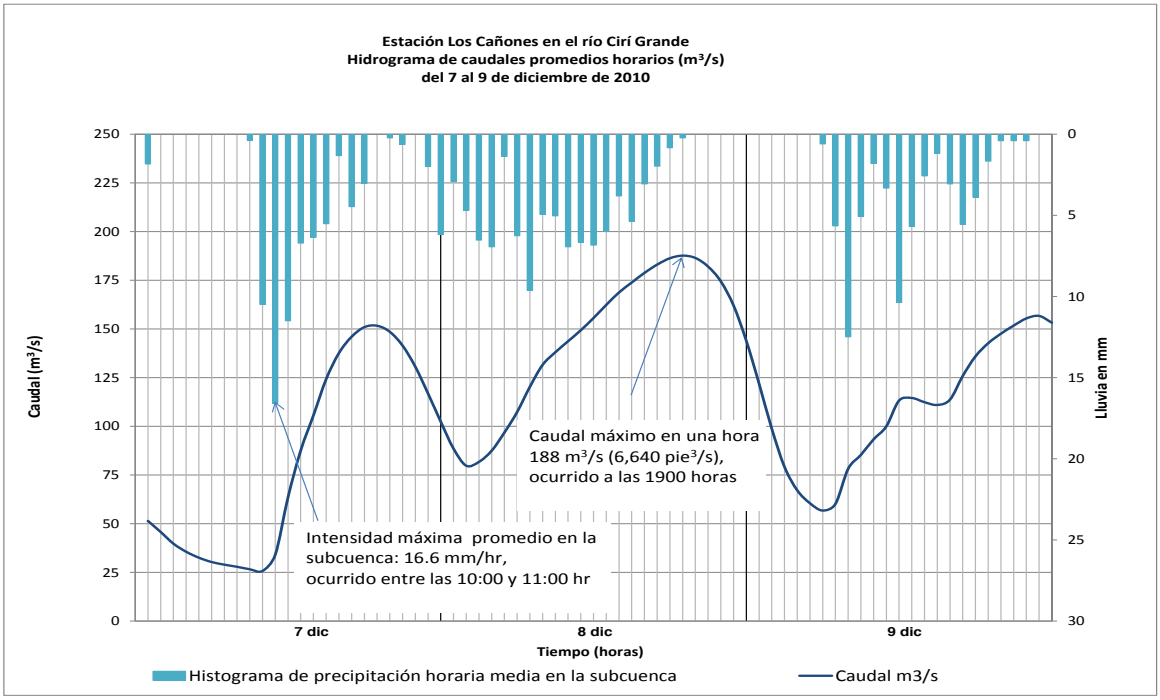


Figura 64 Histograma de precipitación e hidrograma de caudales promedios horario, del 7 al 9 de dic de 2010. Río Cirí Grande hasta Los Cañones.

6.1.4 Comportamiento del caudal de diciembre de 2010 con respecto al diciembre histórico

En el cuadro 10 y figura 65 se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas con los registros más largos dentro de la CHCP y sus correspondientes valores registrados en diciembre de 2010 *versus* el promedio histórico de ese mes, apreciamos que la variabilidad espacial mantiene el mismo comportamiento de la lluvia dentro de la cuenca durante la tormenta. Los ríos con mayores caudales unitarios están ubicados en el área noreste de la CHCP, es decir, en las cuencas de los ríos Chagres, Pequení, Boquerón y Gatún, en donde el caudal promedio de diciembre de 2010 superó aproximadamente cinco veces el promedio histórico de ese mes.

Cuadro 10 Comparación caudal de diciembre 2010 contra diciembre histórico.

Estaciones - Aportes directos al embalse Alhajuela	Registro desde	Área (km2)	Caudales mensuales		Relación Qdic2010/Área (m3/s/km2)	Relación Qdic2010/Qdic histórico
			dic histórico hasta 2009 (m3/s)	dic 2010 (m3/s)		
Chagres - Chico	1934	407	49.5	245	0.60	5
Pequení - Candelaria	1934	145	22.0	108	0.74	5
Boquerón - Peluca	1934	90.6	13.0	60.4	0.67	5
Estaciones - Aportes directos al embalse Gatún						
Gatún - Ciento	1943	119	11.2	55.4	0.47	5
Trinidad - El Chorro	1947	171	8.92	26.5	0.15	3
Cirí Grande - Los Cañones	1947	192	12.5	43.9	0.23	4

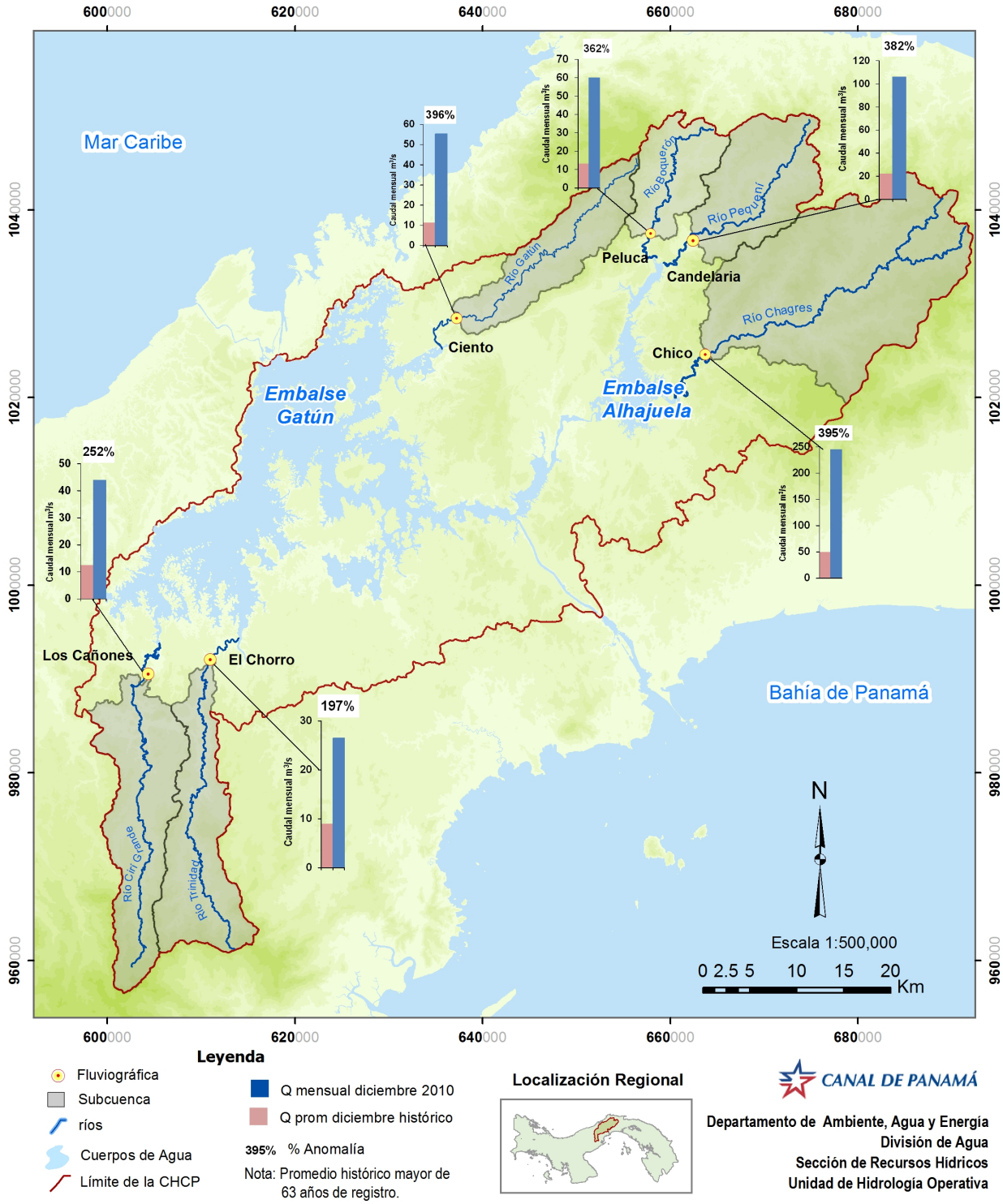


Figura 65 Comparación de los caudales registrados en las estaciones hidrométricas ubicadas en la CHCP en diciembre de 2010 con respecto al promedio histórico.

6.1.5 Análisis de frecuencia de caudales en la estación Chico producto de la tormenta "La Purísima 2010".

El objetivo del análisis de frecuencia de la tormenta "La Purísima 2010", es relacionar la magnitud de los caudales con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de la distribución de probabilidad que mejor se ajuste al evento. En este caso, para los datos de caudales y aportes máximos a los embalses se seleccionó la función de distribución de probabilidad Log-Pearson Tipo III (FDP LP-III).

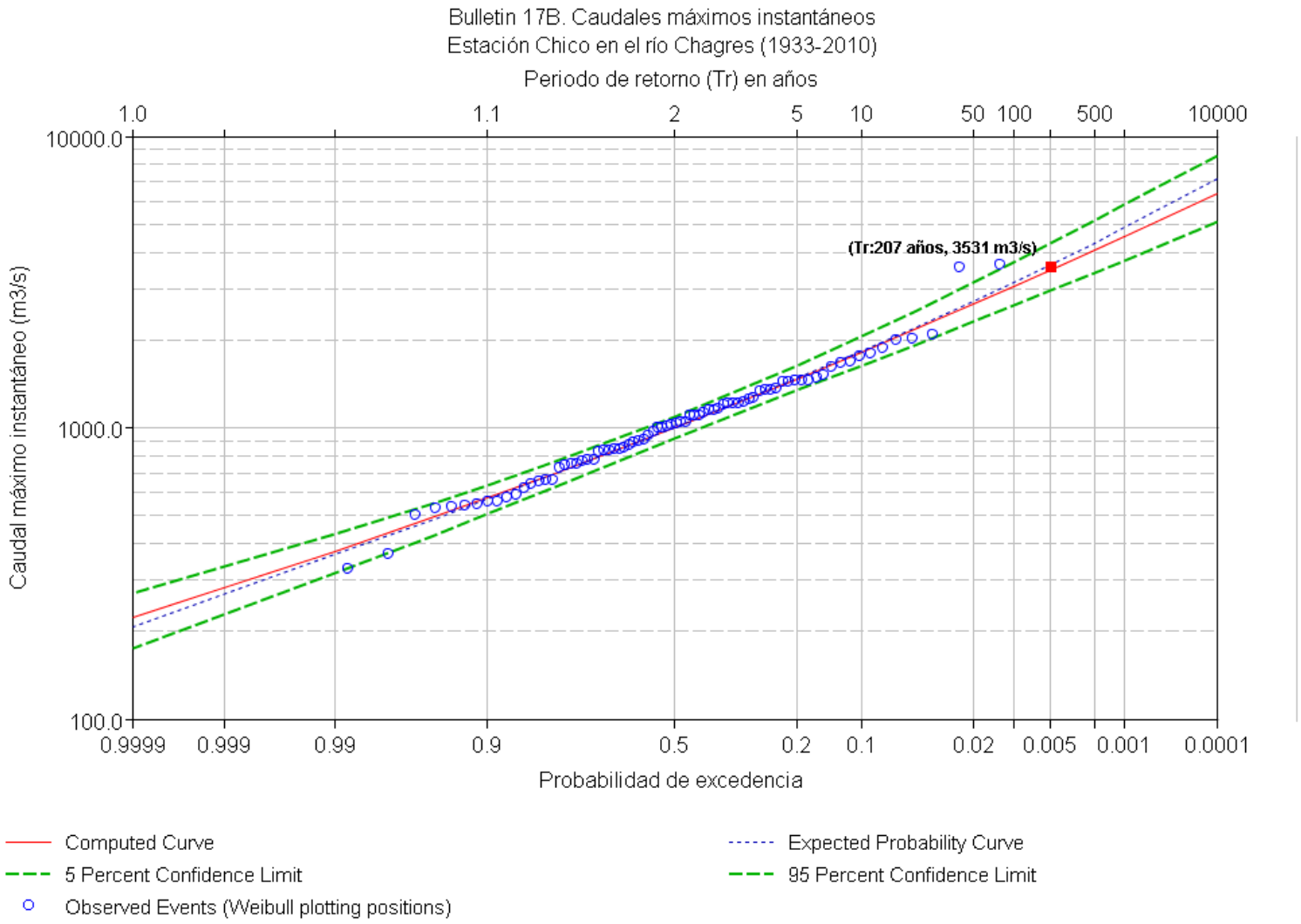
La metodología para estos análisis de frecuencias es similar a la utilizada para las precipitaciones máximas. El método para estimar los parámetros de ajuste fue el de momentos aplicado a los logaritmos (MML). Para evaluar la bondad de ajuste de los datos a la FDP LP-III se determinó el EEM expresado en porcentaje. Este parámetro varió entre 6.7 y 11.5% con respecto al valor promedio de las series de datos. En el cuadro 11 se presentan los resultados de los cuatro análisis de frecuencia realizados para la estación Chico.

Las gráficas de probabilidades se elaboraron con el programa HEC-SPP 2.0 para los valores máximos anuales de la serie de tiempo bajo estudio determinándose la curva de ajuste de los datos a la función de distribución LP-III.

6.1.5.1 Análisis de frecuencia de las crecidas máximas instantáneas en el río Chagres hasta la estación hidrométrica Chico. Período de análisis 1933-2010.

La estación Chico en el río Chagres fue escogida para este análisis por estar ubicada en la zona de mayor afectación por la tormenta "La Purísima 2010" y, además, por ser la estación hidrométrica con el más alto caudal promedio anual, el cual representa el 40% de los aportes totales al embalse Alajuela. Para el análisis de frecuencia de las crecidas máximas instantáneas se analizó el período desde el inicio de operaciones de la estación en 1933 hasta el año 2010 (78 años de registro). El pico de la crecida máxima instantánea fue de 3531 m^3/s, ocurrido a las 06:00 h del 8 de diciembre de 2010, el cual ocupa la posición número dos del registro y es superado solamente por la crecida de noviembre de 1966 que fue de 3606 m^3/s y con respecto al promedio de la serie de tiempo del período 1933-2009 es de 3.2 veces mayor.

El resultado del análisis según la FDP LP-III indica que la crecida máxima instantánea del 8 de diciembre de 2010 tiene un período de retorno de 207 años y la de noviembre de 1966, un período de retorno de 233 años. En la figura 66 se presenta la gráfica de probabilidad LP-III para los caudales máximos instantáneos analizados y en el cuadro 11 el resultado obtenido.



.

Figura 66. Análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos de la estación Chico (1972-2009).

Cuadro 11 Resultados del ajuste de la FDP LP III a caudales máximos de la estación Chico en el río Chagres (1933-2009).

Ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad Log Pearson Tipo III (LPIII) a caudales máximos instantaneos y promedios: diarios, dos y tres días consecutivos										
Periodo de análisis: 1933-2010										
Subcuenca	Duración	FDP	Método de Ajuste	Bondad de Ajuste		Parámetros estadisticos			Qmax 2010 (m^3/s)	Tr (años)
				R	EEM (%)	$\tilde{Y}$	Sy	gc		
Río Chagres en Chico	Instantaneo	LPIII	MML	0.9711	6.1	6.9186	0.4502	0.1978	3531	207
Río Chagres en Chico	Diario	LPIII	MML	0.9741	6.6	5.5533	0.6077	0.6104	1828	228
Río Chagres en Chico	Dos días	LPIII	MML	0.9843	6.0	5.2742	0.6107	0.4930	1242	195
Río Chagres en Chico	Tres días	LPIII	MML	0.9943	5.6	5.1047	0.5754	0.5653	908	137

6.1.5.2 Análisis de frecuencia de caudales promedios máximos en uno, dos y tres días en la estación río Chagres en Chico. Período de análisis 1933-2010.

A partir de los caudales promedios diarios del período 1933-2010 se realizó un análisis de frecuencia de los máximos anuales para uno, dos y tres días consecutivos. Se identificó que el 50% de los máximos caudales promedio diarios se han presentado en los meses de noviembre y diciembre. En los primeros 15 días del mes de enero se han registrado 5 casos. La mayor frecuencia de ocurrencia se registra los primeros 15 días del mes de diciembre con 20% de los casos (Cuadro 12). El caudal promedio diario del 8 de diciembre de 2010 es el más alto registrado y fue de 1828 m^3/s y representa 6 veces el valor promedio del período 1933-2009. Para dos días consecutivos el caudal promedio durante la tormenta "La Purísima 2010" fue de 1242 m^3/s y para tres días de 908 m^3/s y representan 5.5 y 4.8 veces el valor promedio del período 1933-2009, respectivamente. Estos valores son indicativos de lo importante que fueron los volúmenes de la crecida del 7 al 9 de diciembre de 2010 con respecto a lo histórico.

El resultado del análisis para el período 1933-2010, según la distribución de frecuencia Log-Pearson Tipo III, indica que el período de retorno para el caudal máximo promedio diario es de 228 años, para dos días consecutivos fue estimado en 195 años y para tres días consecutivos el período de retorno fue 137 años. En las figuras 67, 68 y 69 se presentan las gráficas de probabilidad LP III. Todos los resultados del análisis de frecuencias en la subcuenca del río Chagres muestran la severidad de la tormenta en esta área geográfica de la CHCP.

Cuadro 12 Frecuencias observadas de los caudales máximos promedio diarios por fecha de ocurrencia.

Caudales promedios diarios de la estación Chico en rio Chagres (1933-2010)			
Frecuencias			
Mes	Dia Juliano	Frecuencia	Frelativa (%)
Ene	31	5	6.4
Feb	59	1	1.3
Mar	90	1	1.3
Abr	120	5	6.4
May	151	10	12.8
Jun	181	3	3.8
Jul	212	6	7.7
Ago	243	5	6.4
Sep	273	0	0.0
Oct	304	3	3.8
01-Nov - 15-Nov	319	5	6.4
16-Nov - 30-Nov	334	10	12.8
01-Dic - 15-Dic	349	16	20.5
31-Dic	366	8	10.3
	Total	78	100 %
	Nov-Dic	39	50.0 %

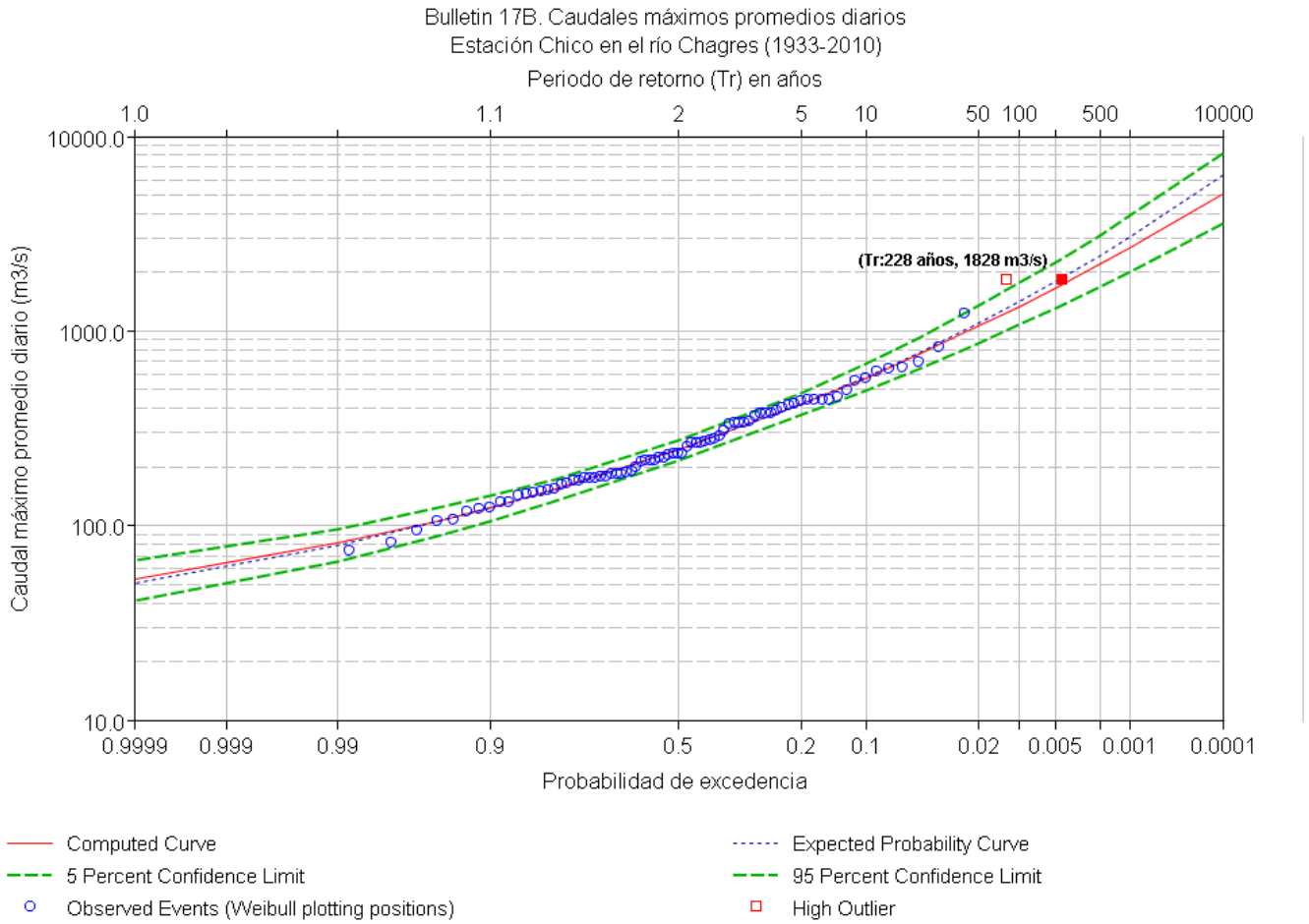


Figura 67. Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio diarios de la estación Chico (1933-2010).

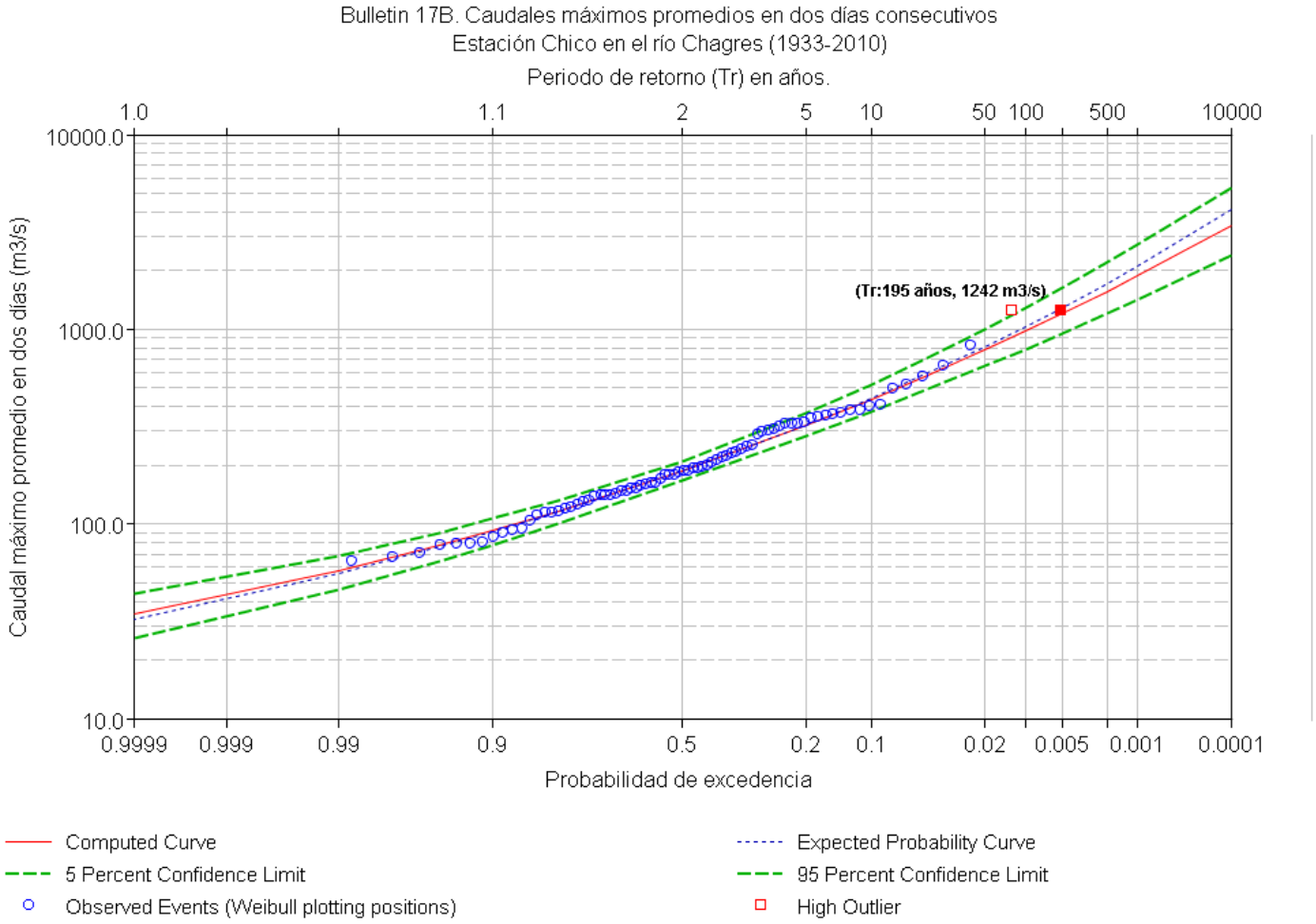


Figura 68. Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio en dos días consecutivos en la estación Chico (1933-2010).

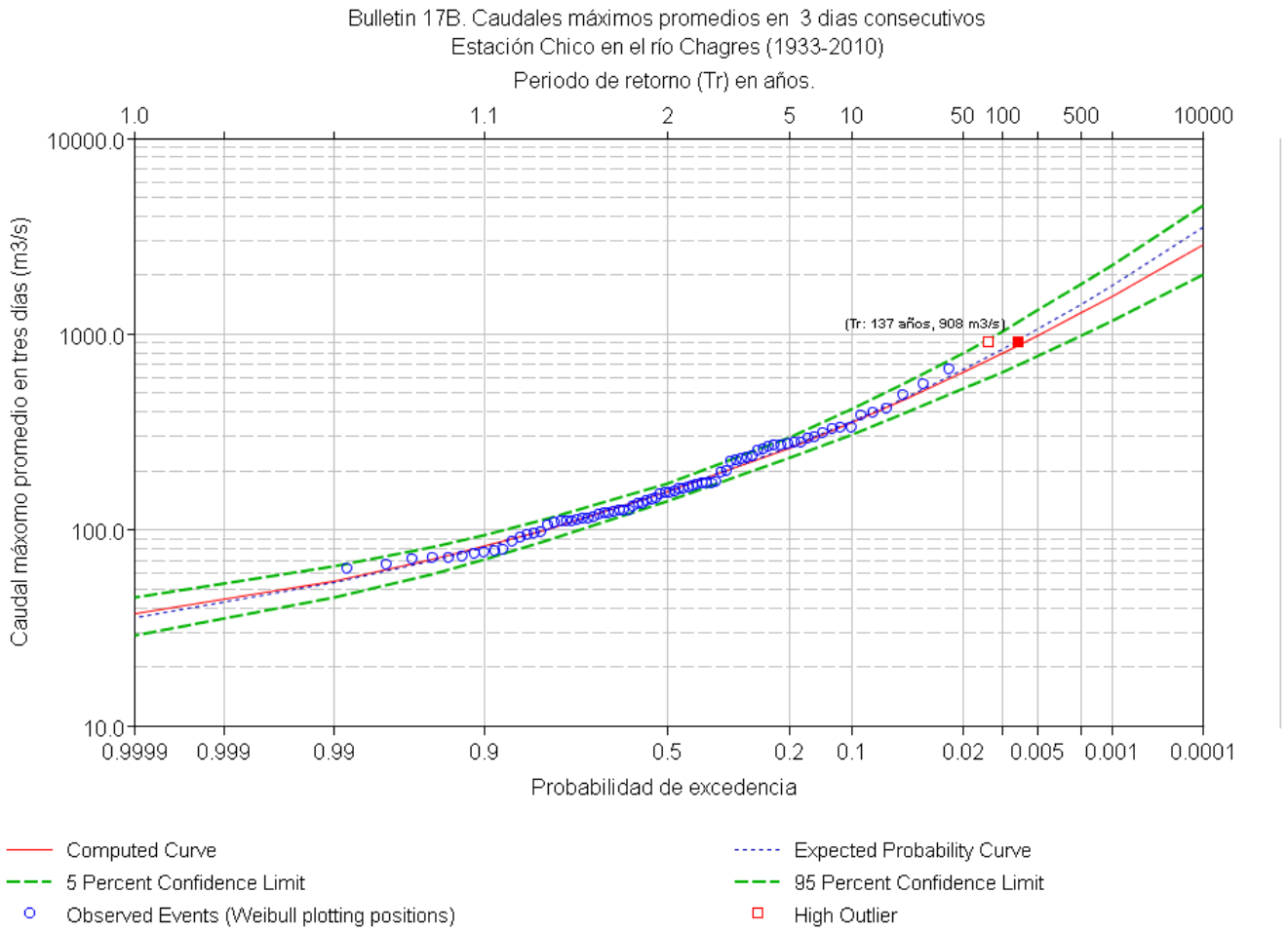


Figura 69. Análisis de frecuencia de caudales máximos promedio en tres días consecutivos en la estación Chico (1933-2010).

6.1.6 Reconstrucción de la crecida en el río Chagres hasta Chico

6.1.6.1 Antecedentes

Cerca de la medianoche, específicamente a las 23:24 h, del 7 de diciembre de 2010 se recibió el último registro válido de nivel de agua del río Chagres en tiempo real en la estación Chico, el cual fue de 90.85 m (298.07 pies). La creciente del río arrasó con la línea de aire del limnígrafo de burbujas y también arrasó con el sensor de radar que estaba montado en un tubo de metal de sección cuadrada de 10cm x 10cm (4"x 4") a una altura aproximada de 91.44 m (300 pies PLD). Por ese motivo se perdieron los registros de nivel de la estación desde antes que la crecida alcanzara su pico máximo de elevación. Los registros se restablecieron el 16 de diciembre de 2010 a las 14:29 h con un nivel de 88.29 m (289.66 pies).

Durante los días subsiguientes al evento se trató de llegar a la estación utilizando una lancha con un motor de 150 HP, pero la fuerza de la corriente que mantenía el río no permitía la navegación todavía en forma segura por el cauce.

Fue hasta el 13 de diciembre que se pudo llegar a la estación para inspeccionar y constatar los daños ocasionados a los equipos y a la infraestructura de la estación. Se confirmó que el sensor de radar había sido barrido por la crecida, encontrándose el tubo de sección cuadrada, que servía de soporte al sensor, doblado desde su base en ángulo de 90 grados paralelo al suelo. También el tubo del limnígrafo de burbujas había sido arrancado y arrasado totalmente. Al inspeccionar el carro de aforo se verificó que fue remecido violentamente, pues estaba casi desarmado, lo que evidencia que el cable vía fue golpeado violentamente por troncos que bajaron con la creciente. Se utilizaron las marcas dejadas por la creciente claramente definidas, para determinar, mediante levantamiento topográfico, el nivel máximo alcanzado por ésta, encontrándose que fue de 96.13 m (315.38 pies PLD).

6.1.6.2 Descripción general del sistema de modelación hidrológico (PANFCST)

Para conocer la forma del hidrograma de crecida, verificar el pico máximo alcanzado y la hora en que se produjo, se utilizó el modelo hidrológico PANFCST, en uso por la sección de Recursos Hídricos desde el año 1998. En 1997 La Comisión del Canal de Panamá adoptó, con algunas variantes, el paquete de modelos conocido como NWSRFS que utiliza el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos en sus centros de Pronóstico Hidrológico en todo el territorio estadounidense. La versión modificada del NWSRFS recibió el nombre de PANFCST y fue calibrada, inicializada e implementada por la compañía Riverside Technology, inc (RTi) en 1998. El núcleo hidrológico de PANFCST es el SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting). El SAC-SMA es un modelo de precipitación-escorrentía conceptual continuo con parámetros promediados espacialmente (Burnash et al, 1973) que se aplica a cuencas hidrográficas de 250 a 4000 Km^2. El SAC-SMA fue calibrado con datos de la cuenca del Canal de Panamá inicialmente en 1997 y luego recalibrado en 2003.

En PANFCST, la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) fue dividida en 10 subcuencas, con todas las características hidrológicas necesarias para simular de forma continua el comportamiento del suelo, ríos y embalses, ver figura 70, nótese que en el mapa no aparece el espejo de agua del embalse Alajuela, porque el modelo de reservorio que simula el embalse Alajuela aún no sido implementado en el modelo hidrológico PANFCST; de hecho, en estos momentos RTI (la empresa encargada del mantenimiento) está haciendo las modificaciones al modelo para agregarlo.

La simulación y pronóstico de los aportes y niveles de los embalses en tiempo real y horas futuras permiten al personal de ACP tomar mejores decisiones para la operación de los embalses, conservación del agua durante la época de escasez y evitar inundaciones en las áreas operativas del Canal durante la temporada lluviosa.

Los embalses Alajuela y Gatún son de suma importancia para llevar a cabo todas las operaciones de suministro de agua para el consumo humano e industrial, el paso expedito de buques, producción de energía eléctrica y control de inundaciones. El PANFCST tiene la capacidad de simular todas estas operaciones de forma integrada, desde el análisis de precipitación, el escurrimiento del agua, su transporte hasta los embalses y las operaciones de vertidos en época de control de inundaciones.

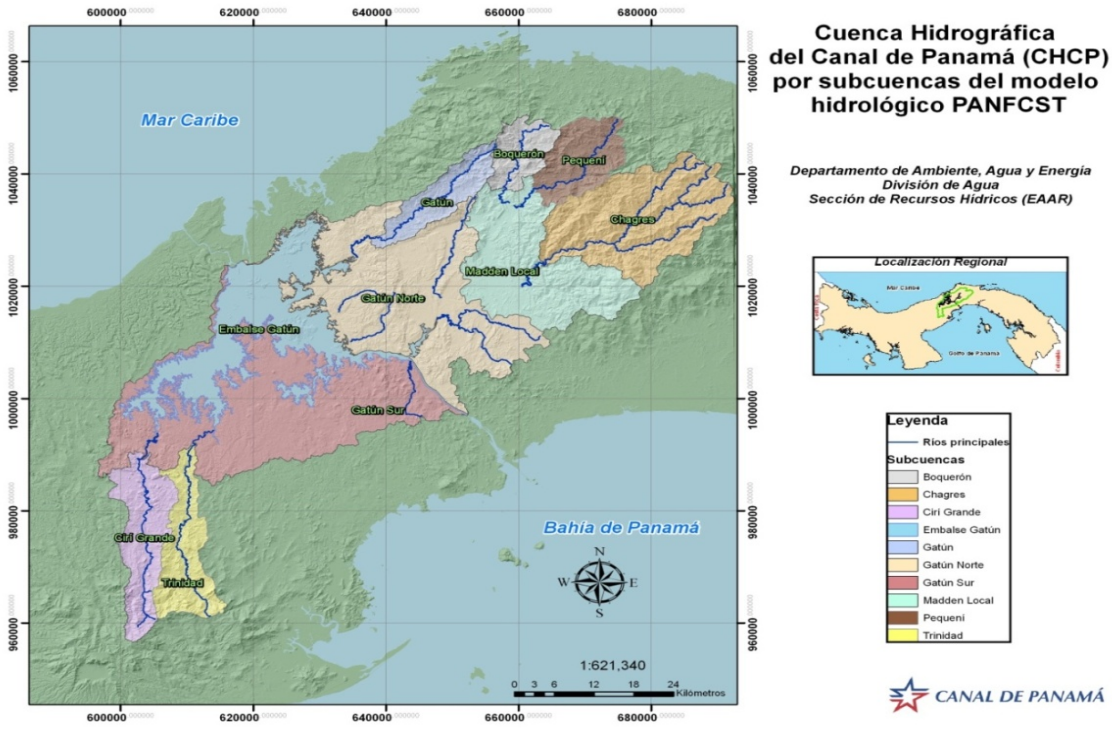


Figura 70. Subcuencas de la CHCP según el modelo PANFCST (Datos de entrada al sistema de modelación). Nótese que no aparece el espejo de agua del embalse Alajuela en esta versión del modelo.

El modelo hidrológico se corrió a partir del 6 de diciembre de 2010 a las 8:00 h con las condiciones hidrológicas de la subcuenca del río Chagres al momento de la tormenta, hasta el 11 de diciembre a las 13:00 h. Como dato de entrada se incorporó la lluvia media areal horaria de seis estaciones muy bien distribuidas en la cuenca del río Chagres hasta la estación Chico, con un área de drenaje de 407 km^2. Las estaciones son las siguientes: Chico, Chagrecito, Esperanza, Chamón, Chico cabecera y Dos Bocas, y se utilizó el método de los polígonos de Thiessen, ver figura 71 y cuadro 13.

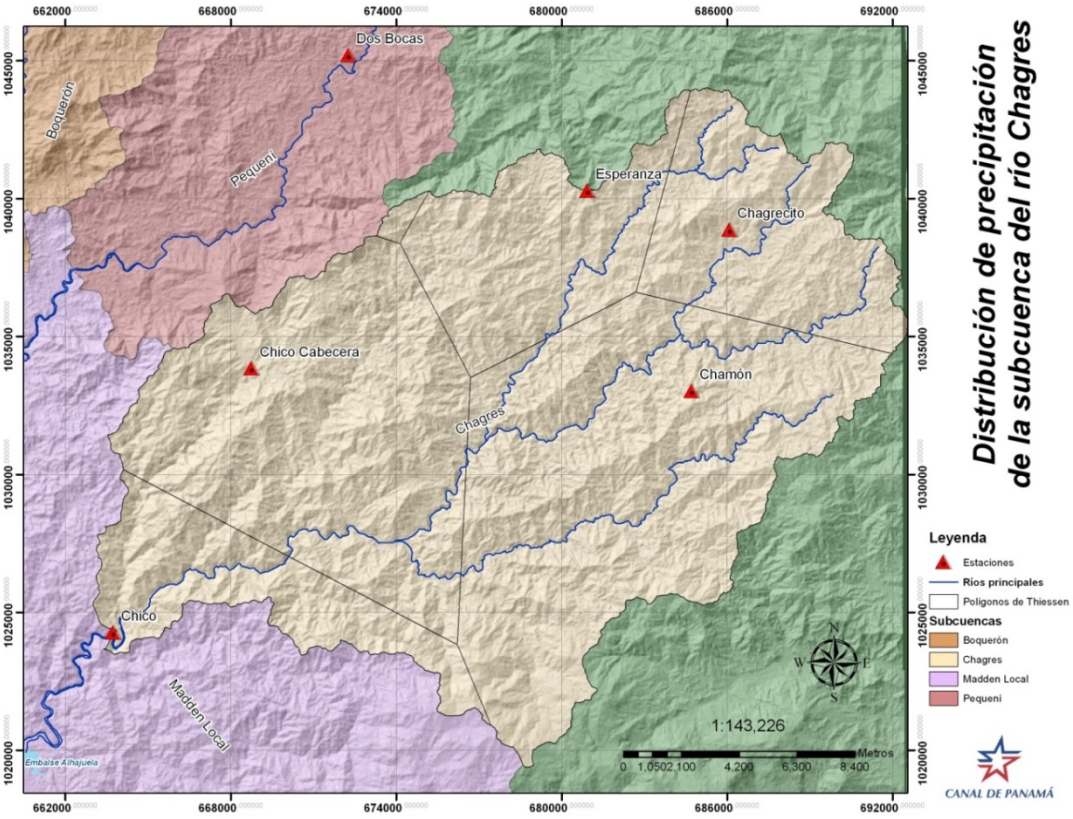


Figura 71. Polígonos de Thiessen en la subcuenca del río Chagres.

Cuadro 13 Áreas de influencia de los polígonos de Thiessen de las estaciones de precipitación en la subcuenca del río Chagres.

Estación pluviográfica	Área de influencia (km2)	Peso
Chico Cabecera	115	0.2829
Chico	40.8	0.1004
Chamón	144	0.3538
Dos Bocas	1.52	0.0037
Esperanza	50.3	0.1236
Chagrecito	55.2	0.1356

6.1.6.3 Resultados

En la figura 72 se presenta el hidrograma de la crecida del río Chagres reconstruido por el modelo hidrológico PANFCST del 6 al 11 de diciembre del 2010. Se observa que el modelo simula muy bien la crecida registrada hasta las primeras horas del 8 de diciembre, momento en que la telemetría dejó de transmitir. Producto de la tormenta el modelo simula un pico máximo en una hora de 3516 m^3/s (124163 pie^3/s), ocurrido a las 06:00 h del día 8 de diciembre, lo cual coincide con el testimonio de los lugareños, obtenido en la gira de campo del 1 de febrero de 2011, que indica que el máximo se alcanzó un poco antes de las 6:00 h de la mañana.

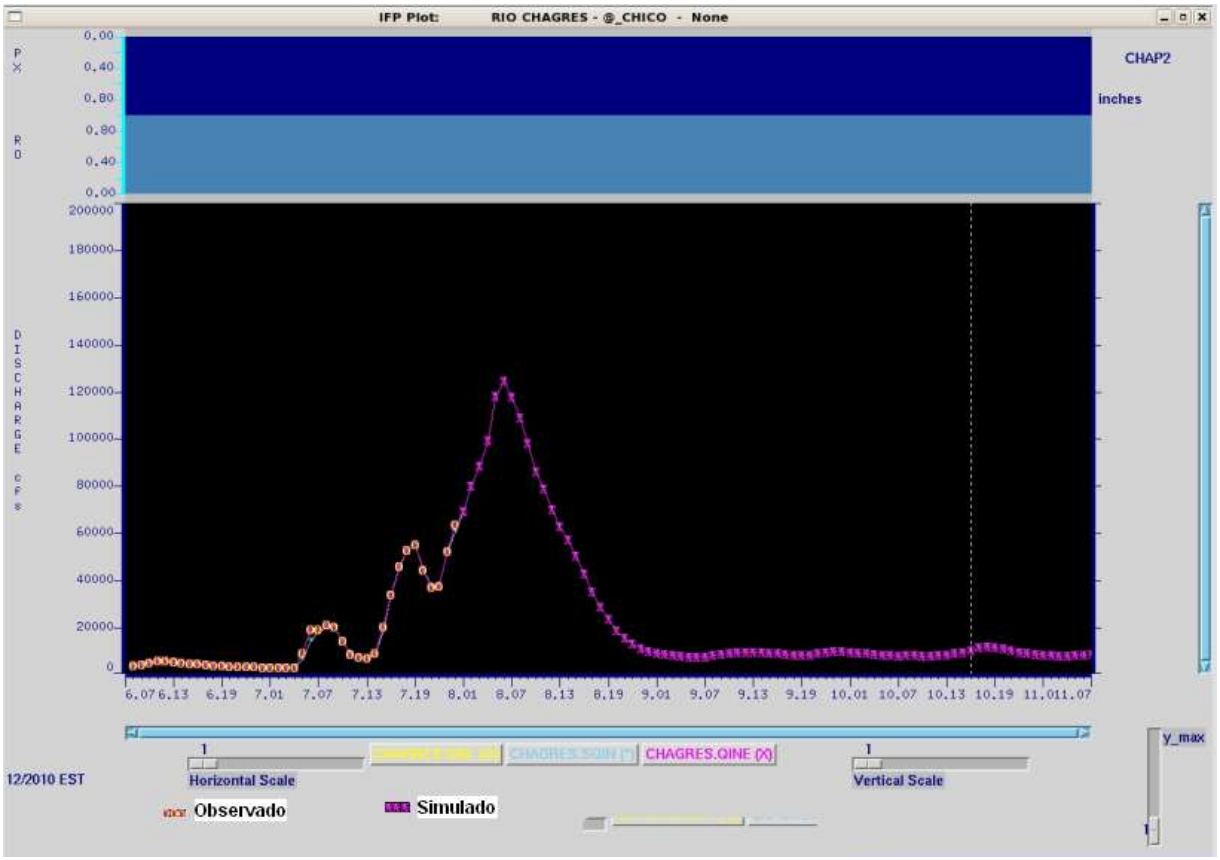


Figura 72 Hidrograma de caudales cada hora en el río Chagres hasta la estación Chico, del 6 al 11 de diciembre de 2010.

6.2 Sedimentos suspendidos

6.2.1 Análisis de los caudales sólidos en los ríos principales de la CHCP y aportes a los embalses Alajuela y Gatún

La ACP ejecuta un programa de monitoreo de los sedimentos suspendidos en siete estaciones hidrométricas, que en conjunto con las batimetrías realizadas tienen el objetivo de evaluar y

determinar de manera confiable los volúmenes de sedimentos transportados hacia los embalses y la capacidad disponible de almacenamiento de agua.

Las lluvias extremas del 7 al 9 de diciembre de 2010 tuvieron un efecto severo en los valores de las concentraciones de sedimentos suspendidos que normalmente se registran en los ríos que descargan en el embalse Alajuela. En las subcuencas de estos ríos, que fueron las más afectadas por la tormenta, la cobertura boscosa abarca más del 85% de sus áreas de drenaje y en gran parte de los terrenos predominan las pendientes pronunciadas de más de 15 grados (26%), (ACP, Informe del estado ambiental de la CHCP 2007- Cobertura vegetal). Durante este evento, recibieron lluvias promedio que totalizaron entre 189 y 445 mm para una duración de 24 horas y entre 363 y 821 mm para una duración de tres días, medidos de la 00:00 a la 24:00 h, que contribuyeron a la saturación de los suelos (ver Cuadro 5). Estas condiciones fueron propicias para el desarrollo de más de 500 deslizamientos de tierra, entre grandes y pequeños que ocurrieron en la parte alta del Chagres. Estudios en zonas tropicales (Puerto Rico) señalan que cuando las lluvias alcanzan valores estimados en 162, 184 y 197 mm para duraciones de 24, 48 y 72 horas en terrenos con pendientes mayores de 12 grados (21%), entonces se desencadenan deslizamientos de tierra (Stallard, R.F., and Kinner, D.A., 2005).

Producto de los deslizamientos de tierra, y de la erosión de los cauces y las riberas en las subcuencas ubicadas al noreste de la CHCP, entre el 7 y 10 de diciembre, las concentraciones de sedimentos suspendidos (para un determinado caudal durante las crecidas) se dispararon entre 5 y 10 veces más de valores casi normales, alcanzando al momento máximo de las crecidas el 8 de diciembre (entre las 6:00 y 11:00 h) valores por encima de los 10000 mg/l y de hasta 15000 mg/l, como el caso de la estación Peluca en el río Boquerón. En ese período se registraban caudales máximos de 1100 m^3/s (38845 pie^3/s) en la estación Peluca, 1620 m^3/s (57205 pie^3/s) en la estación Candelaria en el río Pequení y 3531 m^3/s (124670 pie^3/s) en la estación Chico en el río Chagres, con una alta capacidad de transporte de sedimentos que ingresaron al embalse Alajuela.

Mientras el nivel de agua del embalse Alajuela subía a pesar de la operación de vertidos desde la represa Madden, hasta una elevación máxima de 78.51 m (257.60 pies) el día 8 de diciembre a las 16:00 h, producto de los aportes hídricos extraordinarios, por el fondo se desarrollaba y avanzaba lentamente una corriente de densidad cargada de sedimentos finos que provocó una alta turbiedad generalizada e inédita en el embalse Alajuela.

En la toma de agua de la planta potabilizadora Federico Guardia Conte (PP FGC), la turbiedad más alta se midió el día 10 de diciembre a las 8:00 h con un valor de 601 NTU, casi dos días después del máximo de las crecidas, ver cuadro 14; en el cuadro se aprecia que el embalse Alajuela recuperó valores de turbiedad menores a 10 NTU a inicios de marzo de 2011**.**

Cuadro 14 Mediciones de turbiedad de agua cruda en la planta potabilizadora FGC.

Mes		Diciembre 2010	Enero 2011	Febrero 2011	Marzo 2011
Dia	Hora	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)
1	8:00	1.58	238	25.5	11.0
	14:00	1.39	236	26.2	10.7
2	8:00	1.38	227	23.6	10.8
	14:00	2.06	225	19.7	10.5
3	8:00	1.94	216	19.6	9.1
	14:00	1.90	213	18.3	8.7
4	8:00	1.78	205	18.5	7.1
	14:00	1.75	202	17.6	7.5
5	8:00	1.63	194	17.7	9.4
	14:00	1.59	191	17.1	6.3
6	8:00	1.47	183	17.5	6.7
	14:00	1.24	180	17.2	7.6
7	8:00	1.52	172	17.3	6.0
	14:00	1.38	169	18.7	6.1
8	8:00	121	161	18.3	6.4
	14:00	161	158	18.1	6.6
9	8:00	295	150	17.1	6.5
	14:00	290	159	17.0	6.4
10	8:00	**601**	164	16.9	6.2
	14:00	566	145	16.9	6.1
11	8:00	485	141	16.0	6.0
	14:00	518	135	15.5	6.1
12	8:00	442	113	13.4	6.1
	14:00	488	103	13.4	6.4
13	8:00	534	82.2	13.3	6.8
	14:00	559	81.2	13.0	7.5
14	8:00	492	75.7	12.7	9.1
	14:00	413	76.1	12.7	9.5
15	8:00	293	74.6	12.8	9.6
	14:00	305	73.4	12.8	10.2
16	8:00	308	70.0	13.5	8.7
	14:00	309	69.5	14.0	9.2
17	8:00	357	63.5	16.3	12.3
	14:00	340	64.6	16.5	10.7
18	8:00	338	58.0	21.1	13.5
	14:00	337	58.3	11.3	6.9
19	8:00	335	54.1	11.4	6.6
	14:00	334	53.6	10.3	6.4
20	8:00	329	49.8	11.4	6.3
	14:00	326	49.4	11.3	6.3
21	8:00	300	49.1	11.3	6.5
	14:00	281	48.2	11.3	6.4
22	8:00	223	39.6	11.3	6.5
	14:00	216	39.0	11.1	6.5
23	8:00	230	37.9	11.1	6.2
	14:00	227	37.5	11.2	5.9
24	8:00	225	36.2	11.0	6.6
	14:00	223	35.5	11.2	6.8
25	8:00	216	33.8	11.0	6.8
	14:00	213	33.8	11.1	6.3
26	8:00	206	33.2	10.7	6.4
	14:00	204	33.3	11.1	6.4
27	8:00	189	31.6	11.1	6.2
	14:00	185	31.0	11.1	6.2
28	8:00	181	29.9	11.3	6.4
	14:00	174	30.1	11.8	6.6
29	8:00	227	27.5		6.8
	14:00	233	27.9		7.3
30	8:00	244	27.8		7.2
	14:00	248	27.5		7.0
31	8:00	246	26.5		7.9
	14:00	247	27.4		7.3

Fuente: Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) y ACP.

A partir del 21 de enero los datos corresponden al sensor OBS3+ instalado a dos pies por encima de la toma superior de agua

En el cuadro 15 se observa que el día 16 de diciembre, en una gira realizada por la Unidad de Calidad de Agua (Ver figura 73), midieron en la estación Toma de Agua del IDAAN (TAG), 235 NTU en superficie y 534 NTU en fondo, además, que al norte del embalse, en la estación Boquerón-Pequení (BOP), la turbiedad medida fue de 275 NTU en superficie y 884 NTU en fondo.

Cuadro 15 Mediciones de turbiedad en el embalse Alajuela

Estación	ID	Coordenadas		Fecha	Profundidad		Turbiedad
		x	y		(m)		(NTU)
Boqueron - Pequení	BOP	657096	1031102	16-dic-10	0.5	s	275
					8.8	f	**884**
Estrecho Reporte	ERP	655796	1028887	16-dic-10	0.5	s	382
					13.0	f	549
Punta del Ñopo	PNP	655234	1023298	16-dic-10	0.5	s	347
					11.5	f	368
Chagres - Alhajuela	DCH	658718	1020796	16-dic-10	0.5	s	181
					10.5	f	180
Toma de Agua IDAAN	TAG	652327	1017708	16-dic-10	0.5	s	235
					27.5	f	534
Fuente: Unidad de Calidad de Agua (EAA-CA), ACP.							
s: superficial							
f: fondo							

En el embalse Gatún, entre el 10 y 15 de diciembre, en la estación Gamboa (DC1) que recibe directamente los vertidos de la represa Madden se midieron los valores más altos de turbiedad con 359 NTU, (Ver Figura 74). En la toma de agua de Paraíso, una de las tomas de agua que abastece la planta de Miraflores, se registró una turbiedad de 249 NTU. En la toma de agua de la planta de Mendoza la turbiedad fue de 184 NTU (Cuadro 16).

Las altas concentraciones de sedimentos suspendidos y consecuente turbiedad que trajo consigo la tormenta “La Purísima 2010”, provocó la mayor crisis de suministro de agua potable a la ciudad de Panamá y alrededores desde que entró en operación la planta potabilizadora FGC.

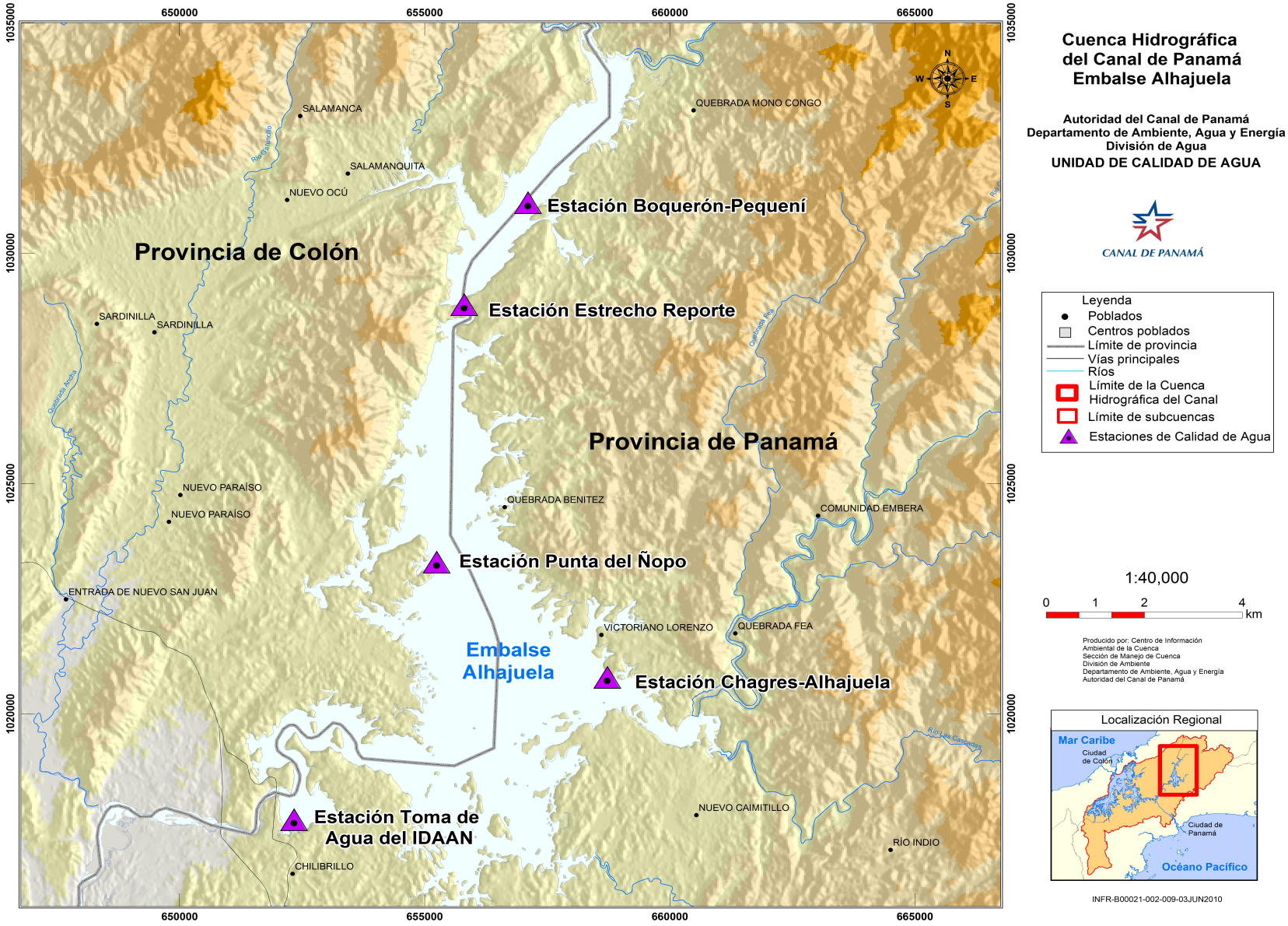


Figura 73 Estaciones de muestreos de calidad de agua en el embalse Alajuela, toma de muestras el 16 de diciembre de 2010. Fuente: Informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal 2008-2009.

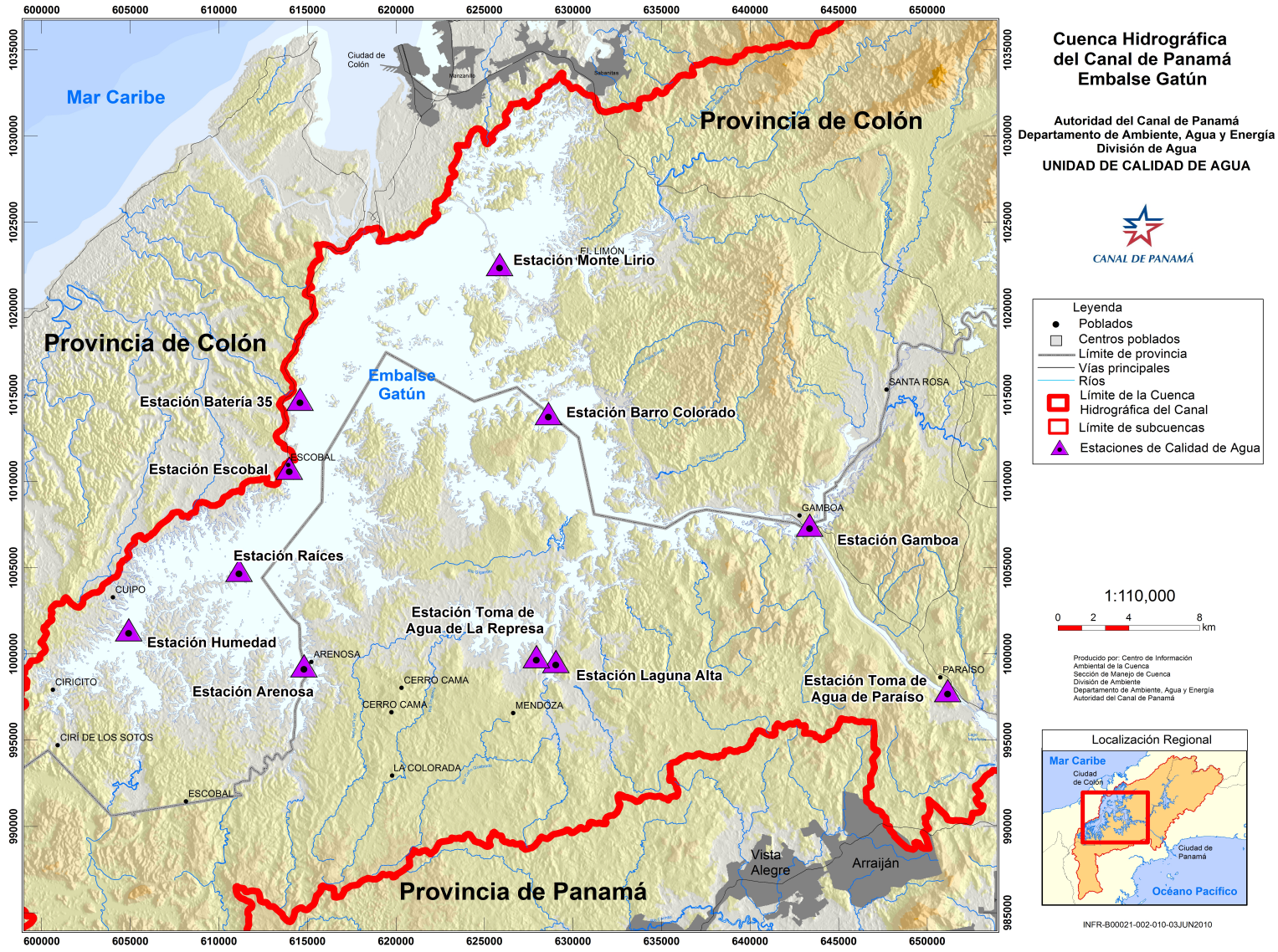


Figura 74 Estaciones de muestreos de calidad de agua en el embalse Gatún, toma de muestras entre el 10 y 15 de diciembre de 2010. Fuente: Informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal 2008-2009.

Cuadro 16 Mediciones de turbiedad en el embalse Gatún.

Estación	ID	Coordenadas		Fecha	Profundidad		Turbiedad
		x	y		(m)		(NTU)
Laguna Alta	LAT	629016	999569	10-dic-10	0.5	s	92
					3.8	f	104
Toma de Agua La Represa	TAR	628125	999516	10-dic-10	0.5	s	178
					4.1	f	179
Toma de Agua Mendoza	TME	627847	999982	10-dic-10	0.5	s	184
					5.3	f	174
Humedad	HUM	604887	1001400	14-dic-10	0.5	s	17
					11.5	f	18
Las Raíces	RAI	611124	1004849	14-dic-10	0.5	s	8
					10.3	f	8
Escobal	ESC	613957	1010765	14-dic-10	0.5	s	10
					14.5	f	10
Arenosa	ARN	614791	999313	14-dic-10	0.5	s	23
					13.9	f	27
Batería 35	BAT	614566	1014757	15-dic-10	0.7	s	8
					15.0	f	16
Monte Lirio	MLR	625836	1022563	15-dic-10	0.5	s	63
					11.6	f	72
Barro Colorado	BCI	628595	1013929	15-dic-10	0.5	s	256
					17.4	f	247
Gamboa	DC1	643343	1007468	15-dic-10	0.5	s	294
					11.0	f	**359**
Toma de Agua Paraíso	TMR	651144	997879	15-dic-10	0.5	s	249
					14.0	f	271
Fuente: Unidad de Calidad de Agua (EAA-CA), ACP.							
s: superficial							
f: fondo							

6.2.2 Muestreos de sedimentos suspendidos

Durante la tormenta “La Purísima 2010” se recolectaron 13 muestreos de sedimentos suspendidos en las estaciones hidrométricas ubicadas en las subcuencas del sector noreste de la CHCP, donde la lluvia fue más intensa. De forma consistente, los resultados de los muestreos de los observadores indican que las altas concentraciones de sedimentos suspendidos, en los ríos monitoreados en este sector de la CHCP, superaron los 10000 mg/l (Cuadro 17).

En el mismo cuadro 17 se puede apreciar que en este evento hidrometeorológico, para los caudales muestreados y según las curvas de descarga de sedimentos suspendidos vigentes, las concentraciones aumentaron entre 5 y 10 veces en la estación Peluca, entre 3 y 10 veces en la estación Candelaria y entre 3 y 6 veces en la estación Ciento.

En el otro evento posterior, pero de menor magnitud ocurrido los días 26 y 27 de diciembre, nuevamente se registraron altas concentraciones de sedimentos suspendidos, validando el

cambio en las curvas de sedimentos o nuevas relaciones entre el caudal líquido y caudal sólido por motivo de la tormenta "La Purísima 2010". En las subcuencas del sector oeste las curvas de sedimentos se mantuvieron sin cambios (Figura 75).

La figura 76 muestra las concentraciones medidas y los hidrogramas de concentraciones de sedimentos suspendidos, determinados cada 15 minutos a partir de los caudales líquidos y las curvas de sedimentos, para los ríos Boquerón y Gatún durante los días del 7 al 10 de diciembre.

Cuadro 17 Muestreos de sedimentos suspendidos en las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos Boquerón, Pequení y Gatún.

Estación Peluca en río Boquerón

No.	Fecha de Muestreo	Hora	Css Sec $_{Med}$ mg/l	Css Sec $_{Cal}$ mg/l	Relación Med/Cal
53	07-Dic-10	15:40	1152.7	1722.8	0.7
54	08-Dic-10	13:14	12776.2	2515.1	5.1
55	08-Dic-10	14:20	11997.4	2298.4	5.2
56	08-Dic-10	15:33	14081.7	1741.4	8.1
57	10-Dic-10	15:37	5952.6	1123.7	5.3
58	10-Dic-10	16:39	7597.9	737.9	10.3

Estación Candelaria en río Pequení

No.	Fecha de Muestreo	Hora	Css Sec $_{Med}$ mg/l	Css Sec $_{Cal}$ mg/l	Relación Med/Cal
71	07-Dic-10	07:12	1160.0	1026.2	1.1
72	07-Dic-10	14:54	4480.0	1592.6	2.8
73	09-Dic-10	16:00	3065.0	981.0	3.1
74	10-Dic-10	15:32	13715.0	1199.4	11.4
75	11-Dic-10	16:09	3225.0	906.4	3.6
76	26-Dic-10	07:17	8090.0	827.2	9.8
77	27-Dic-10	07:15	14885.0	1476.7	10.1
78	28-Dic-10	07:19	2090.0	804.2	2.6
79	30-Dic-10	07:12	5475.0	987.5	5.5

Estación Ciento en río Gatún

No.	Fecha de Muestreo	Hora	Css Sec $_{Med}$ mg/l	Css Sec $_{Cal}$ mg/l	Relación Med/Cal
43	03-Dic-10	06:30	806.0	798.6	1.0
44	07-Dic-10	15:44	788.0	1331.5	0.6
45	07-Dic-10	17:04	1550.0	1751.0	0.9
46	07-Dic-10	18:00	2902.0	1674.6	1.7
47	08-Dic-10	08:36	2688.0	1857.8	1.4
48	08-Dic-10	11:03	4430.0	2240.6	2.0
49	08-Dic-10	14:18	10210.0	1754.4	5.8
50	10-Dic-10	15:05	1126.0	1271.7	0.9
51	10-Dic-10	17:04	3710.0	1119.8	3.3
52	11-Dic-10	16:24	3985.0	1630.7	2.4
53	11-Dic-10	18:01	3975.0	1205.8	3.3
54	26-Dic-10	06:30	1445.0	863.5	1.7
55	26-Dic-10	12:37	4870.0	1770.2	2.8
56	26-Dic-10	15:00	7035.0	1665.4	4.2
57	27-Dic-10	07:17	1580.0	1388.6	1.1

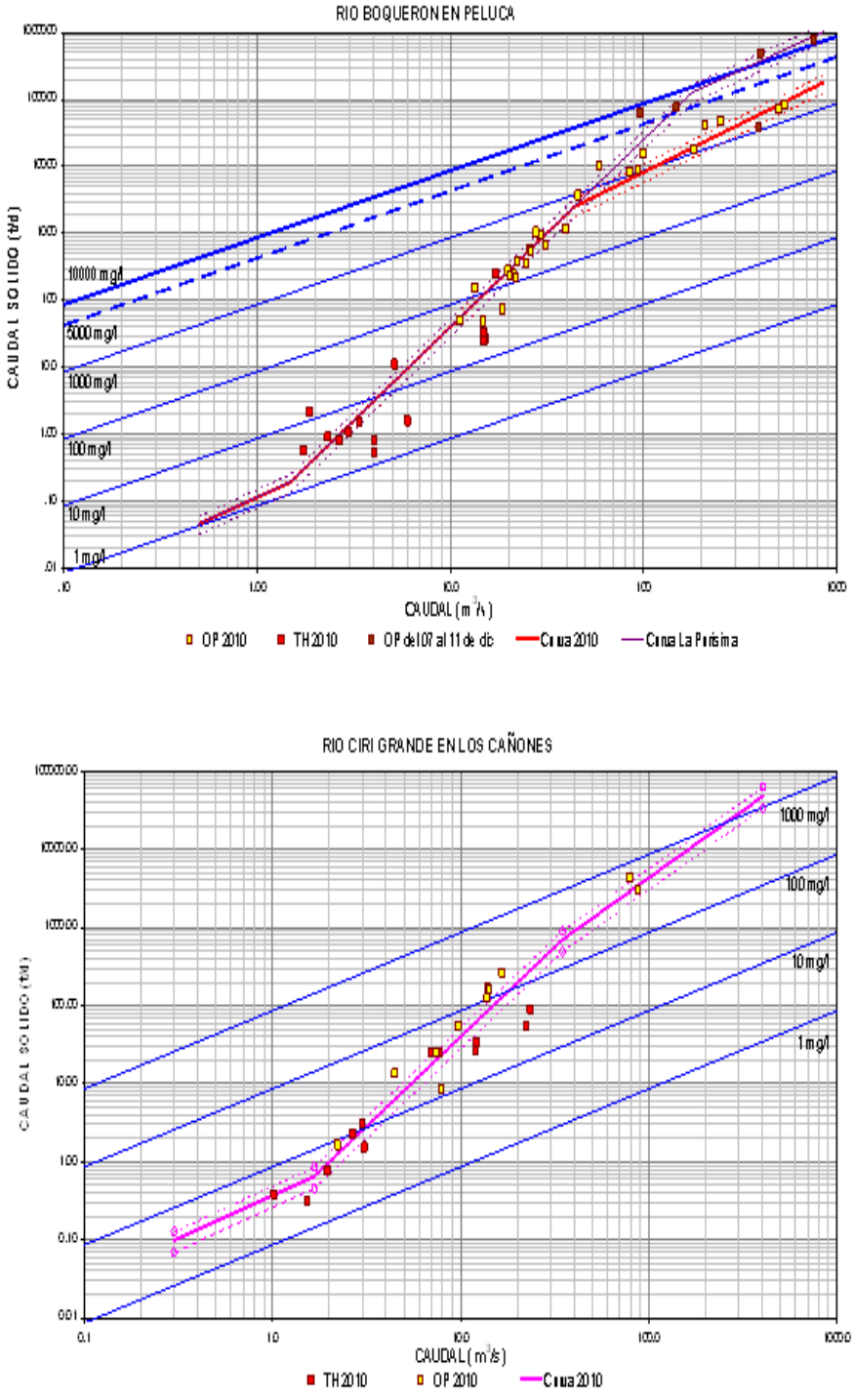


Figura 75 Curva de descarga de sedimentos suspendidos de 2010, estación Peluca en el río Boquerón y Los Cañones en el río Ciríi Grande.

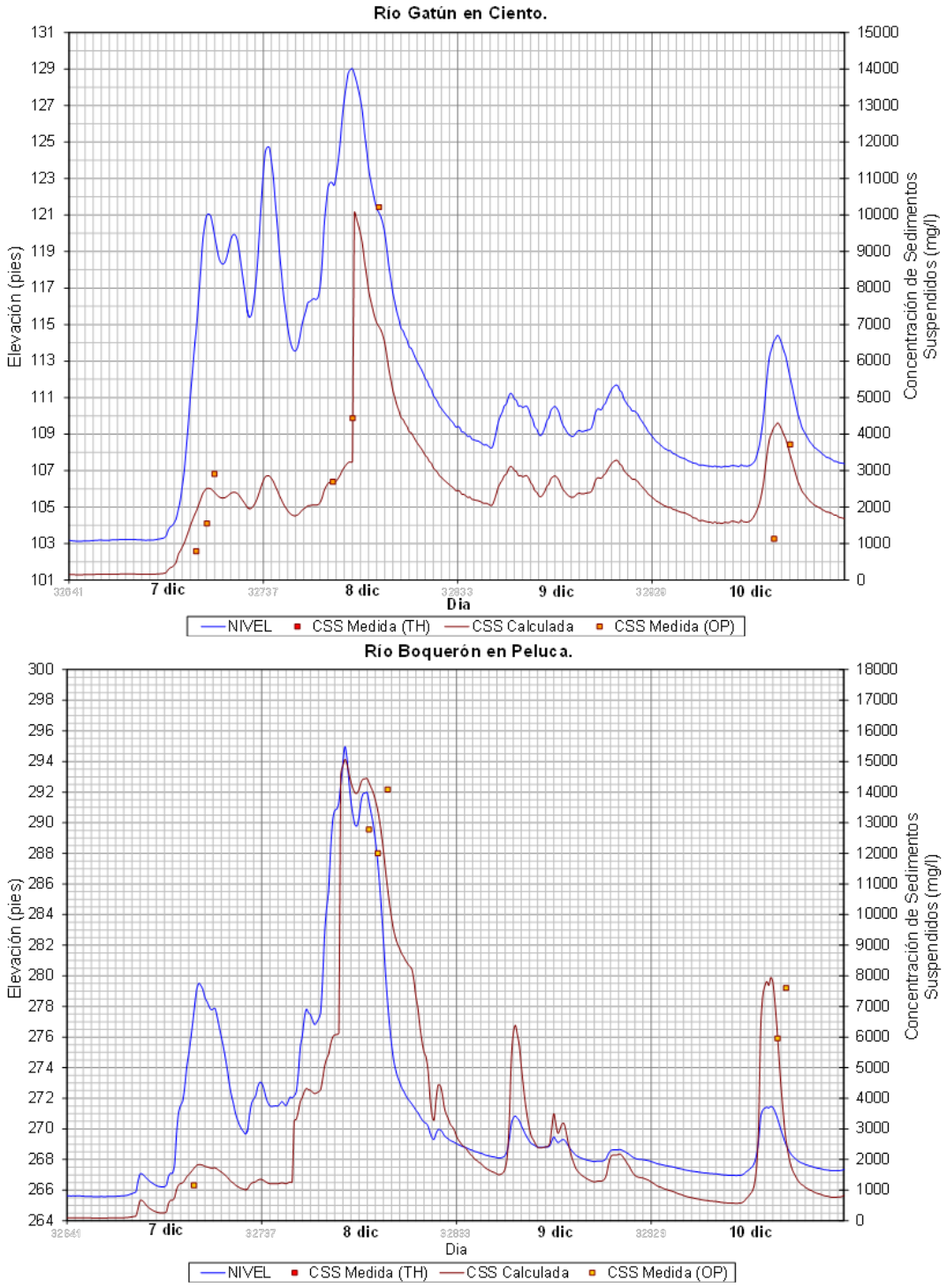


Figura 76 Hidrogramas de elevaciones y concentraciones de sedimentos suspendidos del 7 al 10 de diciembre de 2010, estación Ciento en el río Gatún y Peluca en el río Boquerón.

6.2.3 Caudal y producción de sedimentos suspendidos.

Como es típico de las crecidas extraordinarias, un alto porcentaje del caudal anual de sedimentos suspendidos del año 2010 que entró al embalse Alajuela lo aportó la tormenta "La Purísima 2010". Durante tres días consecutivos el aporte fue de 3.37 millones de toneladas, que representa el 65% del total anual (Cuadro 18), que también son equivalentes en similar porcentaje a las toneladas de sedimentos suspendidos que ingresaron al embalse Alajuela en 10 años del período 1998-2007. El aporte de sedimentos suspendidos del año 2010 fue casi el aporte de sedimentos de 10 años (97%), del período 1998-2007.

Para la subcuenca del embalse Gatún, con el doble del área de suelos, el aporte de sedimentos suspendidos de la tormenta "La Purísima 2010" fue de 555 mil toneladas y representa el 31% del total anual del 2010 (Cuadro 19) y 13% de lo que ingresó al embalse durante el período 1998-2007. Aunque el impacto de los aportes de sedimentos al embalse Gatún fue de menor cuantía que el de Alajuela, el aporte de sedimentos en tres días consecutivos de la tormenta fue lo suficientemente significativo que representa el 90% del máximo aporte anual estimado en 1999 (636 mil toneladas).

Cuadro 18 Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010 respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Alajuela.

Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010
respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Alhajuela

Subcuenca	Area de Drenaje km^2	t (3 días)	% de aporte al embalse	t/año	% del total anual
Río Boqueron en Peluca	90.6	388822	11	608373	64%
Río Pequeni en Candelaria	145	511903	15	962419	53%
Rio Chagres en Chico	407	1813186	54	2582681	70%
Area no medida	333	657782	20	1006695	65%
Total	976	**3371693**	**100**	**5160168**	65%

Cuadro 19 Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010 respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Gatún.

Aportes de sedimentos suspendidos del 7 al 9 de diciembre de 2010
respecto al aporte anual en las subcuencas del embalse Gatún

Subcuenca	Area de Drenaje km^2	t (3 días)	% de aporte al embalse	t/año	% del total anual
Río Trinidad en El Chorro	171	12130	2	73573	16%
Río Ciri Grande en Los Cañones	192	17562	3	88619	20%
Río Gatún en Ciento	119	171620	31	438362	39%
Gatun Sur (No Medido)	733	110626	20	439139	25%
Gatun Norte (No Medido)	679	243900	44	727606	34%
Total	1894	**555838**	**100**	**1767299**	31%

En el embalse Alajuela, la mejor condición con respecto a los valores medidos de turbiedad, se registró en la desembocadura del río Chagres con 180 NTU a pesar de ser el mayor contribuyente de sedimentos suspendidos con 54% del aporte (Cuadro 18 y Cuadro 20), debido a que el sector es más amplio y profundo, y con una mayor capacidad de dilución donde descarga. Por el contrario, en el sector más angosto y menos profundo donde descargan los ríos Boquerón y Pequení (26% del aporte de sedimentos), entre el estrecho Reporte y la cola del embalse, se registraron los valores más críticos de turbiedad de hasta 884 NTU (Cuadro 15 y Cuadro 20).

A *grosso modo*, la menor descarga de sedimentos suspendidos que recibió el embalse Gatún proveniente de las subcuencas ubicadas al oeste y sur de la CHCP y su mayor capacidad de dilución, permitió valores menos críticos de turbiedad que en el embalse Alajuela. Este hecho se hace más evidente en el sector donde descargan los ríos Trinidad y Cirí Grande, los de menor aporte de sedimentos y mejor condición respecto a los valores medidos de turbiedad (menos de 30 NTU, ver las estaciones Humedad y la Arenosa en el Cuadro 16 y Cuadro 19). Mientras que el sector ubicado entre isla Barro Colorado, Gamboa y Paraíso en el corte Culebra, resultó el más afectado con valores de turbiedad entre 247 y 359 NTU producto de las aguas de la represa Madden y la subcuenca de Gatún norte (Cuadro 16 y Cuadro 19).

Con respecto a la producción de sedimentos suspendidos (caudal anual en t/año dividido entre el área de drenaje en km^2), durante el período 1998-2007, los valores promedio fueron inferiores a 750 t/año/km^2 en las subcuencas que descargan al embalse Alajuela, que son las de mayor tasa en la CHCP y el valor máximo fue de 1635 t/año/km^2 en la subcuenca del río Chagres determinado en 2007. En la subcuenca del embalse Gatún el valor promedio fue de 235 t/año/km^2 y el valor máximo determinado en 2007 de 598 t/año/km^2 en la subcuenca del río Gatún.

En 2010 la producción de sedimentos suspendidos en la CHCP resultó con valores extremadamente altos y muestra una alta variabilidad consistente con la distribución espacial de la lluvia de la tormenta “La Purísima 2010”. Al noreste de la CHCP se estimaron valores extremos de: 3684 t/año/km^2 en el río Gatún en Ciento, 6715 t/año/km^2 en el río Boquerón en Peluca, 6637 t/año/km^2 en el río Pequení en Candelaria y 6346 t/año/km^2 en el río Chagres en Chico. Mientras que al suroeste los valores fueron entre 430 y 535 t/año/km^2 (ver Cuadro 20 y Figura 77, Mapa de producción de sedimentos suspendidos).

Es importante mencionar que aunque se obtuvieron valores de producción de sedimentos suspendidos por encima de 3000 t/año/km^2, estos valores no están asociados al deterioro de las subcuencas, ya que se ubican dentro de áreas protegidas, con poca población y una densa cobertura boscosa.

En ríos de montaña, el transporte de sedimentos suspendidos puede ser considerable e incluso muy grande, del orden de 10000 t/año/km^2, debido a la contribución de los deslizamientos de tierra, los cuales pueden ser la fuente más importante. Factores topográficos (pendientes mayores de 12 grados), meteorológicos (cantidad de lluvia mayor de 200 mm en 24 horas) y tal vez geológicos son los factores desencadenantes de los deslizamientos de tierra en la subcuenca del embalse Alajuela, independientemente de la presencia de una cobertura boscosa bien densa.

Cuadro 20 Comparación de producción y caudal de sedimentos suspendidos en las subcuencas del embalse Alajuela y Gatún para el año 2010 contra el período 1998-2007.

Comparación de producción y caudal de sedimentos suspendidos en las subcuencas del embalse Alhajuela y Gatún para el año 2010 contra el periodo 1998-2007.

Subcuenca del lago Alhajuela					
Subcuencas del lago Alhajuela	Área km^2	ql ($l/s/km^2$)	qs ($t/año/km^2$)	Qs (t/año)	% Aporte
Río Chagres en Chico (CHI)	407	108	6346	2582681	50
Río Pequení en Candelaria (CDL)	145	131	6637	962419	19
Río Boqueron en Peluca (PEL)	90.6	127	6715	608373	12
Madden Local (No medido)	333	85.3	3023	1006695	19
Total 2010				**5160168**	**100**
Total 1998-2007 (t)				**5310954**	
Promedio 1998-2007 (t/año)				**531095**	
% de aporte 2010 respecto 1998-2007				**97%**	

Subcuenca del lago Gatún					
Subcuencas del lago Gatún	Área km^2	ql ($l/s/km^2$)	qs ($t/año/km^2$)	Qs (t/año)	% Aporte
Río Trinidad en El Chorro (CHR)	171	52.1	430	73573	4
Río Ciri Grande en Los Cañones (CAN)	192	63.7	462	88619	5
Río Gatún en Ciento (CNT)	119	96.3	3684	438362	25
Gatun Sur (No Medido)	733	58.6	599	439139	25
Gatun Norte (No Medido)	679	63.8	1072	727606	41
Total 2010				**1767299**	**100**
Total 1998-2007 (t)				**4411329**	
Promedio 1998-2007 (t/año)				**441133**	
% de aporte 2010 respecto 1998-2007				**40%**	
Relación Aporte 2010 Alhajuela/Gatún				**2.9**	

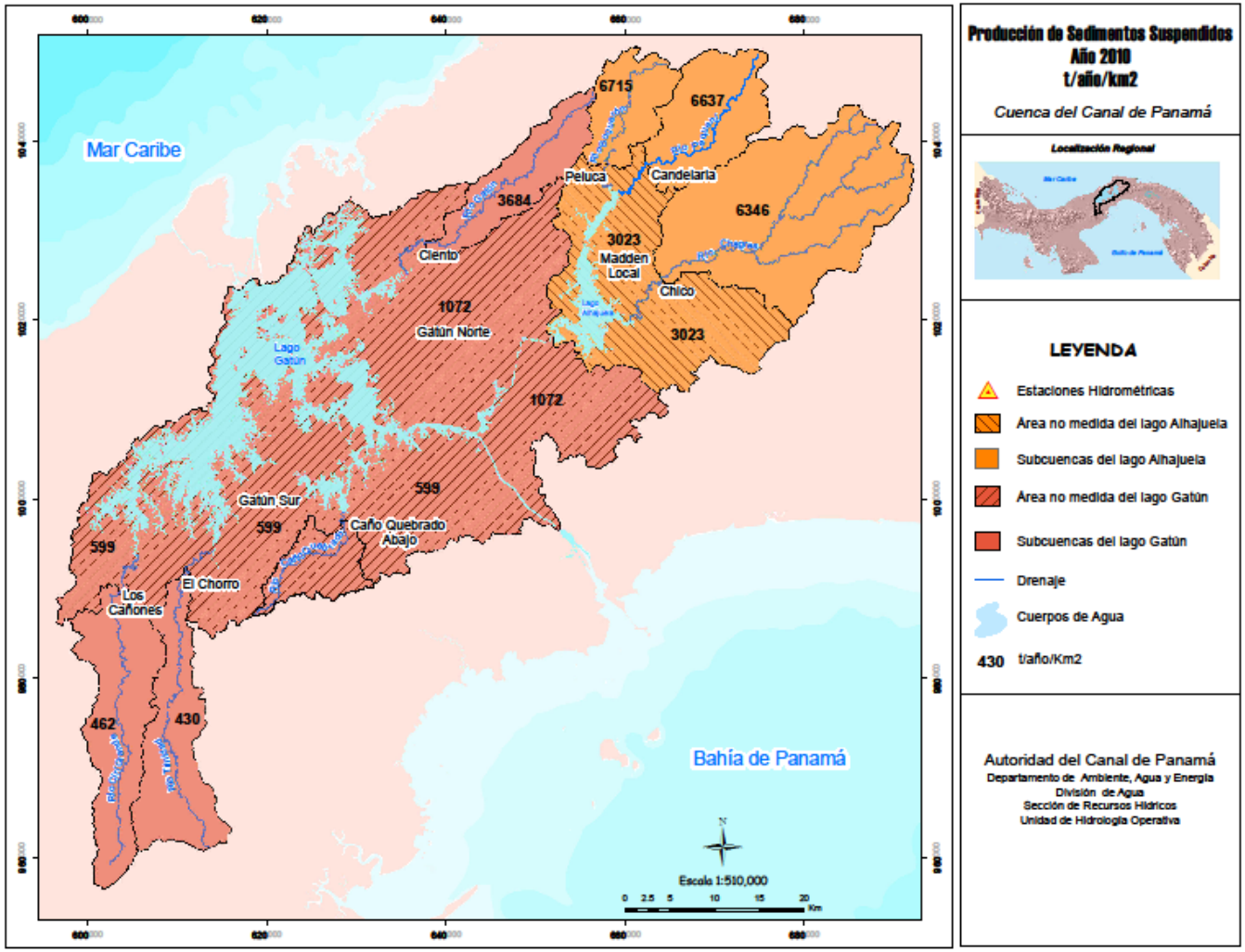


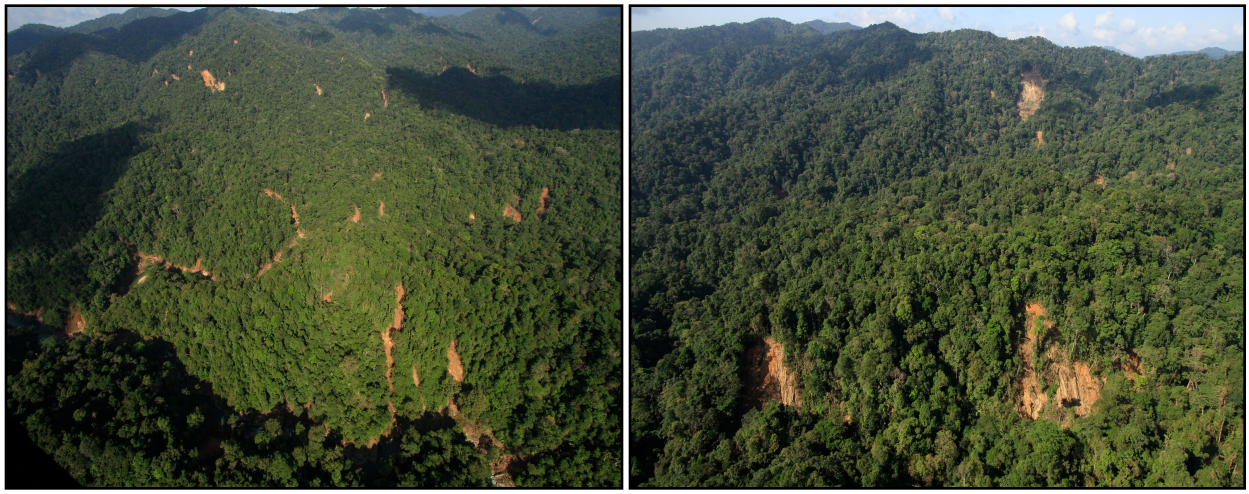
Figura 77 Producción de sedimentos suspendidos, año 2010 (t/año/km^2).

6.2.4 Tasas de sedimentación en el embalse Alajuela

Hasta el año 2007, según las batimetrías realizadas, la pérdida total de la capacidad de almacenamiento de agua es de 11.8% en 73 años de vida del embalse Alajuela. Es decir, en promedio se pierde cada año 0.16% de la capacidad original (766,5 MMC). Sin embargo, la mayor sedimentación ocurrió en el período 1935-1983, con una tasa de sedimentación determinada en 0.21%/año. En los períodos más recientes de la evaluación de la sedimentación del embalse, 1984-1997 y 1998-2007, la tasa se ha estabilizado en 0.07 y 0.08 %/año, respectivamente. Comparadas con el primer período reflejan una reducción del orden de tres veces. A esos ritmos, la pérdida de capacidad de almacenamiento es razonable para un embalse de las dimensiones del Alajuela.

A consecuencia de la tormenta “La Purísima 2010”, la tasa de sedimentación se determinó en 0.66 %/año (Cuadro 21), producto de los deslizamientos naturales que se dieron en la parte noreste de la cuenca (Ver Figura 78), es decir, en 100 años se perdería un 66% adicional de la capacidad de almacenamiento de agua si todos los años ocurriera un fenómeno de esta naturaleza, sin embargo, este es un evento extraordinario de baja probabilidad de ocurrencia.

El mayor impacto de estas tormentas extraordinarias se refleja en el desmejoramiento de la calidad de agua debido al aumento de la turbiedad y en el aceleramiento de pérdida de capacidad del embalse.



Deslizamientos de tierra en la parte alta de la subcuenca del rio Chagres. Fotos tomadas el 21-enero-2011.

Transporte y terrazas de sedimentos depositados en el curso y en la desembocadura del río Chagres a consecuencia de la tormenta “La Purísima 2010”. Fotos tomadas el 29 de diciembre de 2010 y el 04 de abril de 2011.

Embalse Alajuela, en el sector de la represa Madden y toma de agua del IDAAN, afectado por la alta turbiedad y su progresiva recuperación. Fotos tomadas el 29 de diciembre de 2010 (izquierda) y el 21 de enero de 2011

Figura 78 Fotos tomadas en la parte alta de la cuenca del río Chagres y en la represa Madden.

Cuadro 21 Tasas de sedimentación del periodo 1998-2007 y años 2008 a 2010. Subcuenca del embalse Alajuela

Area de aportación de sedimentos (km^2):	976
Densidad de sedimentos depositados (t/m^3):	1.113
Acarreo de fondo (% de sedimentos suspendidos):	15.0%

Año	Qs susp CHI		Qs susp CDL		Qs susp PEL		Qs suspendidos Area no medida		Qs suspendidos Alhajuela		Qs Total Alhajuela	Tasa de Sed.
	(t/año)	($t/año/km^2$)	(t/año)	($t/año/km^2$)	(t/año)	($t/año/km^2$)	(t/año)	($t/año/km^2$)	(t/año)	($t/año/km^2$)	MMC/año	%/año
1998	113235	274	76896	570	43872	482	122582	365	356586	365	0.368	0.05
1999	206635	499	126732	939	80593	886	257260	766	671220	688	0.694	0.09
2000	343424	830	83880	621	45254	497	126058	375	598617	613	0.619	0.08
2001	55705	135	66390	492	38452	423	126721	377	287268	294	0.297	0.04
2002	122776	297	116229	861	50810	558	93499	278	383314	393	0.396	0.05
2003	44047	106	56122	416	24147	265	154748	461	279065	286	0.288	0.04
2004	389896	942	141522	1048	101581	1116	136765	407	769764	789	0.795	0.10
2005	48462	117	15906	118	26854	295	98908	294	190129	195	**0.196**	0.02
2006	343341	829	118652	879	69472	763	161211	480	692677	710	0.716	0.09
2007	676722	1635	178648	1323	99261	1091	127682	380	1082314	1109	**1.12**	0.14
Promedio	234424	566	98098	727	58030	638	140544	418	531095	544	0.549	0.07
2008	94579	228	72652	538	27206	299	111572	332	306009	314	0.316	0.04
2009	233977	565	145800	1080	95475	1049	143975	428	619227	634	0.640	0.08
2010	**2582681**	**6346**	**962419**	**6637**	**608373**	**6715**	**1006695**	**3023**	**5160168**	**5287**	**5.332**	**0.66**

años secos
años húmedos

7 MANEJO DE LOS EMBALSES

7.1 Antecedentes

Un mes antes, previo al evento de la tormenta "La Purísima 2010", el domingo 7 de noviembre de 2010, a las 7:00 h, los niveles de agua de los embalses Alajuela 75.24 m PLD (246.85 pies) y Gatún 26.61 m PLD (87.32 pies) se encontraban en la zona C del diagrama de "Zonas de Decisiones" (Figura 86), por lo que se dieron los primeros desalojos de agua a través de un máximo de doce (12) compuertas disponibles del vertedero de Gatún. Durante este primer día de desalojo del exceso de agua por emergencia se vertió al mar Caribe un volumen de agua de 175 Mmc (6180 Mpc ó 46300 Mg) equivalente a 841 esclusajes. En noviembre de 2010 se vertió hacia el mar Caribe un total de 483 Mmc (17100 Mpc ó 128000 Mg) equivalente a 2320 esclusajes.

Con relación al vertedero de Madden, durante noviembre de 2010, no fue necesario operar las compuertas de tambor. Sin embargo, a partir del 11 de noviembre el nivel de agua del embalse Alajuela superó la cota máxima de operación 76.78 m PLD (251.90 pies) e inició el flujo libre sobre la cresta de las cuatro (4) compuertas de tambor. El volumen total de agua vertido libremente al embalse Gatún en noviembre fue 32 Mmc (1150 Mpc ó 8570 Mg) que equivale a 156 esclusajes.

7.2 Estructuras de vertido del Canal de Panamá

Las estructuras que conforman el Sistema de Represas, Vertederos y Presas Auxiliares del Canal de Panamá son las siguientes:

- Dos represas de Gatún, vertedero de Gatún con catorce (14) compuertas de deslizamiento vertical y veinticinco (25) presas auxiliares que rodean el lago Gatún.
- Represa-vertedero de Madden con cuatro (4) compuertas de tambor, seis (6) compuertas de fondo y dos (2) válvulas de aguja y catorce (14) presas auxiliares que rodean el lago Alajuela.
- Represa-vertedero de Miraflores con ocho (8) compuertas de deslizamiento vertical.
- Presa auxiliar de Pedro Miguel

Los vertederos de Gatún, Alajuela y Miraflores se usan para los vertidos normales y de emergencia. Las alcantarillas de las esclusas se usan solamente para desalojos de emergencia, en las cuales se anticipan riesgos a la vida y/o a los bienes de las comunidades asentadas en las riberas de los embalses y a las estructuras del Canal. La diferencia principal entre estos dos tipos de vertidos se basa en la urgencia de la operación y en el volumen de descarga que se requiera.

En el caso de la presa Madden, los vertidos normales alcanzan hasta 2120 m^3/s (75000 pie^3/s) y cuando se realizan no afectan las operaciones de tránsito por el Canal, ni tampoco a las personas que viven y trabajan en las planicies de inundación del río Chagres, entre la represa

Madden y el embalse Gatún; por encima de este caudal el vertido es considerado de emergencia y puede llegar hasta 7080 m^3/s (250000 pie^3/s).

El vertedero de Gatún descargando con las catorce (14) compuertas abiertas y el uso de las alcantarillas de las esclusas, o el uso de todos estos a la vez es considerado un vertido de emergencia. Se pueden esperar daños en las estructuras del existente Canal de Panamá y afectaciones en las esclusas de Gatún y Pedro Miguel, cuando la elevación del nivel en Gatún rebasa 26.82 m PLD (88 pies).

Una crecida severa también podría exigir el uso de las ocho (8) compuertas del vertedero de Miraflores totalmente abiertas.

En el Apéndice 12.2 se presenta la capacidad Individual de vertido de las instalaciones para Control de Inundaciones del Canal de Panamá.

7.3 Aportes a los embalses Alajuela y Gatún

En general, los aportes a los embalses Alajuela y Gatún, producto de la tormenta "La Purísima 2010", están conformados por las descargas de los ríos principales, la red de tributarios menores y el espejo de agua del propio embalse.

Para la subcuenca del embalse Alajuela los tributarios principales son los ríos Boquerón, Pequení, Chagres e Indio Este y para la subcuenca del embalse Gatún los ríos Gatún, Trinidad y Cirí Grande.

En la figura 79 se presenta el hidrograma de aportes promedio horarios derivado mediante balance hídrico del embalse Alajuela durante los tres días de la tormenta "La Purísima 2010". Se presenta también en la misma figura el histograma promedio de precipitación horaria estimada con las 40 estaciones de lluvia disponibles en la cuenca. Se observa que el aporte máximo en una hora estimado para la cuenca de Alajuela fue de 6258 m^3/s (22100 pie^3/s) y la intensidad máxima promedio de precipitación fue de 36 mm/h, ocurrida entre las 6:00 y 7:00 h del 8 de diciembre.

Según el hidrograma de la tormenta para la cuenca del Alajuela, el volumen de agua registrado durante los tres días, del 7 al 9 de diciembre de 2010, fue aproximadamente 399 Mm^3 más un caudal base de aproximadamente 59.2 Mm^3, para un volumen total de 458 Mm^3. La precipitación efectiva durante la tormenta fue de 389 mm, para un coeficiente de escorrentía de 0.69 promedio para la cuenca del Alajuela.

En la figura 80 se presenta el hidrograma de aportes promedio horarios derivado mediante balance hídrico de los embalses en la CHCP durante los tres días de la tormenta "La Purísima 2010". En la misma figura se muestra el histograma promedio de precipitación horaria estimada con las 40 estaciones de lluvia disponibles en la cuenca. Se observa que el aporte máximo en una hora estimado en la CHCP fue de 10335 m^3/s (365000 pie^3/s) y la intensidad máxima promedio de precipitación fue de 19 mm/h, ocurrida entre las 4:00 y 5:00 h del 8 de diciembre.

De acuerdo al hidrograma de la tormenta en la CHCP, el volumen de agua registrado durante los tres días, del 7 al 9 de diciembre de 2010, fue aproximadamente 957 Mm^3 más un caudal base de aproximadamente 138 Mm^3, para un volumen total de 1095 Mm^3. La precipitación efectiva fue de 287 mm, resultando un coeficiente de escorrentía de 0.75 promedio para toda la CHCP, en el período de la tormenta.

El volumen total de aporte al embalse Gatún durante los tres días fue de 1095 Mm^3, aproximadamente el doble del volumen disponible para el manejo de emergencia por crecidas, que es la diferencia entre el volumen máximo de operación del embalse Gatún (Elevación 92 pies, 28 m) y el volumen al inicio de la tormenta (elevación 87.41 pies ó 26.6 m).

El volumen útil del lago Gatún entre la elevación 24.84 m (81.50 p) y 26067 m (87.50 p) es de 769 Mmc (27155 Mpc) y el volumen para manejo por emergencias entre la elevación 28 m (92 p) y 26.67 m (87.50 p) es de 611 Mmc (21576 Mpc).

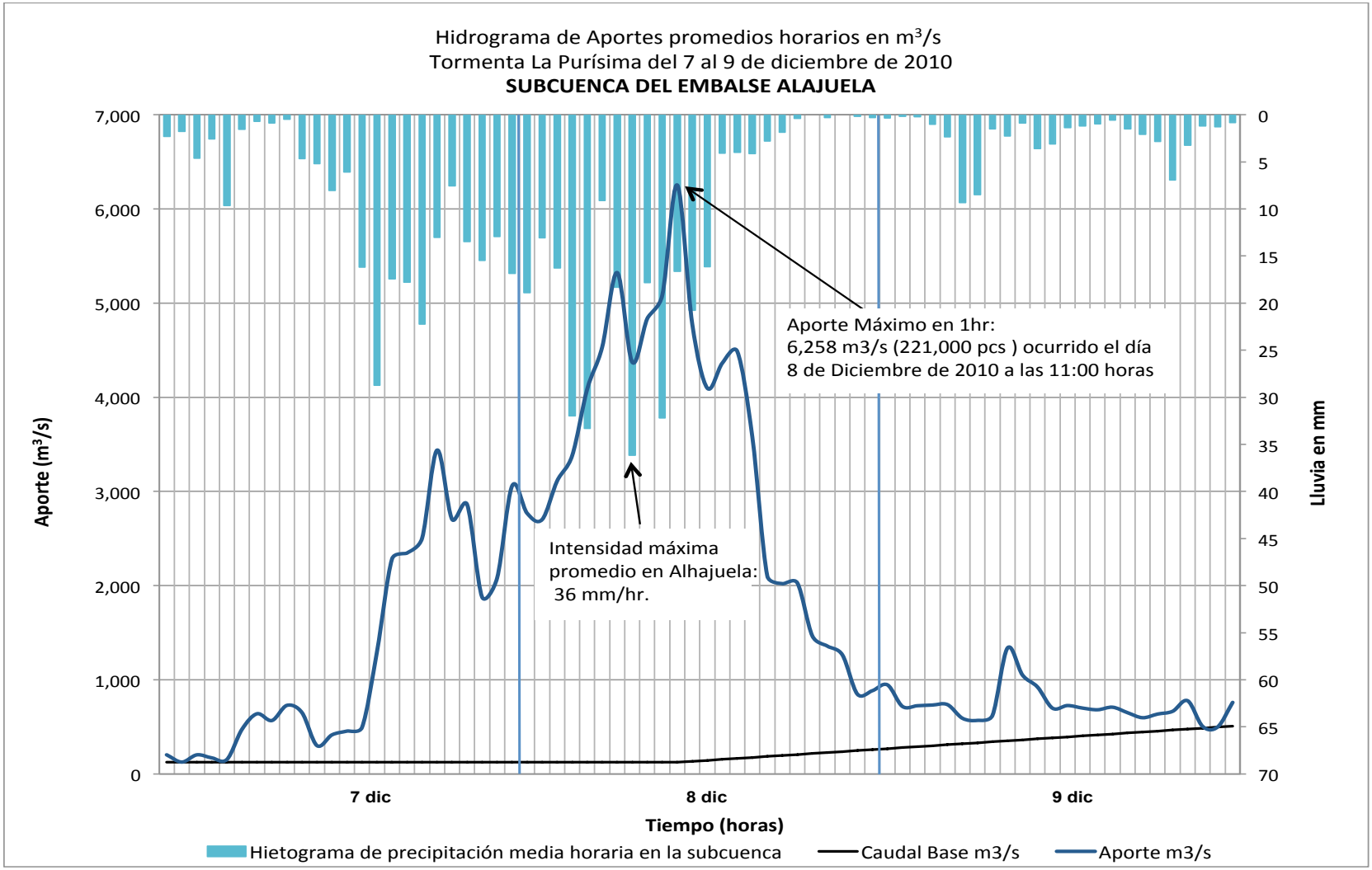


Figura 79 Hidrograma de aportes promedio horarios e histograma de precipitación de la subcuenca del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

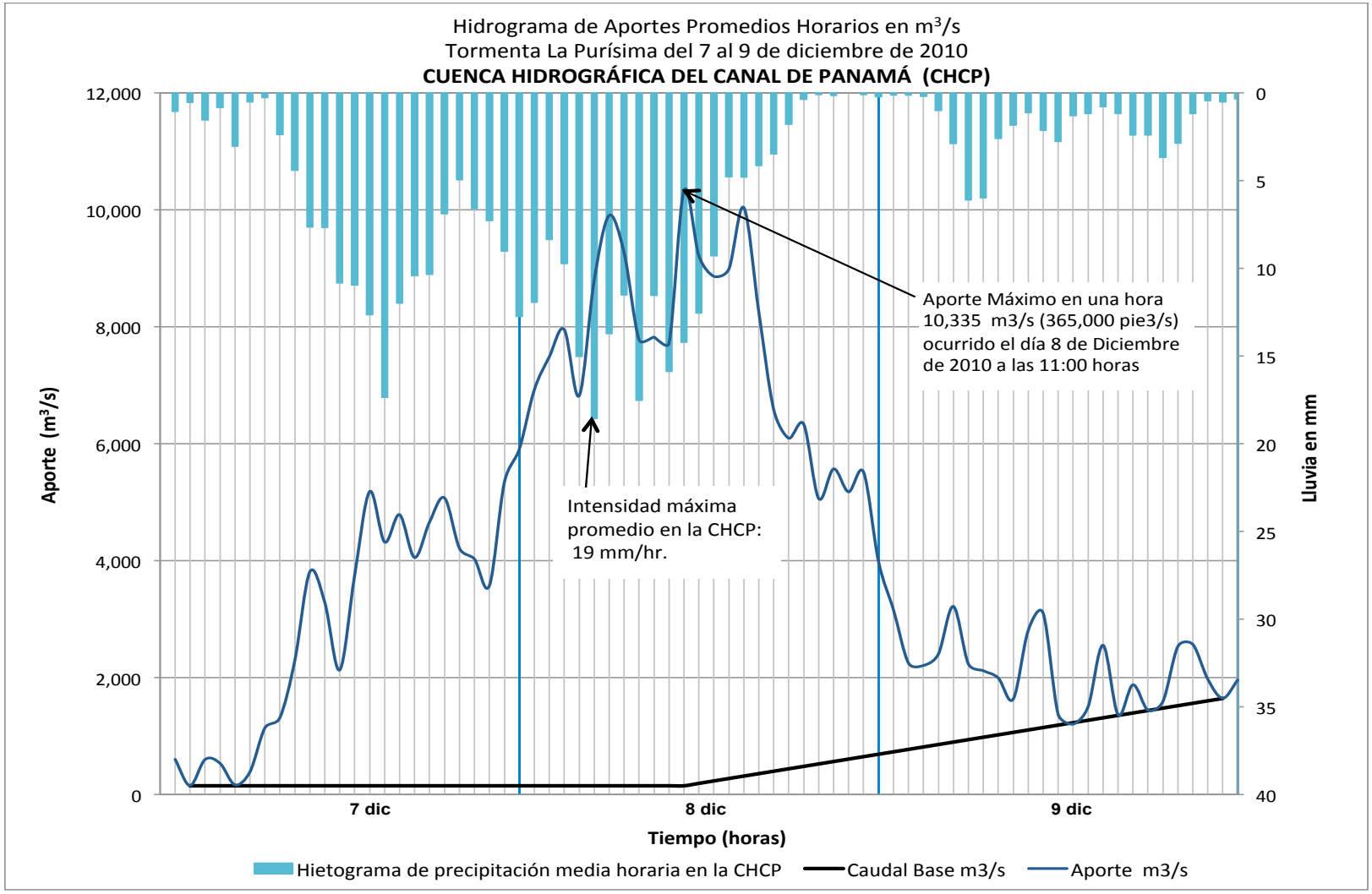


Figura 80 Hidrograma de aportes promedios horarios e histograma de precipitación de la CHCP, del 7 al 9 de diciembre de 2010

7.3.1 Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela y a la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá. Período de análisis 1906 a 2010

Para el análisis de frecuencia de los aportes máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela y a la CHCP, el período analizado fue de 1906 a 2010 para 105 años de registro. Los aportes diarios al embalse Alajuela, durante el periodo de 1906 a 1934, eran determinados por medio de la medición de niveles de agua, aforos y curvas de descargas en la estación Alajuela, ubicada 500 m aguas abajo de la represa Madden. A partir de 1934, los aportes diarios se determinan por medio del balance hídrico del embalse. Para el embalse Gatún en el período de 1906 a 1911, los aportes diarios se determinaron en la estación Gatún en el río Chagres cercano a su desembocadura en el mar Caribe. A partir del período de transición de llenado del embalse (1912-1913) hasta la fecha, los aportes al embalse Gatún son determinados mediante balance hídrico.

En el embalse Alajuela el aporte máximo en 24 horas de la tormenta "La Purísima 2010" fue 5 veces mayor que el promedio histórico del período 1906-2009 y en la CHCP (aportes conjuntos a los embalses Alajuela y Gatún) fue 4.3 veces mayor respecto al promedio histórico del mismo período.

El resultado del análisis según la frecuencia de distribución de probabilidad Log-Pearson Tipo III (FDP LP III) indica que el aporte máximo en 24 horas para el embalse Alajuela determinado en 3693 m^3/s (130425 pcs), entre los días 8 y 9 de diciembre de 2010, tiene un período de retorno de 167 años. De la misma forma para la CHCP el análisis indica que el período de retorno es de 116 años para el aporte máximo de 7600 m^3/s (268414 pcs) entre los días 8 y 9 de diciembre. Al comparar con los períodos de retorno estimados para la precipitación máxima promedio en 24 horas, los aportes resultaron con mayor período de retorno en la subcuenca del embalse Alajuela (167 *versus* 113 años), tal vez por el mayor grado de saturación del suelo en la zona de mayor afectación por la tormenta que en toda la CHCP, donde los períodos de retorno resultaron similares (116 *versus* 108 años).

En las figuras 81 y 82 se presentan las gráficas de probabilidad LP-III para los embalse Alajuela y Gatún, respectivamente, con los resultados obtenidos del análisis de frecuencia.

En los cuadros 22 y 23 se presentan las series de tiempo usadas para el análisis de frecuencia, para los aportes máximos en 24 horas continuas de los embalses Alajuela y Gatún, respectivamente, para el período de análisis 1906-2010.

En el cuadro 24 se presentan los resultados del ajuste de la FDP LP III a los aportes máximos en 24 horas continuas de los embalses de la CHCP.

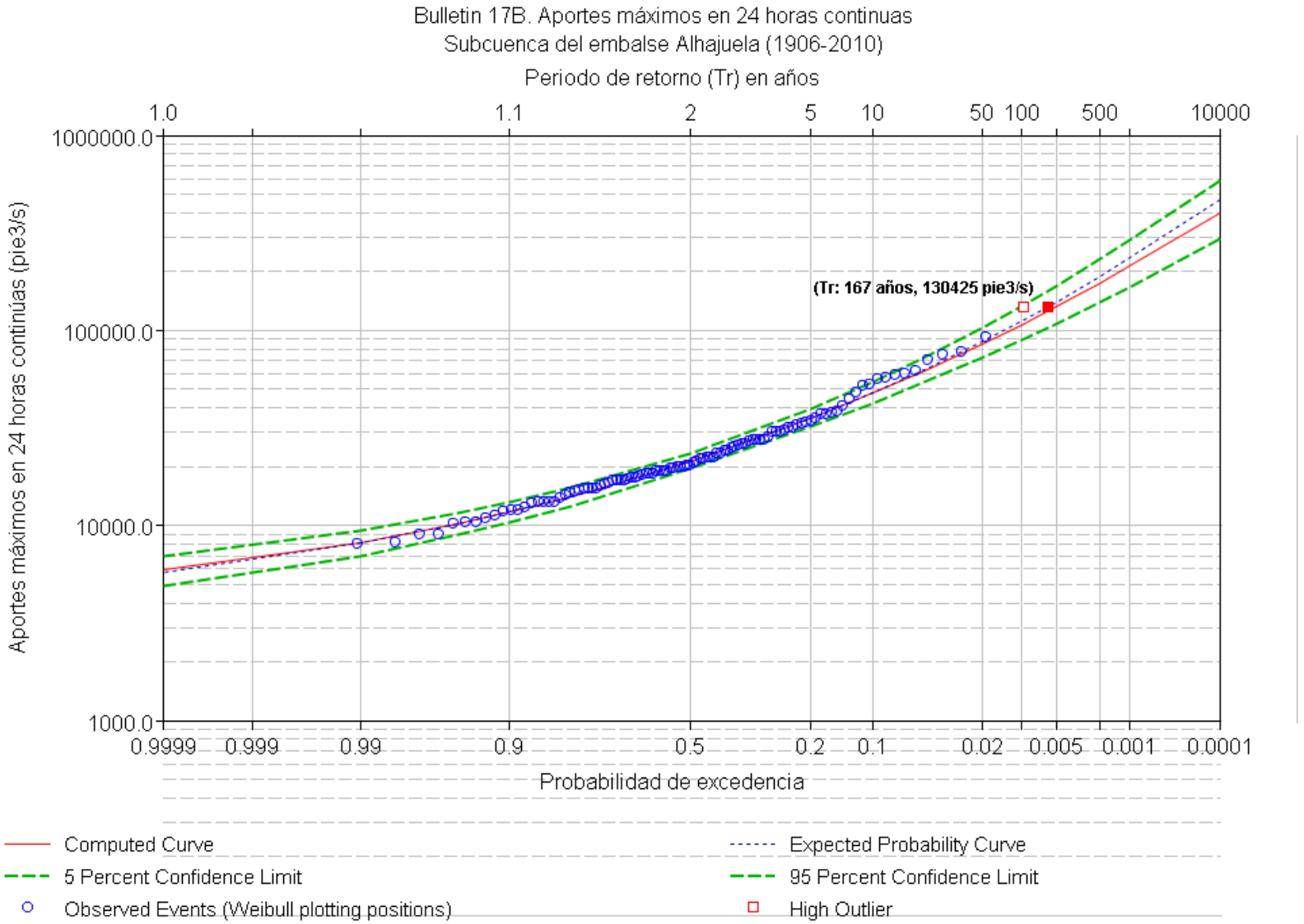


Figura 81 Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela (1906-2009).

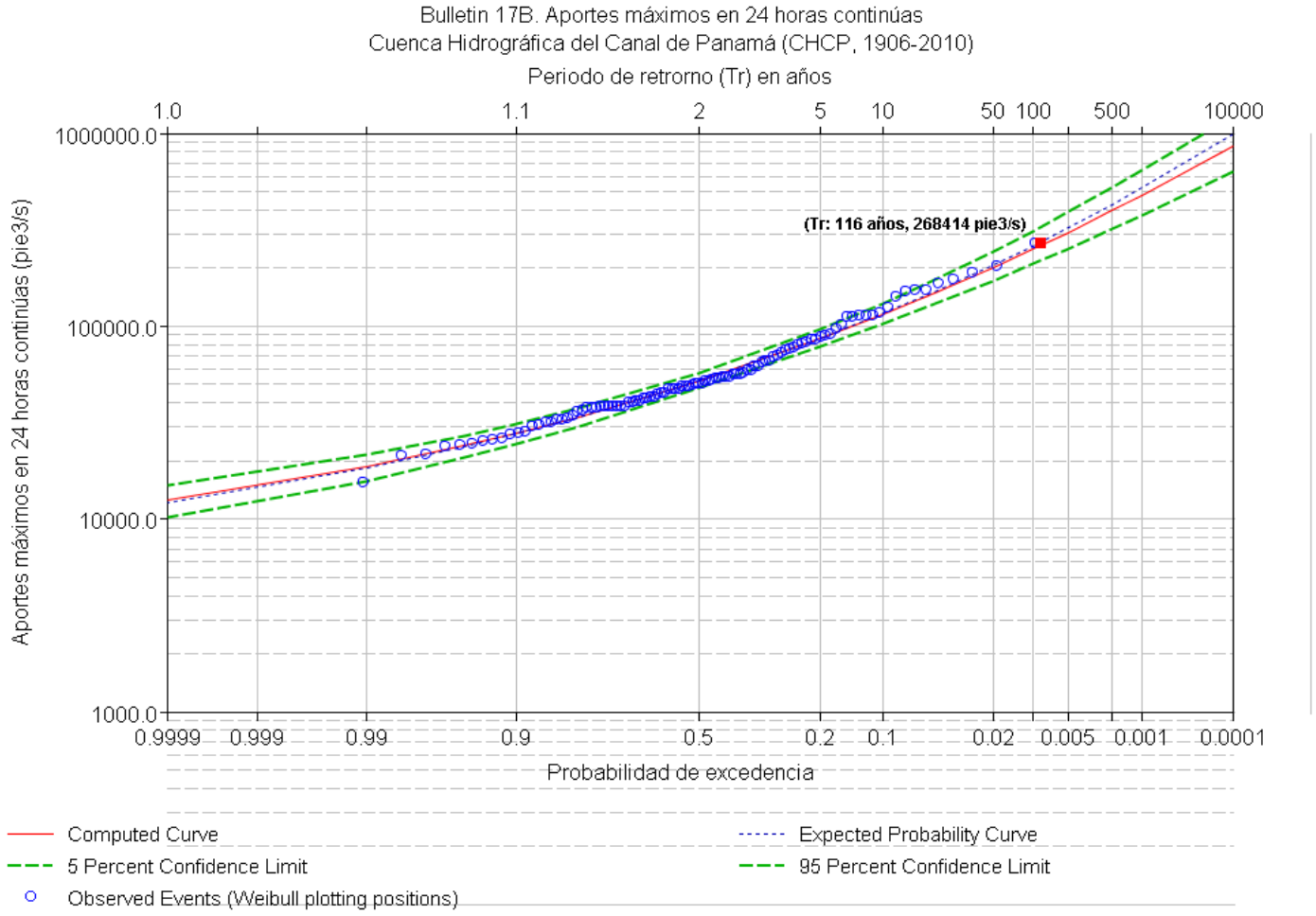


Figura 82 Análisis de frecuencia de aportes máximos en 24 horas continuas para la CHCP (1906-2010).

Cuadro 22 Aportes Máximos en 24 horas continuas al embalse Alajuela, período 1906 a 2010.

Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs
1906	75400	**1927**	23400	**1948**	10200	**1969**	26000	**1990**	15400
1907	22100	**1928**	15000	**1949**	18100	**1970**	37211	**1991**	19900
1908	16900	**1929**	13200	**1950**	17900	**1971**	18900	**1992**	20000
1909	92200	**1930**	18500	**1951**	11200	**1972**	24000	**1993**	21300
1910	28400	**1931**	57000	**1952**	14200	**1973**	24700	**1994**	15490
1911	18500	**1932**	62000	**1953**	22400	**1974**	10800	**1995**	29970
1912	31400	**1933**	25200	**1954**	19000	**1975**	15800	**1996**	51500
1913	17200	**1934**	16500	**1955**	27500	**1976**	17600	**1997**	8060
1914	15200	**1935**	52300	**1956**	26300	**1977**	13200	**1998**	24000
1915	19000	**1936**	20300	**1957**	19900	**1978**	16200	**1999**	31723
1916	8900	**1937**	48200	**1958**	9000	**1979**	13100	**2000**	56553
1917	27300	**1938**	40500	**1959**	35100	**1980**	10300	**2001**	13221
1918	30100	**1939**	18500	**1960**	27200	**1981**	30000	**2002**	27458
1919	8100	**1940**	12400	**1961**	25800	**1982**	15500	**2003**	19044
1920	13000	**1941**	34400	**1962**	15400	**1983**	30400	**2004**	58797
1921	16900	**1942**	19700	**1963**	20200	**1984**	22300	**2005**	13751
1922	21800	**1943**	44300	**1964**	11800	**1985**	23400	**2006**	32997
1923	76800	**1944**	59400	**1965**	14700	**1986**	26900	**2007**	38063
1924	17100	**1945**	33500	**1966**	70200	**1987**	37500	**2008**	21846
1925	12000	**1946**	37100	**1967**	19500	**1988**	20800	**2009**	32870
1926	11900	**1947**	17600	**1968**	10300	**1989**	17000	**2010**	130425

Cuadro 23 Aportes máximos en 24 horas continuas para la CHCP, período 1906 a 2010.

Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs	Años	Aporte en pcs
1906	206000	**1927**	47200	**1948**	28000	**1969**	38400	**1990**	62190
1907	54000	**1928**	51500	**1949**	70000	**1970**	101870	**1991**	47180
1908	42000	**1929**	37800	**1950**	65700	**1971**	27500	**1992**	35800
1909	154100	**1930**	56300	**1951**	42800	**1972**	30300	**1993**	38200
1910	79500	**1931**	173300	**1952**	54700	**1973**	61400	**1994**	48300
1911	36600	**1932**	154500	**1953**	38100	**1974**	34400	**1995**	37480
1912	75000	**1933**	87500	**1954**	76700	**1975**	42700	**1996**	85625
1913	44600	**1934**	88700	**1955**	56700	**1976**	30500	**1997**	21060
1914	41000	**1935**	142600	**1956**	53300	**1977**	24600	**1998**	38300
1915	53500	**1936**	32500	**1957**	81400	**1978**	48800	**1999**	55718
1916	46800	**1937**	112900	**1958**	15400	**1979**	21700	**2000**	116288
1917	75700	**1938**	83000	**1959**	111000	**1980**	25300	**2001**	32599
1918	47400	**1939**	90800	**1960**	65200	**1981**	72400	**2002**	113473
1919	23700	**1940**	31700	**1961**	38300	**1982**	24000	**2003**	65548
1920	41000	**1941**	40000	**1962**	26100	**1983**	45100	**2004**	111305
1921	42400	**1942**	52200	**1963**	69300	**1984**	44400	**2005**	32980
1922	58600	**1943**	152000	**1964**	25800	**1985**	97000	**2006**	113338
1923	187600	**1944**	125000	**1965**	50200	**1986**	37700	**2007**	49848
1924	54800	**1945**	85000	**1966**	166800	**1987**	59300	**2008**	56468
1925	52300	**1946**	50000	**1967**	31700	**1988**	49800	**2009**	48940
1926	40200	**1947**	38000	**1968**	28400	**1989**	38300	**2010**	268414

Cuadro 24 Resultados del ajuste de la FDP LP III a los aportes máximos en 24 horas continuas de los embalses de la CHCP.

Ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad Log Pearson Tipo III (LPIII) a aportes máximos a los embalses en 24 horas continúas

Periodo de análisis: 1906-2010

Subcuenca	Duración	FDP	Método de Ajuste	Bondad de Ajuste		Parámetros estadisticos			Qmax 2010 (pie^3/s)	Tr (años)
				R	EEM (%)	Ỹ	Sy	gc		
Embalse Alhajuela	24 hrs	LPIII	MML	0.9951	4.4	10.0305	0.5546	0.7230	130425	167
CHCP	24 hrs	LPIII	MML	0.9950	5.3	10.9118	0.5599	0.5919	268414	116

7.4 Caudales de salida de los embalses Gatún y Alajuela

Las condiciones imperantes el 8 de diciembre de 2010 obligaron a que, a partir de las 09:47 h hasta el 9 de diciembre de 2010, se abrieran de dos (2) al máximo de las catorce (14) compuertas del vertedero de Gatún e inclusive se operaran las alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel y Gatún para desalojar el exceso de agua del embalse Gatún por emergencia de inundación. La operación de vertidos de emergencia a través de las alcantarillas de las esclusas de Gatún se inició el 8 de diciembre a las 10:45 h, con la apertura de dos alcantarillas, descargando un total de 4361 m^3/s (18000 pie^3/s). En las esclusas Pedro Miguel la operación comenzó también el 8 de diciembre a las 10:22 h, con la apertura de dos alcantarillas, luego a las 11:17 h se abrió la tercera alcantarilla, descargando un total de 4984 m^3/s (21000 pie^3/s).

A partir de las 10:45 h del 8 de diciembre de 2010, el tránsito de buques por el Canal de Panamá se suspende temporalmente durante 17 horas, por la operación de desalojo de aguas por las alcantarillas, la fuerte corriente del río Chagres en Gamboa y por el nivel de agua extraordinario alcanzado por el embalse Gatún 26.99 m (88.57 pies) PLD. El cierre de las alcantarillas de las esclusas de Gatún se inicia a las 4:00 h del 9 de diciembre de 2010 y se reactiva el tránsito sur de buques a las 5:00 h del mismo día. Esta fue la cuarta vez en la historia del Canal que se interrumpe el tránsito de buques debido a la utilización de las alcantarillas de las esclusas como aliviaderos (Morrow, 1924; Panama Canal Company, 1932; U.S.A. Congressional Record, 1954).
A pesar de haber activado la máxima capacidad de vertidos de agua disponible en el complejo hidrotécnico Gatún y esclusas de Pedro Miguel, las 14 compuertas abiertas del vertedero Gatún, más la descarga a través de las alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel y Gatún, equivalente a 3 compuertas del vertedero Gatún, el nivel de agua del embalse Gatún continuó aumentando de manera sostenida, alcanzando su máxima elevación histórica de 26.99 m (88.57 pies) PLD; el 8 de diciembre de 2010, a las 20:00 h, el desalojo total horario en ese instante fue de 6774 m^3/s (239095 pie^3/s).

En la figura 83 se presenta el hidrograma de aportes (entradas) y vertidos (salidas) con las respectivas elevaciones del embalse Gatún, del 7 al 9 de diciembre de 2010. En el cuadro 25 se presenta el resumen del vertido total máximo en una hora.

En el cuadro 26 se presenta un resumen de los 15 mayores vertidos diarios del embalse Gatún, desde 1965 hasta 2010, se puede observar que 7 de los 15 mayores vertidos del período se dieron en el año 2010 y el mayor vertido se dio el 8 de diciembre de 2010.

Cuadro 25 Volumen vertido máximo en una hora desde el embalse Gatún (a las 20:00 h del 8 dic 2010)

Caudal de salida Máximo en una hora (8 dic 2010)

Embalse Gatún

Salidas	**Volumen máx en una hora (Mpc)**	**Caudal máx en una hora (pie3/s)**	**Caudal máx en una hora (m3/s)**	**%**	
Compuertas	713	198,000	5,610	82.8	
Alcantarillas PMG	76	21,000	595	8.8	
Alcantarillas GAT	65	18,000	510	7.5	
Esclusajes GAT&PMG	0	0	0	0.0	0
Hidrogeneración GAT	5	1,470	42	0.6	127.008
Municipal	2	625	18	0.3	54
Total	861	239,095	6,774	100	181.008

Cuadro 26 Vertidos diarios máximos en Gatún desde 1965.

# de orden	Fecha	Volumen en Mpc	Vertido en pie^3/s	Vertido en m^3/s
1	08/12/2010	16,600	192,000	5,450
2	09/12/2010	12,600	146,000	4,140
3	04/11/1966	9,370	108,000	3,070
4	27/12/2010	9,360	108,000	3,070
5	31/12/2000	8,590	99,400	2,820
6	23/11/2002	8,280	95,800	2,710
7	06/12/1985	7,460	86,300	2,440
8	19/11/2004	6,900	79,800	2,260
9	07/12/2010	6,800	78,700	2,230
10	18/11/1970	6,580	76,200	2,160
11	14/12/2010	6,400	74,100	2,100
12	26/12/2010	6,360	73,600	2,080
13	30/12/2000	6,240	72,200	2,040
14	07/11/2010	6,150	71,100	2,020
15	14/01/1996	5,480	63,500	1,800

Durante los tres días (7, 8 y 9 de diciembre de 2010) de este evento meteorológico, se vertió del embalse Gatún (compuertas más alcantarillas), por emergencia de inundación, un volumen total de agua igual a 1089 Mmc ó 38442 Mpc ó 289000 millones de galones que representan 5254 esclusajes, (Ver Cuadro 27). Si se compara con el número promedio de tránsitos de buques al año, que son aproximadamente 14000, los tres días consecutivos de vertidos equivalen a un 38% de los tránsitos en un año normal.

Cuadro 27 Volumen vertido del embalse Gatún, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

Caudal de salida promedio diario del 7 al 9 de dic 2010

Embalse Gatún

Salidas	Volumen total en los tres dias (Mpc)	Caudal promedio en los tres días (pie^3/s)	Caudal promedio en los tres días (m^3/s)
Compuertas	35,510	137,000	3,880
Alcantarillas PMG	1,641	6,330	179
Alcantarillas GAT	1,291	4,980	141
Esclusajes GAT&PMG	248	957	27
Hidrogeneración GAT	332	1,280	36
Municipal	162	625	18
Total	39,184	151,172	4,281

El total vertido por el vertedero de Gatún hacia el mar Caribe durante el mes de diciembre de 2010 fue de 2719 Mmc (96000 Mpc). Presumiendo que el volumen de agua desalojado se pudiese almacenar y tener disponible para su uso cuando se necesite, ese volumen equivaldría a 12351 tránsitos a través del Canal (55 Mg/tránsito) o sea casi un año en operación.

Para el caso del vertedero de Madden, del 7 al 9 de diciembre de 2010, se abatieron las cuatro compuertas de tambor, de operación simultánea, desde una cota de 76.78 m (251.9 pies) a 71.63 m (235.00 pies) PLD, para un caudal de salida máximo en una hora de 4422 m^3/s (156265 pie^3/s = 4200 millones de galones), el 8 de diciembre de 2010 a las 13:00 h. En el caudal de salida máximo se incluyen los usos por generación de energía y municipal en una hora, los cuales representan solo el 2% del total. En el cuadro 28 se da un resumen de los componentes del caudal de salida máximo en una hora.

Cuadro 28 Vertido máximo en una hora en Madden (a las 13:00 h del 8 dic 2010).

Caudal de salida máximo en una hora durante la tormenta

Embalse Alhajuela

Salidas	Volumen máx en una hora (Mpc)	Caudal máx en una hora (pie^3/s)	Caudal máx en una hora (m^3/s)
Compuertas de tambor	551	153,000	4,330
Hidrogeneración Madden	10.4	2,900	82
Municipal	1.31	365	10
Total	563	156,265	4,422

Durante los tres días de la tormenta, se vertió por las compuertas de la presa Madden un volumen de agua igual a 435 Mmc o 15357 Mpc o 114915 millones de galones, ver Cuadro 29.

Cuadro 29 Vertido en tres días del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

	Embalse Alhajuela	
Salidas	Volumen total en los tres días (Mpc)	Caudal de salida promedio en los tres días (pie3/s)
Compuertas	15,357	59,249
Hidrogeneración MADDEN	843	3,251
Municipal	183	705
Total =	16,383	63,205

El nivel máximo de agua alcanzado por el embalse Alajuela durante este evento fue de 78.52 m (257.60 pies) PLD, registrado el 8 de diciembre a las 15:59 h (Figura 84), que ocupa la posición número dos del registro. El récord histórico alcanzado por el embalse Alajuela fue de 78.59 m (257.87 pies) PLD, registrado el 20 de diciembre de 1983. El aporte máximo en una hora fue de 6258 m^3/s (221000 pcs) ocurrido a las 11:00 h del 8 de diciembre de 2010. En la misma figura se muestran los hidrogramas de los aportes, vertidos (salidas) y elevaciones del embalse Alajuela para la tormenta “La Purísima 2010”, y en la figura 85, el diagrama con la operación de las compuertas del vertedero de Madden del 7 al 9 de diciembre de 2010.

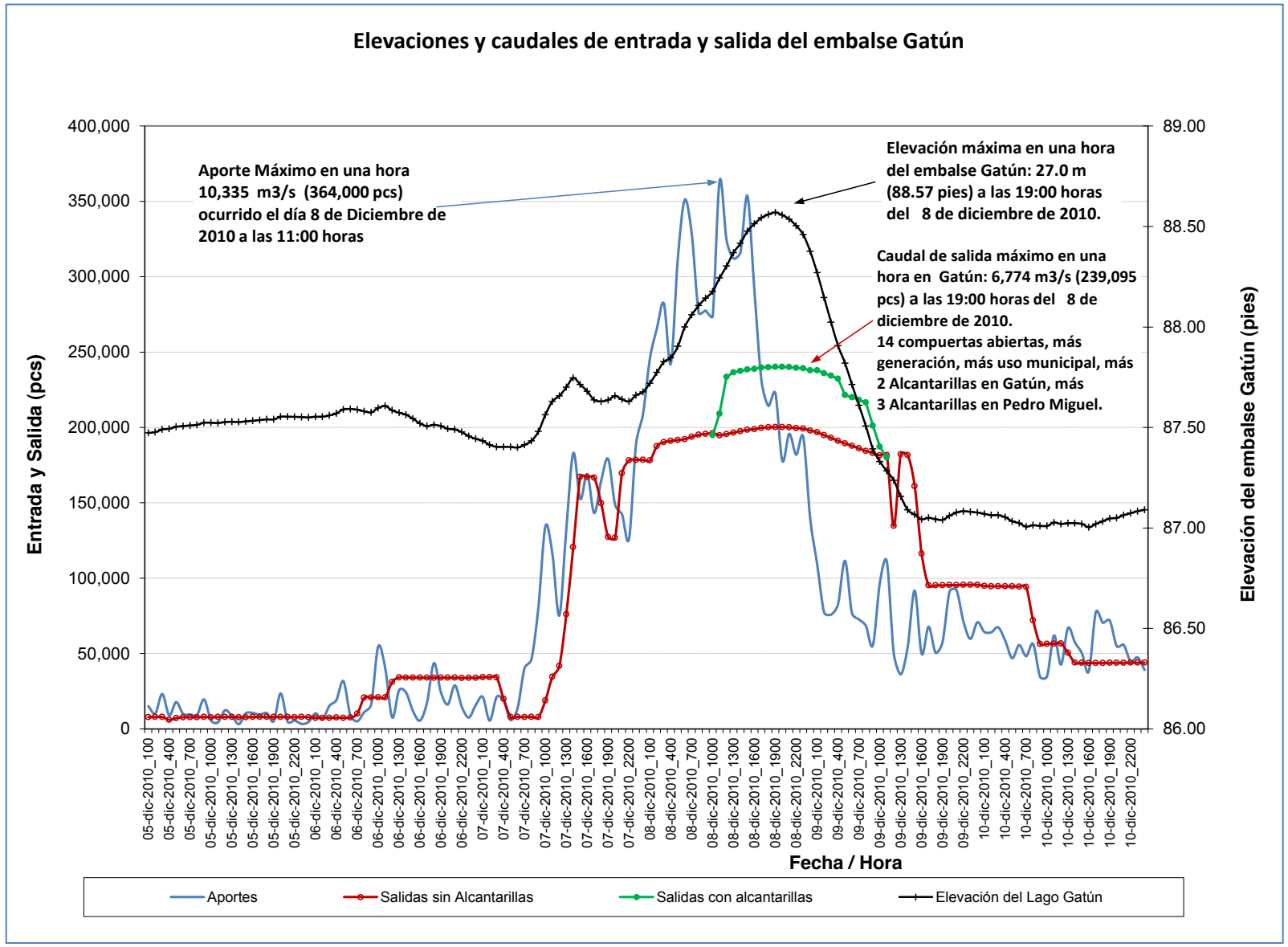


Figura 83 Hidrogramas de caudales de entrada y salidas, y elevaciones del embalse Gatún, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

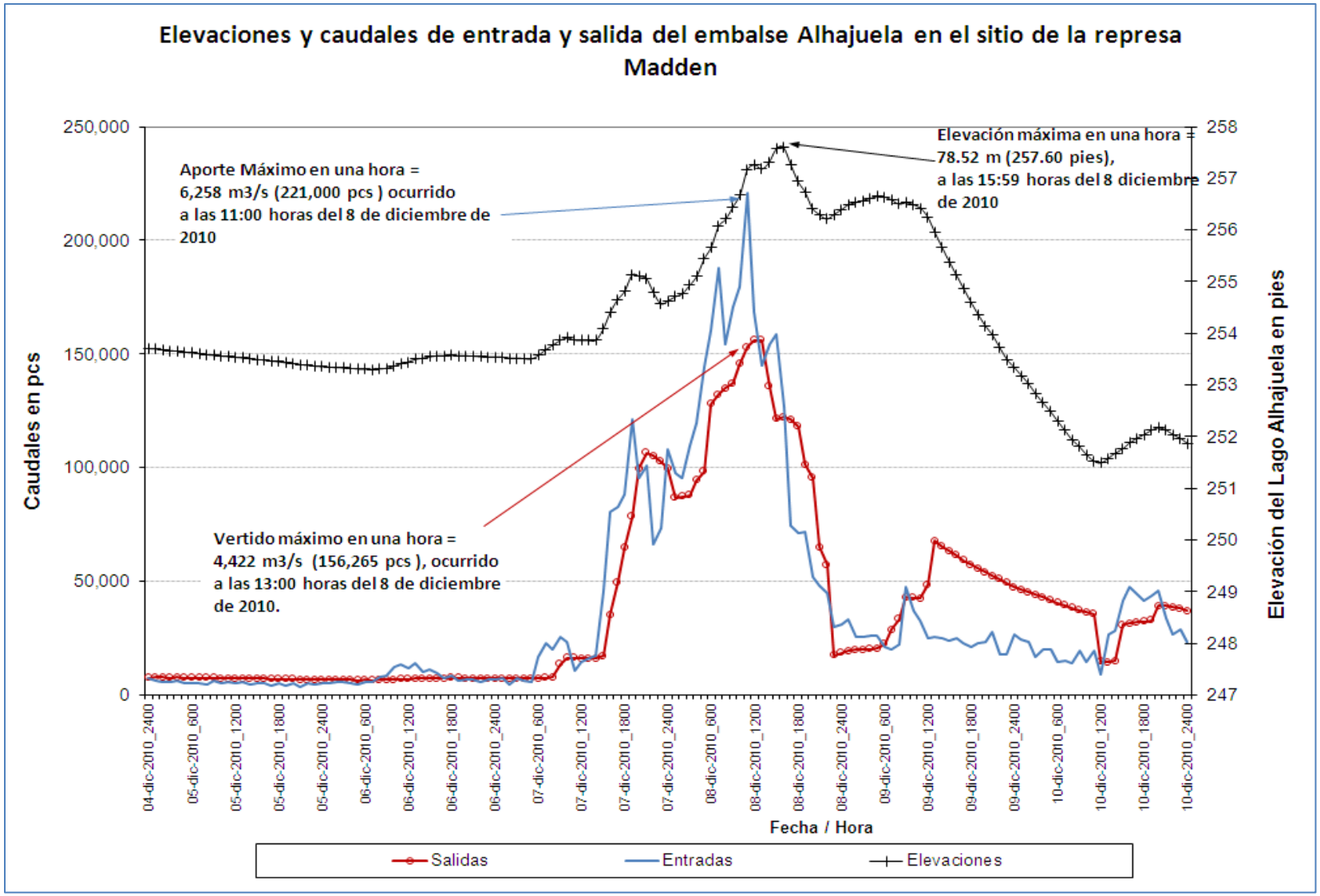


Figura 84 Hidrogramas de elevaciones y caudales de entrada y salida del embalse Alajuela, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

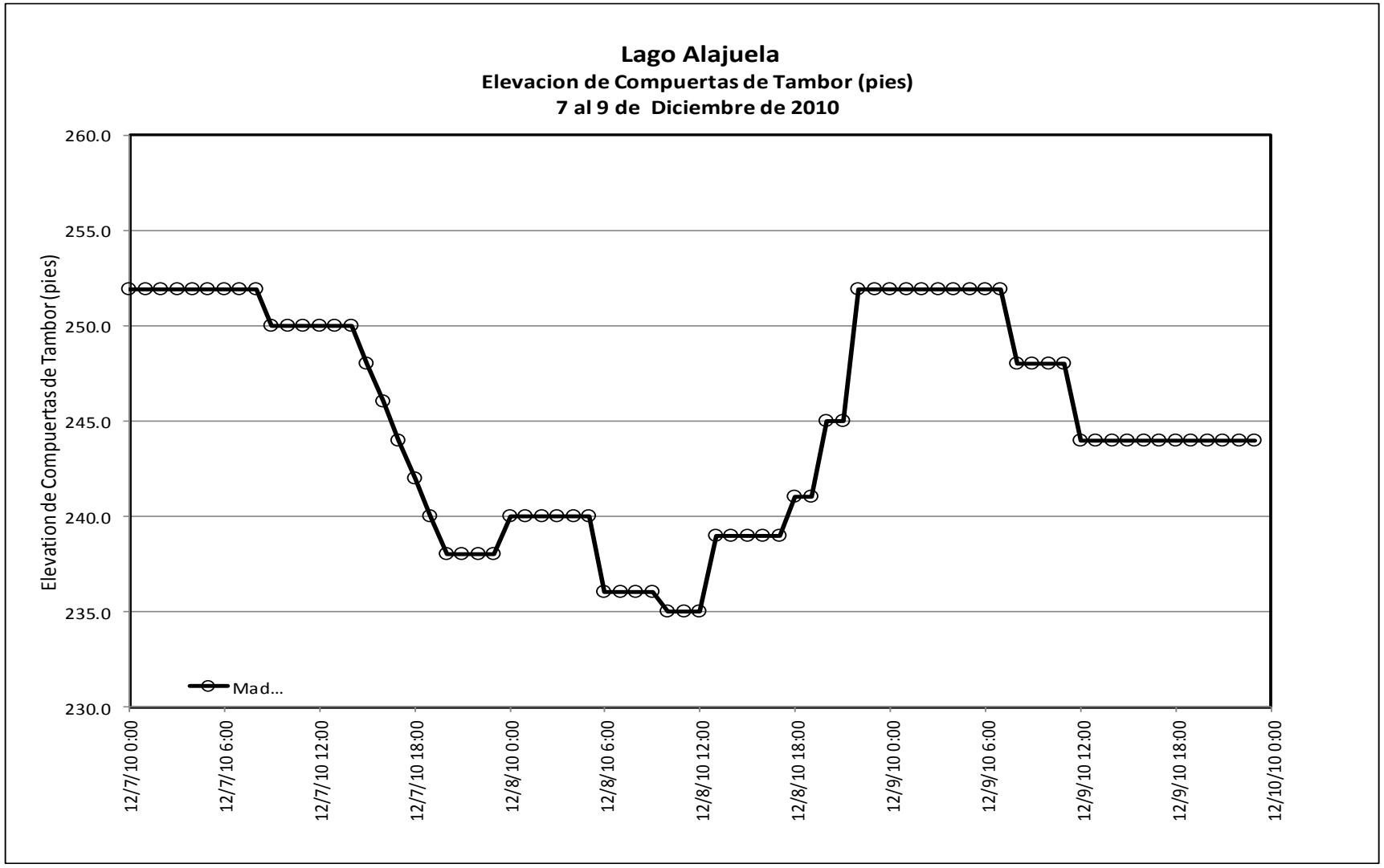


Figura 85 Diagrama con la operación de las compuertas del vertedero de Madden, del 7 al 10 de diciembre de 2010.

7.5 Alcantarillas de las esclusas de Gatún

Las esclusas de Gatún cuentan con tres alcantarillas (una central y dos laterales) que tienen una capacidad de 255 m^3/s (9000 pie^3/s) cada una para un total de 765 m^3/s (27000 pie^3/s).

La operación de vertidos de emergencia por las esclusas de Gatún se realizó a través de dos (2) alcantarillas laterales e inició el 8 de diciembre a las 10:45 h para una descarga de 510 m^3/s (18000 pie^3/s). Una de las alcantarillas se mantuvo abierta un total de 17:25 h y la otra 22:65 h para una descarga total de 36.5 Mmc (1290 Mpc).

En el cuadro 30 se presenta la fecha y horas de operación de las alcantarillas de las esclusas de Gatún.

Cuadro 30 Vertidos por las alcantarillas de las esclusas de Gatún los días 8 y 9 de diciembre de 2010.

Alcantarillas	Caudal (pie^3/s)	Fecha / Hora		Total de horas / día		Total horas	Volumen (Mpc)	
		8 de dic	9 de dic	8 de dic	9 de dic		8 de dic	9 de dic
1	9000	10:45	04:00	13.25	4	17.25	429	130
1	9000	10:45	09:24	13.25	9.4	22.65	429	305
	18000						859	434
						Total=	1290	

7.6 Alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel

La operación de desalojo de emergencia de agua a través de las alcantarillas de Pedro Miguel empieza el 8 de diciembre a las 10:22 h con la apertura de las tres alcantarillas para un total de 595 m^3/s (21000 pie^3/s =3 x 7 000 pie^3/s c/u). Dos alcantarillas se mantuvieron abiertas 21.97 h y la otra 21.05 h, para una descarga total en los dos días de 46.4 Mmc (1640 Mpc). En el cuadro 31 se presenta la fecha y horas de operación de las alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel.

Cuadro 31. Vertidos por las alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel los días 8 y 9 de diciembre de 2010.

Alcantarillas	Caudal (pie^3/s)	Fecha / Hora		Total de horas / día		Total horas	Volumen (Mpc)	
		8 de dic	9 de dic	8 de dic	9 de dic		8 de dic	9 de dic
2	14000	10:22	08:20	13.32	8.65	21.97	671	436
1	7000	11:17	08:20	12.4	8.65	21.05	313	218
	21000						984	654
						Total=	1640	

La descarga máxima en una hora por las alcantarillas por ambas esclusas fue de 1104 m^3/s (39000 pie^3/s) que es equivalente a tres compuertas adicionales abiertas del vertedero de Gatún.

7.6.1 Operación de vertidos en el embalse de Miraflores el 7 y 8 de diciembre de 2010

Para controlar el aumento del nivel del embalse Miraflores el 8 de diciembre de 2010, el cual alcanzó una elevación de 16.88 m (55.39 pies), debido principalmente al agua proveniente de la operación de vertido de las tres alcantarillas de las esclusas de Pedro Miguel. Las alcantarillas se operaron simultáneamente, entre las 10:50 y las 15:20 h; también se operaron siete (7) compuertas del vertedero de Miraflores abiertas parcialmente, seis (6) a cinco (5) pies y una (1) a un pie de apertura, para un vertido máximo de 634 m^3/s (22387 pie^3/s), entre las 11:00 y 12:00 h.

En total se vertieron al océano Pacífico, por este vertedero, durante esos días 22.7 Mmc (801 Mpc), lo que equivale a un volumen de agua aproximado requerido para 109 esclusajes. Véase cuadro 32.

Cuadro 32 Descarga de las compuertas de Miraflores durante los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2010.

AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ

DIVISIÓN DE AGUA

SECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Vertidos de las compuertas en Miraflores, 7 y 8 de diciembre de 2010

Elevación del sello de la compuerta 39.9´ PLD

Fecha	Tiempo			Compuertas abiertas	*Apertura compuerta	Nivel Promedio	Vertido Promedio	Volumen Total	Total del día		Vertido en una hora
	Inicial	Final	Total						Volumen	Vertido	
(dd/mm/aaaa)	(hhmm)	(hhmm)	min		(pies)	(pies)	pie^3/s	Mpc	Mpc	pie^3/s	pie^3/s
07/12/2010	1136	1136	0.38	4	4 (1)	54.65	1278	0.029	0.029	0.337	
	1136	1200	23.62	4	4 (1)	54.65	2556	3.62	3.65	42.3	1014
	1200	1300	60	4	4 (1)	54.55	2548	9.17	12.8	148	2548
	1300	1400	59.62	4	4 (1)	54.58	2550	9.12	21.9	254	
	1400	1400	0.38	4	4 (1)	54.58	1275	0.029	22.0	254	2542
	1400	1500	60	0	0	54.45	0.000	0.000	22.0	254	0.000
	1500	1600	60	0	0	54.61	0.000	0.000	22.0	254	0.000
	1600	1700	60	0	0	54.70	0.000	0.000	22.0	254	0.000
	1743	1743	0.38	2	2 (1)	55.30	653	0.015	22.0	255	
	1743	1800	16.62	2	2 (1)	55.30	1306	1.30	23.3	270	366
	1800	1900	60	2	2 (1)	55.30	1308	4.71	28.0	324	1308
	1900	2000	60	2	2 (1)	55.30	1309	4.71	32.7	379	1309
	2000	2100	60	2	2 (1)	55.30	1307	4.70	37.4	433	1307
	2100	2200	60	2	2 (1)	55.30	1300	4.68	42.1	487	1300
	2200	2300	60	2	2 (1)	55.30	1305	4.70	46.8	542	1305
	2300	2400	60	2	2 (1)	55.30	1303	4.69	51.5	596	1303
			701			**Esclusajes**	**Millones Gls. USA**	**Millones m^3**	**Mpc**		**Miles pie^3/s**
TOTAL						**7.00**	**385**	**1.46**	**51.46**	Promedio =	**0.596**

FECHA	TIEMPO			Compuertas abiertas	*Apertura Compuerta	Nivel Promedio	Vertido Promedio	Volumen Total	Total del día		Vertido en una hora
	INICIO	FINAL	Total						Volumen	Vertido	
(dd/mm/aaaa)	(hhmm)	(hhmm)	min		(pies)	(pies)	pie^3/s	Mpc	Mpc	pie^3/s	pie^3/s
08/12/2010	0	100	60	2	2 (1)	54.86	655	2.36	2.36	27.3	655
	100	200	60	2	2 (1)	55.38	1309	4.71	7.07	81.8	1309
	200	300	60	2	2 (1)	55.18	1301	4.68	11.8	136	1301
	300	400	60	2	2 (1)	54.51	1272	4.58	16.3	189	1272
	400	500	60	2	2 (1)	54.40	1267	4.56	20.9	242	1267
	500	600	60	2	2 (1)	54.88	1288	4.64	25.5	296	1288
	600	700	60	2	2 (1)	55.23	1303	4.69	30.2	350	1303
	700	800	60	2	2 (1)	54.63	1277	4.60	34.8	403	1277
	800	900	60	2	2 (1)	54.58	1275	4.59	39.4	456	1275
	900	921	20.62	2	2 (1)	54.24	1260	1.56	41.0	474	
	921	921	0.38	2	2 (1)	54.24	630	0.014	41.0	474	
	931	931	0.38	4	4 (1)	54.10	1254	0.029	41.0	475	
	931	944	12.62	4	4 (1)	54.10	2508	1.90	42.9	497	
	944	944	0.38	6	6 (1)	54.10	3135	0.071	43.0	498	
	944	1000	15.62	6	6 (1)	54.36	3797	3.56	44.6	516	1981
	1000	1038	38	6	6 (1)	54.98	3877	8.84	53.4	618	
	1038	1039	1.53	6	3 (1) - 3 (5)	55.39	7506	0.689	54.1	626	
	1039	1049	9.47	6	3 (1) - 3 (5)	55.39	13046	7.41	60.8	704	
	1049	1050	1.53	7	1 (1) - 6 (5)	55.36	17261	1.58	55.7	645	
	1050	1100	9.47	7	1 (1) - 6 (5)	55.36	22796	13.0	73.8	854	8744
	1100	1200	60	7	1 (1) - 6 (5)	54.81	22387	80.6	154	1787	22387
	1200	1300	60	7	1 (1) - 6 (5)	54.27	21978	79.1	233	2702	21978
	1300	1400	60	7	1 (1) - 6 (5)	54.10	21847	78.7	312	3613	21847
	1400	1500	60	7	1 (1) - 6 (5)	53.99	21762	78.3	390	4520	21762
	1500	1519	17.47	7	1 (1) - 6 (5)	54.21	21932	23.0	413	4786	
	1519	1520	1.53	7	1 (1) - 6 (5)	54.21	10966	1.01	414	4797	
	1520	1543	24	4	4 (1)	54.61	2553	3.68	417	4828	
	1543	1544	1.53	7	3 (1) - 4 (5)	55.24	8329	0.765	415	4806	
	1544	1600	15.47	7	3 (1) - 4 (5)	55.24	16659	15.5	433	5007	12194
	1600	1615	15	7	3 (1) - 4 (5)	55.32	16702	15.0	448	5181	
	1615	1700	45	7	2 (1) - 5 (5)	55.21	19664	53.1	501	5796	18924
	1700	1800	60	7	2 (1) - 5 (5)	54.78	19386	69.8	517	5989	19386
	1800	1900	60	7	2 (1) - 5 (5)	54.37	19117	68.8	586	6785	19117
	1900	1943	43	7	2 (1) - 5 (5)	54.15	18971	48.9	635	7352	
	1943	2000	17	5	5 (5)	54.13	17702	18.1	653	7561	18611
	2000	2036	34.47	5	5 (5)	54.27	17789	36.8	690	7987	
	2036	2037	1.53	5	5 (5)	54.27	8895	0.817	691	7996	
	2037	2100	0	0		54.27		0.000	691	7996	10447
			1166			**Esclusajes**	**Millones Gls. USA**	**Millones m^3**	**Mpc**		**Miles pie^3/s**
TOTAL	* Número de compuertas (apertura en pies)					**102**	**5610**	**21.2**	**750**	Promedio =	**8.68**

7.7 ZONAS DE DECISIÓN PARA EL CONTROL DE LOS EMBALSES

En la figura 86 se presenta el diagrama de zonas de decisión para control de inundaciones, con el registro de las operaciones que se realizaron durante la tormenta “La Purísima 2010” del 6 al 10 de diciembre de 2010. Se puede apreciar en la figura que las operaciones comenzaron el 6 de diciembre con el embalse Gatún a 87.55 pies de elevación incursionando en la zona F y el día 8 de diciembre de 2010, entre las 18:00 y 19:00 h alcanzó la elevación récord de 88.57 pies.

Según el diagrama, el límite inferior de la zona A representa una capacidad de almacenamiento para control de inundaciones de 1020 millones de m3 (36 billones de pies cúbicos) entre ambos embalses (Gatún y Alajuela), la cual es suficiente para contener la Crecida Máxima Probable (CMP) calculada por el Cuerpo de Ingenieros Militares de Estados Unidos, si se realizan de manera oportuna operaciones de vertidos con relación a los niveles de los embalses.

El límite inferior de la zona B representa 991 millones de m^3 (35 billones de pies cúbicos) de capacidad de almacenamiento para control de inundaciones. Sin embargo, para poder controlar una CMP, se requiere una respuesta rápida y efectiva a los eventos de precipitación que son mostrados por el radar meteorológico.

El límite inferior de la zona D representa 878 millones de m^3 (31 billones de pies cúbicos) de capacidad de almacenamiento para control de inundaciones. Ya no es posible contener la CMP. La operación de vertidos es necesario empezarla por adelantado, antes que se presenten las lluvias. Cuando los niveles de los embalses alcanzan la zona F, se necesita una vigilancia muy rigurosa y una respuesta rápida a cualquier evento.

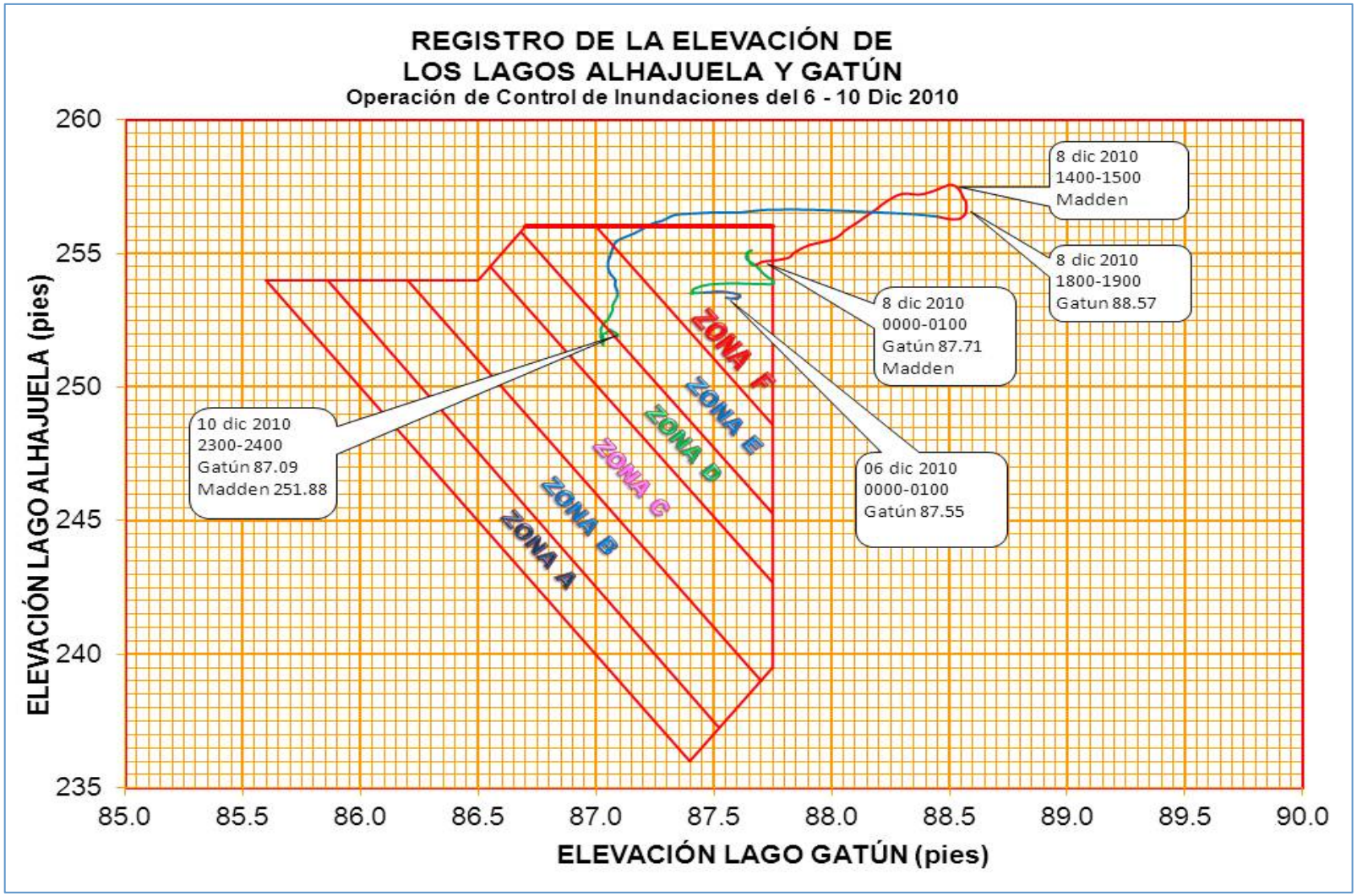


Figura 86 Diagrama de zonas de decisión con la operación de control de Inundaciones realizada desde el 6 al 10 de diciembre de 2010.

7.8 Afectaciones causadas por las operaciones de vertido durante la tormenta extrema "La Purísima 2010"

Considerando la gran operación de desalojo de agua que se realizó por todas las instalaciones disponibles para operaciones normales y de emergencia para control de inundaciones del Canal de Panamá, para los tres días de duración de la tormenta "La Purísima 2010", se considera que las afectaciones a las estructuras del Canal y a las comunidades no fueron severas. (Ver figuras de la 87 a la 90)

Las operaciones del vertedero de Gatún generaron afectaciones menores a propios y a terceros:

- Cierre temporal e intermitente del puente vehicular sobre el canal de descarga que comunica las poblaciones de la costa abajo (al norte del país) con la ciudad de Colón
- Cierre preventivo de las unidades generadoras No. 5 y No. 6 de la central hidroeléctrica de Gatún
- Daños menores a las alcantarillas de las esclusas de Gatún
- Inundación en la planta hidroeléctrica.

Para las operaciones del vertedero de Madden, las afectaciones consistieron en:

- Inundaciones a varias casas localizadas en áreas operativas del Canal de Panamá, las cuales son las planicies de inundación del río Chagres, en las poblaciones de Santa Rosa y Guayabalito, donde solamente hubo pérdidas materiales (enseres, electrodomésticos, muebles, etc.)
- Afectación de la estación telemétrica Santa Rosa, la cual hubo que desmontar para evitar daños al equipo
- Erosión del cauce y las riberas aguas abajo del dedo gordo de la represa de Madden

  Todas las operaciones se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos dentro del Manual de Control de Inundaciones de la sección de Recursos Hídricos, que contemplan avisos oportunos de evacuación y el seguimiento fiel de esta acciones y según lo estipulado en el Plan de Gestión de Riesgos Comunitarios de Santa Rosa y Guayabalito y los simulacros realizados, en los ejercicios anuales de control de inundaciones que evitaron la pérdida de alguna vida de los residentes de estas dos comunidades
- Vertido máximo en una hora de 156000 pies cúbicos por segundo (4420 m^3/s) desde Madden, con este caudal en dos segundos se llenarían tres piscinas olímpicas
- Cierre parcial del tránsito por la autopista Panamá- Colón Alberto Motta en el tramo del puente del río Chagres

- Afectación en la marina del hotel Gamboa Resort por arrastre de vegetación producto de las operaciones de vertido realizadas en la represa Madden
- Desechos arrastrados por la corriente y dejados en el cauce de navegación en el área de Gamboa
- La necesidad de la reprogramación de los tránsitos de buques por el Canal debido a la suspensión temporal del tránsito de estos por 17 horas.

Aguas arriba de la represa de Madden:

- Pérdida de sensores de la estación de telemetría Chico en el río Chagres debido a la crecida extraordinaria de este río
- Inundación pasiva de tres viviendas en la población de Nuevo Vigía, a orillas del embalse Alajuela
- Más de 500 deslizamientos de tierra en la parte alta de la cuenca del río Chagres que provocaron el movimiento de suelo y caída de árboles
- Aumento inédito de la turbiedad del embalse Alajuela producto de la gran cantidad de sedimentos arrastrados hacia el embalse
- Palizada dejada por los deslizamientos de tierra que arrastraron gran cantidad de árboles al embalse.

El principal impacto causado por el movimiento, transporte e ingreso de sedimentos desde los ríos al embalse Alajuela, fue la alta turbiedad en el agua cruda que provocó la reducción significativa de la producción de agua potable en la planta potabilizadora Federico Guardia Conte. Esta ha sido la mayor crisis en la historia de la planta potabilizadora, la reducción de la producción de agua potable causó el desabastecimiento en la ciudad de Panamá y alrededores por aproximadamente 60 días, situación que obligó al Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (Idaan) a tomar acciones para entregar agua a través de camiones cisterna. El impacto en la economía familiar fue significativo, ya que obligó a la población a comprar agua embotellada y muchos comercios de expendio de comida tuvieron que reducir su operación drásticamente.

Otro impacto fue en la potabilizadora de Miraflores, la cual tuvo que salir temporalmente de servicio por 18 horas desde las 2:00 p.m. del 13 hasta la 5:00 a.m. del 14 de diciembre. La acumulación de lodos redujo la capacidad del tiempo de detención en los sedimentadores.

En cuanto a afectaciones de instalaciones y áreas operativas de la ACP, una de las más recurrentes fue la necesidad de evitar que la vegetación arrastrada por el vertido de Madden alcanzara el curso navegable del Canal a la altura de Gamboa.

Con respecto al proyecto de ampliación, no se tienen informes de afectaciones significativas que impactaran al proyecto. Solo se registraron inundaciones en la carretera que conduce hacia

las esclusas de Gatún en el sector Atlántico, lo que motivó la suspensión temporal del paso de vehículos.

No obstante todas las afectaciones descritas, las operaciones de desalojo realizadas a través de los vertederos de la ACP garantizaron la salvaguarda de bienes y vidas a propios y terceros, así como la confiabilidad operativa y la seguridad estructural de las instalaciones del Canal de Panamá.

Figura 87 Casas localizadas en Santa Rosa, aguas abajo de la represa Madden, afectadas por los vertidos, 8 de diciembre de 2010.

Figura 88 Santa Rosa, una de las comunidades afectadas por los vertidos, 9 de diciembre de 2010.

Figura 89 Estación telemétrica Santa Rosa, afectada por la tormenta “La Purísima 2010”.

Figura 90 Casa ubicada en el poblado de Guayabalito, afectada por los vertidos de Madden, 8 de diciembre de 2010.

Figura 91 Rastros de crecida en la estación río Chagres Chico, diciembre de 2010.

8 NIVELES MÁXIMOS ALCANZADOS POR EL RÍO CHAGRES EN LOS POBLADOS DE SANTA ROSA Y GUAYABALITO DURANTE LA TORMENTA LA PURÍSIMA

8.1 Localización de las comunidades de Santa Rosa y Guayabalito

Las comunidades de Guayabalito y Santa Rosa se encuentran ubicadas en la margen derecha del río Chagres, entre 5.7 a 7.7 km aguas abajo de la presa Madden, respectivamente. En la figura 92 se presenta la localización de estas comunidades.

Uno de los problemas identificados dentro del Programa de Control de Inundaciones, cuando se requieren hacer vertidos desde la presa de Madden, son las amenazas de inundación en las comunidades antes mencionadas. Por esta razón, a partir del año 2005, previamente identificadas las comunidades vulnerables a la amenaza de inundación, el Programa de Control de Inundaciones solicitó el apoyo de la Unidad de Relaciones con la Comunidad de la División de Ambiente y al Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc) para elaborar un Plan de Gestión de Riesgo Comunitario para dichas poblaciones.

El proceso involucró la participación de las autoridades locales y de los moradores de las comunidades en el análisis de los riesgos por medio de talleres participativos y a través de entrevistas individuales a líderes comunitarios. Uno de los objetivos fue el levantamiento de la información histórica sobre inundaciones ocurridas en la zona o sus alrededores, y por otra parte la integración de la comunidad en la definición y ejecución de las recomendaciones, como por ejemplo la participación en los comités de prevención y/o emergencia, salud, etc.

El programa estableció metas a corto y mediano plazo, con reuniones iniciales con los residentes de las comunidades para lograr su sensibilización y el apoyo a los esfuerzos por llevar a cabo la elaboración del plan. La participación de las comunidades fue decisiva en el éxito del Plan de Gestión de Riesgo Comunitario. Logrado el primer objetivo, se procedió a realizar el levantamiento topográfico del área, que incluía, entre sus tareas, la demarcación con hitos de la cota 100 pies PLD, un censo de las casas y sus habitantes, seminarios y talleres de riesgo por parte de la ACP y Sinaproc y simulacros de desalojo por inundación.

En el año 2007, la sección de Recursos Hídricos realizó la modelación hidráulica del tramo aguas abajo de la represa Madden hasta la comunidad de Santa Rosa, usando como base las secciones transversales del estudio de Rompimiento de Presa, realizado por la empresa Riverside Technology, inc, para la Comisión del Canal de Panamá, en marzo de 1999. El área de Santa Rosa y Guayabalito fue actualizada con tres secciones transversales, en 2007.

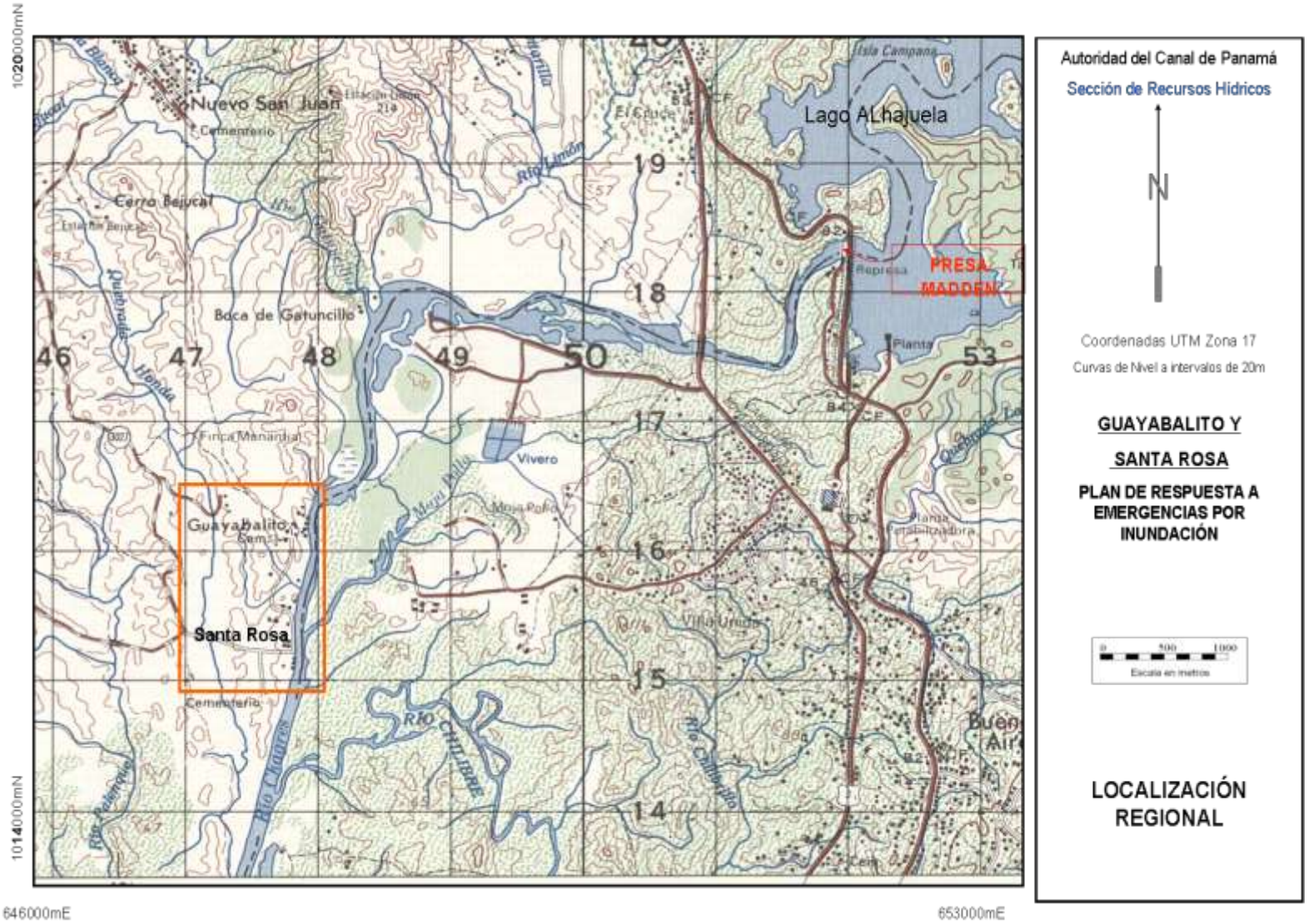


Figura 92 Localización regional de los poblados de Santa Rosa y Guayabalito. Planicies de inundación en los poblados de Santa Rosa y Guayabalito.

La sección de Recursos Hídricos desarrolló un Manual de Respuesta a Emergencias y el mapa de planicies de inundación actualizado, para los poblados de Santa Rosa y Guayabalito que define las planicies de inundación para diferentes descargas y las viviendas e infraestructuras que podrían afectarse. En el cuadro 33 y la figura 93 se presentan los niveles simulados que podría alcanzar el agua según el volumen de la descarga desde el vertedero de Madden, para descargas, en m^3/s (p^3/s): 2124 (75000), 2265 (80000), 2350 (83 000), 2832 (100000), 3540 (125000), 4248 (150000), 4531 (160000), 4814 (170000), 5663 (200000) y 7079 (250000) año 2009. Estos niveles fueron generados mediante el modelo hidráulico HEC-RAS en 2009.

Nivel medio de las elevaciones del agua en el río Chagres, simulados con HEC-RAS, los vertidos realizados desde Madden entre el 7 y el 9 de diciembre de 2010, sobrepasaron los 4248 m^3/s (150000 pie^3/s) máximo en una hora, inundando a ambas comunidades debido a los altos niveles de agua alcanzados.

Cuadro 33. Elevación media de las planicies de inundación según el caudal de descarga desde el vertedero de Madden en el río Chagres, tramo entre Guayabalito y Santa Rosa según el modelo HECRAS, año 2009.

Vertidos desde Madden	m^3/s	2124	2832	3540	4248	5663	7079
	pie^3/s	75000	100000	125000	150000	200000	250000
Planicie de inundación media	m	30	31	32	33	35	36
	pie	98.4	101.7	105.0	108.2	114.8	118.08

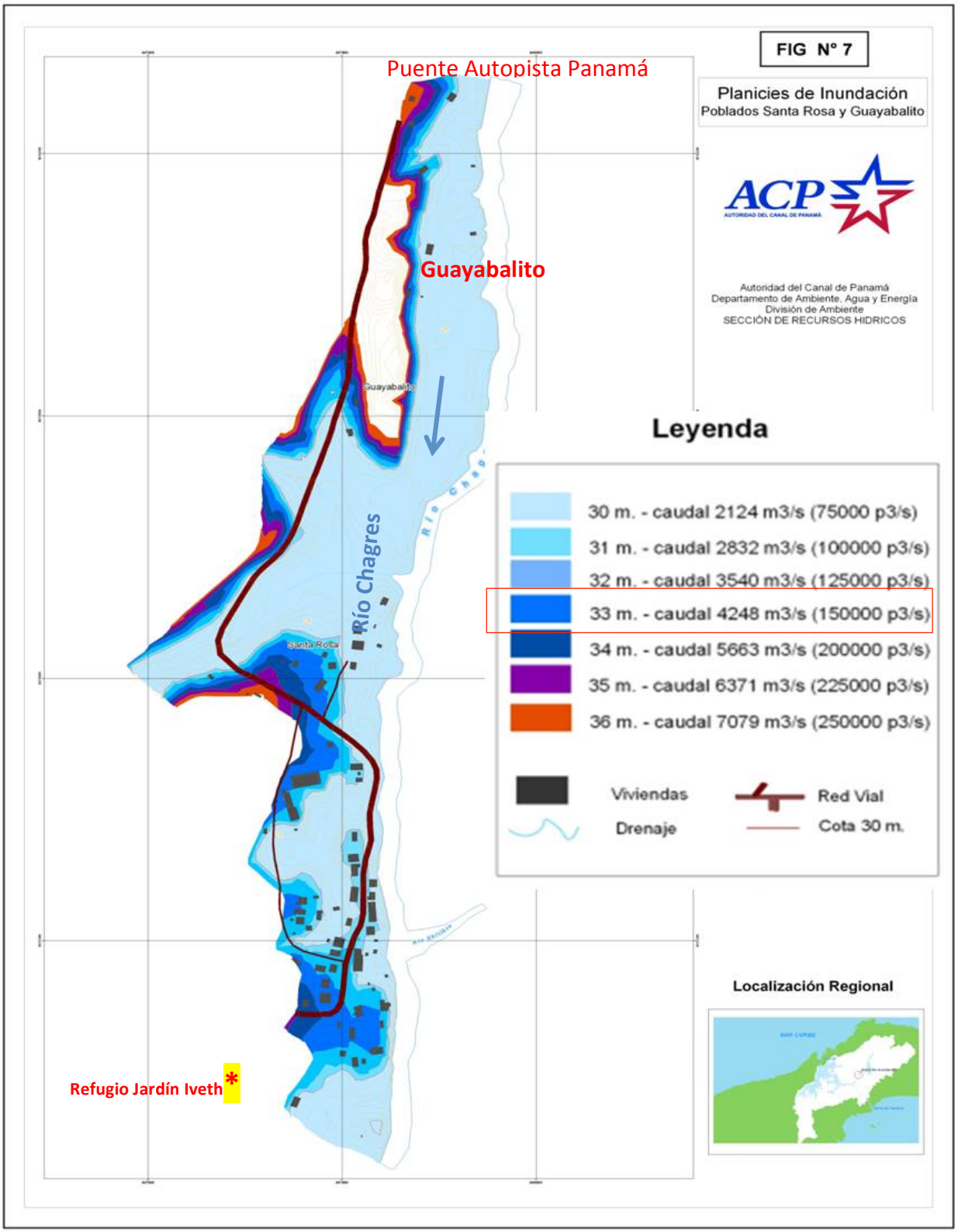


Figura 93 Niveles medios de las elevaciones del agua en el río Chagres, simulados con HEC-RAS.

8.2 Inspección al sitio

El 22 de diciembre de 2010 un equipo técnico de la sección de Recursos Hídricos (EAAR), encabezada por el gerente y conformada por los hidrólogos, meteorólogos y técnicos hidrólogos, realizó una inspección en sitio del área afectada en las poblaciones de Guayabalito y Santa Rosa. El objetivo de la inspección fue recopilar toda información relacionada con la crecida del 8 de diciembre de 2010 proporcionada por los residentes, identificar en los poblados los niveles alcanzados por la crecida observando los rastros dejados por el agua y hacer un levantamiento de esos puntos en el terreno, que posteriormente fueron comparados con los resultados de la modelación hidráulica (ver figuras 94 y 95).

Se hizo un recorrido por el área y se entrevistó a las personas que permanecieron en sitio durante la crecida y que observaron los niveles alcanzados. Se incluyó a lugareños y al personal de la Unidad de Hidrología Operativa (EAAR-HO) que estuvieron en el área apoyando a las comunidades el día de las inundaciones, Rosendo Moreno, José Asprilla, Roberto Rodríguez y Luis Martéz, para que identificaran algunos puntos específicos en el terreno y ayudaran en la señalización de marcas. Se utilizaron los datos de las casas afectadas para verificar las planicies de inundación.

Se efectuó una nivelación topográfica de los puntos específicos, con el apoyo de los GPS y los mapas topográficos, utilizando como referencia los controles verticales correspondientes a la base de los hitos, que son tubos pintados de amarillo que señalizan y delimitan la cota 30.48 m (100 pies) PLD, que EAAR estableció en las comunidades. El mismo procedimiento se realizó en la estación hidrometeorológica de Santa Rosa, en donde se verificó la marca de crecida señalizada en la pared nivelándola con el BM de la estación.

Se efectúo también una nivelación topográfica del Jardín Ibeth para conocer la elevación exacta del sitio, ya que es el albergue asignado en caso de inundaciones para la comunidad de Santa Rosa y fue el sitio utilizado en los días de “La Purísima 2010”.

Figura 94 Inspección por hidrólogos y meteorólogos de la sección de Recursos Hídricos en sitio del área afectada, cerca del puente sobre el río Chagres de la autopista Panamá-Colón, 22 de diciembre de 2010.

Figura 95 Determinación del nivel máximo alcanzado por las aguas en la estación Santa Rosa por el personal de la sección de Recursos Hídricos, Luis Martéz detrás del nivel topográfico, Gerardo Leis verificando con los mapas, José Asprilla con la mira y Ajax Murillo en la puerta de la estación, 22 de diciembre de 2010.

8.3 Resultados de la modelación

La elevación máxima alcanzada por el río Chagres durante el evento "La Purísima 2010" medido en algunos puntos específicos, de acuerdo con la información de los residentes, se detalla en el cuadro 34.

Los niveles de inundación en Guayabalito llegaron a 32.14 m (105.44 pies) 31.7 m (104.2 pies) y 33.3 m (100.2 pies), que son muy similares a los estimados por el modelo HEC-RAS y plasmado en el mapa de planicie de inundación (Figura 94) con una diferencia promedio de ±0.15m (±0.5 pies). En forma similar, en Santa Rosa los niveles alcanzaron los 32.14 m (105.41 pies) y 32.2 m (105.6 pies).

El cuadro 35 muestra que el refugio de la población de Santa Rosa (Jardín Ibeth) tiene una elevación de 38.95 m (127.76 pies), es decir, casi 7 m sobre el nivel más alto de la crecida en Santa Rosa de 32.20 m (105.62 pies).

En el mismo cuadro 35 y figura 95 se observa que, la diferencia entre el nivel máximo de la crecida del 8 de diciembre de 2010 y el nivel de la superficie inferior de la viga en la margen izquierda del puente de la autopista Panamá-Colón (hacia la ciudad de Panamá) fue de 9.77 m, en la margen derecha (hacia Colón) la diferencia fue de 2.87 m, ya que el puente tiene una pendiente de 3% de la margen izquierda a la derecha. La superficie de rodadura del puente en la margen izquierda tuvo una diferencia de 12.73 m con respecto al nivel máximo de la crecida.

Cuadro 34 Niveles máximos alcanzados por río Chagres en las comunidades de Guayabalito y Santa Rosa durante el evento "La Purísima 2010", comparados con los simulados por el modelo hidráulico HEC-RAS.

Sitios	Nivel máximo (m)*	Nivel medio (m) (modelo HEC-RAS)	Diferencia (m)
Guayabalito*			
Parte alta	32.14	32.8	-0.66
Parte media	31.7	32.5	-0.8
Parte baja	33.3	32.3	1.0
Promedio	**32.38**	**32.53**	**-0.15**
Santa Rosa*			
Parte alta	32.2	32	0.2
Parte baja	32.14	32	0.14
Promedio	**32.17**	**32**	**0.17**
Puente de la autopista Panamá-Colón **	32.33	…….	…….

Nota: Niveles levantados en campo utilizando la cota 100 (hitos pintados de amarillo)

* Nivel según los pobladores.

**Nivel según testigos de EAAR-HO

Cuadro 35 Niveles máximos del río Chagres durante “La Purísima 2010”, comparados con algunos puntos del puente de la autopista Panamá-Colón y el refugio de Santa Rosa.

Sitios	Elevación (m)	Nivel de la crecida (m)	Diferencia (m)
Puente de la autopista Panamá-Colón:			
Rodadura margen izquierdo	45.07	32.33	12.73
Viga del puente a la margen izquierda	42.1	32.33	9.77
Viga del puente a la margen derecha	35.2	32.33	2.87
Refugio de la población de Santa Rosa (Jardín Ibeth)	38.95	32.20	6.75

Nota: Margen izquierdo: hacia la ciudad de Panamá
Margen derecho: hacia Colón

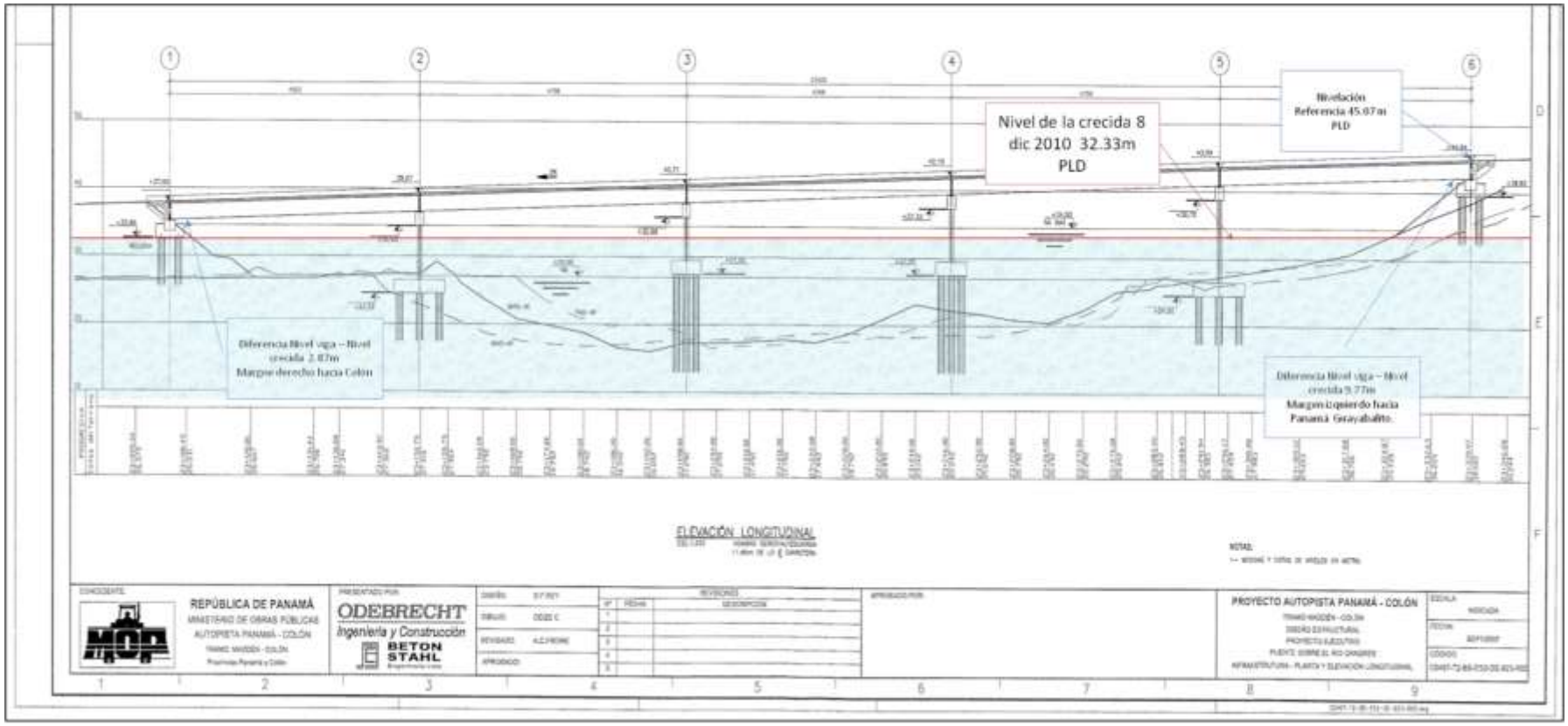


Figura 96 Niveles máximos del río Chagres y diferencia con algunos puntos importantes del puente de la autopista Panamá-Colón.

9 BIBLIOGRAFÍA:

- American Meteorological Society, Glossary of meteorology. 2nd edition. Boston, Massachusetts, 2000:
- American Meteorological Society, Glossary of Meteorology 638 pp, (R. E. Huschke, ed.), Boston, Massachusetts, 1959.
- Autoridad del Canal de Panamá, Panamá, Anuario Hidrológico 2009.
- Autoridad del Canal de Panamá, Aguas y bosques en la cuenca del Canal de Panamá: Tendencias a largo plazo, Panamá, 2010.
- Blunden, J., D.S.Ardnt, and M.O. Baringer, Amer. Meteor. Soc: State of the Climate in 2010. Bull. 92 (6), SI-S266, Eds., 2011
- Bureau of reclamation, United States Department of Interior. Design of Small Dams, third edition, USA, 1987.
- Burnash R. J. C., Ferral, R. L. and McGuire, R.A.: A generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modeling for Digital Computers. U.S. Department of Commerce, California, 1973.
- Chow Ven Te, Maidment David y Mays Larry. Hidrología aplicada, Editora McGraw Hill, primera edición. 1993.
- Chow Ven Te, "Hidráulica de canales abiertos": Editorial McGraw Hill. 1995.
- Dyahouse Gary, Hatchett Jennifer y Benn Jeremy. Floodplain Modeling Using Hec-Ras, Haestad Methods. Primera edición. Haestad Press, Warerbury, CT USA. 2003.
- Fernández, W y J.A: Barrantes, The Central American Temporal: A Long-lived tropical rain-producing system, Top. Meteor. Ocenanogr., 3 (2): 73-88. 1996.
- Galo, E.R., W. Fernández u E. Zárate. Efectos de meso escala del temporal del 29 de octubre al 3 de noviembre de 1985 sobre Costa Rica, Top. Meteor. Ocenogr., 3 (2): 125-139, 1996.
- Georgkakos K. P., E. Shamir, C. Spencer, F. M. Holly, J. Espinosa, A. Bal, M. Hart, Risk-Based Analysis of Gatun spillway Capacity After the Extreme Rainfall of Year 2010, 90pp.,*HRC Limited Distribution Report No. 36*, Hydrologic [Research Center, San Diego, CA, 29 August 2011.
- Germán Monsalve Sáenz. Hidrología en la Ingeniería, editorial Alfaomega, segunda edición. 1999.

- Jianzhong, W., E. Shamir, K. Georgkakos, Study of Extreme Precipitation over the Panama Canal Watershed, HRC Report No. 6, 158pp. Hydrologic [Research Center, San Diego, CA, 1 August 2007.

- Cuevas, Johnny A. Informe de "La operación de control de inundaciones durante la tormenta del 18, 19 y 20 de noviembre de 2004**.** Autoridad del Canal de Panamá, Panamá. 2005.

- Kaplan, A., Abstract, [in "State of the Climate in 2010"], Bull. Amer. Meteor. Soc., 92 (6), S16, 2011.

- Leis, G. y T. García, Modelación hidrológica de la crecida del río Chagres en la estación Chico el 8 de diciembre de 2010 con el modelo HEC-RAS, sección de Recursos Hídricos, División de Agua, Autoridad del Canal de Panamá, 2012.

- Linsley Ray, Kohler Max y Paulhus Joseph. Hidrología para ingenieros, editorial McGraw Hill, segunda edición, 1986.

- Linsley Ray y Franzini Joseph. Ingeniería de los recursos hidráulicos, editorial CECSA, tercera edición, 1984.

- Modesto Echevers. Control de inundaciones durante los días 30 y 31 de diciembre de 2000**,** Autoridad del Canal de Panamá, Panamá, 2001.

- Morrow, J.J, The Military Engineer, Vol. XVI, No. 86, 1924.

- Naciones Unidas, Programa para el desarrollo, Organización Meteorológica Mundial, **"**Manual de instrucciones de estudios hidrológicos**"**: Publicación Nº 70, San José, Costa Rica, Mayo de 1972.

- National Snow and Ice Data Center, Artic Climatology and Meteorology. University of Colorado, Boulder. Internet, 2012.

- Normas Apa. Universidad Nacional Abierta, (2003), consultado el 19 de marzo de 2011. http://especializacion.una.edu.ve/paginas/normasapauniversidad.pdf

- Panama Canal Company Annual Report, 1932.

- Prensa.com, 2010, costanera hacia Portobelo sigue parcialmente dañada: **El palenque está en silencio, 12 de diciembre de 2010.**

- US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, *Technical Reference Manual. Hydrologic Models System (HEC-HMS),* USA, (2010).

- U.S Army Corps Engineers (USACE). "Probable Maximum Precipitation Estimates for Drainages above Gatun and Madden Dams, Panama Canal Zone". 1979.

- U.S.A. CONGRESSIONAL RECORD, Proceedings and Debates of the 83rd Congress, Second Session, May 3, 1954.

- U.S. Department of Commerce, A study of meteorological causes of record storms and quantitative estimates of critical precipitation rates. U.S. Waterways Experiment Station, Mississippi. 1942.

- U.S: Department of Commerce, 2011. SRRS Analysis and Forecast Charts, Tropical Analysis 700 and 250 mb. National Climatic Data Center: http://nomads.ncdc.noaa.gov/ncep/NCEP

- USGS, George J. Arcement, Jr. and Verne R. Schneider, , Guide For Selecting Manning's Roughness Coefficients For Natural Channels And Flood Plains. *Paper 2339* (pág. 67). www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf, 2011.

- U.S. Water Resources Council. 1981a, Estimating Peak Flow Frequencies for Natural Ungaged Watersheds, a proposed Nationwide Test: Hydrology Committee, 346 p.

- 1981b, Guidelines for determining flood flow frequency, Revised September 1981: Hydrology Committee, Bulletin 17B, 231, p.

- World Meteorological Organization, International meteorological vocabulary. WMO-No. 182, Geneva. 1992.

- Zárate, E. Comportamiento de los empujes fríos que alcanzan Centroamérica y el Caribe. "Evaluación de impactos ocasionados por eventos extremos sobre el sector hídrico y medidas de adaptación bajo condiciones de Cambio Climático en América Central. (AIACC-LA06). Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). Universidad de Costa Rica (UCR). Centro de investigaciones geofísicas de la UCR. San José, Costa Rica. 2005.

10 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Aforo (de caudales): medición del caudal de un río o corriente.

Área de drenaje: superficie/territorio que tiene una salida única para su escurrimiento superficial.

Ártico: Región polar ubicada en la parte más norte de la Tierra.

Carta meteorológica: Mapa geográfico en que aparecen los datos meteorológicos, analizados o previstos para un momento dado, para describir las condiciones atmosféricas a escala sinóptica.

Caudal: volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de un río por unidad de tiempo.

Caudal máximo instantáneo: valor máximo de caudal registrado instantáneamente en un período determinado.

Caudal mínimo diario: caudal promedio diario más bajo registrado en un mes, un año o todo el registro histórico.

Caudal promedio diario: volumen de agua que pasa a través de una sección transversal del río durante el día, dividido por el número de segundos del día.

Climatología: Estudio del estado físico medio de la atmósfera y de sus variaciones estadísticas en el espacio y en el tiempo, tal como se reflejan en el comportamiento meteorológico en un período de muchos años.

Código de la estación: número regional de las estaciones hidrológicas establecido a través del Proyecto Hidrológico Centroamericano (PHCA) de las Naciones Unidas (1968-1972).

Convección: Movimientos organizados dentro de una capa de aire que transportan verticalmente calor, cantidad de movimiento y otras propiedades del fluido.

Convergencia: Contracción de un campo vectorial. Divergencia de signo negativo.

Cuenca hidrográfica: superficie de la tierra en la que confluyen los distintos ríos y corrientes de agua en un río principal y que está limitada por un parteaguas o divisoria que coincide generalmente con la línea más alta de las montañas.

Cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP): área geográfica en la que confluyen los distintos ríos y corrientes de agua al Canal de Panamá.

Curva de descarga de sedimentos suspendidos: curva que relaciona los caudales sólidos y líquidos: Qs = f (Q).

Dedo gordo de una represa o presa: Unión de la cara aguas abajo de la represa o presa con la superficie del terreno. ICOLD (no hay definición de la UNESCO).

Divergencia: Expansión o extensión de un campo vectorial. Magnitud escalar definida para un campo de vectores V (por ejemplo, el vector viento) por la relación: div V = $\delta u/\delta x + \delta v/\delta y + \delta w/\delta z$, donde u,v y w son los componentes del vector V según los ejes rectangulares x, y, z. La "divergencia horizontal" se define omitiendo el término $\delta w/\delta z$.

Elevación: distancia vertical entre un nivel, punto u objeto y una referencia especificada.

El Niño: Calentamiento anómalo del agua oceánica frente a las costas occidentales sudamericanas, acompañado habitualmente de fuertes lluvias en las regiones costeras de Perú y Chile.

Empuje frío: Desplazamiento de una masa de aire relativamente fría y seca proveniente de latitudes medias o altas hacia Centroamérica y el Caribe. Este desplazamiento hace que la masa de aire cálida y húmeda constituida por los vientos alisios, retroceda hacia el este, "empujada" por la masa de aire fría. En las latitudes medias y altas, donde la diferencia de temperatura y humedad entre las masas de aire es mayor, se les conoce como frentes fríos.

Escorrentía: lámina de agua distribuida uniformemente en el área de una cuenca o volumen de agua que pasa por una sección de un río o corriente durante un período de tiempo.

Estación fluviográficas: estación para la determinación de caudales por medio del registro continuo de los niveles de agua de un río en forma digital y gráfica.

Estación hidrométrica: estación en la cual se obtienen datos del agua, en los ríos, lagos o embalses, de uno o varios de los elementos siguientes: niveles, flujos de las corrientes, transporte y depósito de sedimentos, temperatura del agua y otras propiedades físicas y químicas del agua.

Estación limnigráfica: estación que registra continuamente los niveles de agua de un lago o embalse en forma digital y gráfica.

Estación meteorológica: estación en la que se efectúan observaciones meteorológicas con la aprobación de los miembros interesados de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Estación pluviográfica: estación en la que solo se realizan observaciones continuas de las precipitaciones pluviales.

Hidrograma: Expresión, gráfica o no, de la variación del caudal a lo largo del tiempo.

Limnigrama: Representación, gráfica o no, de la variación del nivel de agua en función del tiempo.

Localización: posición de la estación principal con respecto a los poblados y rasgos físicos en la vecindad incluyendo la latitud y longitud.

Meteorología: Estudio de la física, química y dinámica de la atmósfera de la Tierra, incluyendo la interacción aire-tierra que ocurren sobre la Tierra y los océanos, con la finalidad de pronosticar a corto y mediano plazo (días, meses) de manera precisa los fenómenos atmosféricos.

Meteorología sinóptica: Estudio de los fenómenos atmosféricos en una zona extensa de la atmósfera. Se basa en el análisis de mapas en que se han transcrito observaciones sinópticas para la predicción y análisis del tiempo.

Nivel del agua: distancia vertical de la superficie del agua de una corriente, lago o embalse con relación a un nivel de referencia determinado.

Oscilación del ártico: Patrón de circulación atmosférica en la cual la presión atmosférica sobre las regiones polares varía de manera inversa a la de las de las latitudes medias (alrededor de la latitud 45° norte) durante períodos que pueden durar unas semanas o hasta varias décadas. La oscilación tiene dos fases, una negativa y otra positiva. Durante la fase negativa la presión atmosférica sobre la región polar es relativamente alta y en las latitudes medias la presión es baja. El patrón en la distribución de la presión atmosférica se revierte durante la fase positiva. La fase positiva produce climas más húmedos en Escocia, Escandinavia y Alaska, y condiciones más secas al oeste de Estados Unidos y en el Mediterráneo. Los efectos sobre la atmósfera durante la fase negativa son en general lo opuesto a la fase positiva.

Presas auxiliares: En el caso del Canal de Panamá, son las presas de tierra entre dos colinas o elevaciones naturales en donde el terreno que las unía tuvo que ser intervenido por el hombre, ya que su cota era inferior a los niveles máximos operativos proyectados de los embalses Gatún, Alajuela y Miraflores.

Presas naturales: En el caso del Canal de Panamá, son las zonas del terreno circundante de los embalses que por su conformación topográfica retienen las aguas de los mismos, pero que debieron ser identificadas y son protegidas para que sus cotas o elevaciones naturales no sean variadas por el hombre.

Red de estaciones hidrometeorológicas: conjunto de estaciones hidrológicas, meteorológicas y de puntos de observación situado en determinada zona (cuenca o región administrativa) que permite estudiar el régimen hidrológico y meteorológico, en el espacio y en el tiempo.

Rendimiento líquido o caudal específico (l/s/km^2): caudal líquido de una cuenca por unidad de superficie, expresado en litros por segundo por kilómetros cuadrados.

Represa o presa: Barrera construida transversalmente a un valle para retener agua o formar un embalse. Obra construida para retener el flujo del agua dentro de un área determinada a lo largo de su cauce o para prevenir inundaciones debidas a mareas u ondas. (Glosario Hidrológico Internacional de la UNESCO).

Tormentas convectivas: Tormenta producida por nubes cumuliformes formadas en una capa atmosférica inestabilizada por calentamiento de la base o por enfriamiento de la cima.

Vertedero: Estructura que puede utilizarse para controlar el nivel de agua aguas arriba o para medir el caudal o para ambas cosas. Estructura sobre la cual vierte el exceso de agua de avenidas que es así evacuada. (Glosario Hidrológico Internacional de la UNESCO).

Vertidos normales: Las operaciones normales de desalojo o vertidos preventivos por los vertederos Madden y Gatún son los que se realizan hasta alcanzar vertidos de 75,000 pcs en Madden y hasta abrir 14 compuertas por el vertedero de Gatún, que puede alcanzar hasta 250,000 pcs.

Vertidos de emergencia: Se realizan cuando se anticipan riesgos a la vida y/o a los bienes de las comunidades asentadas en las riberas de los embalses y a las estructuras del Canal. En Madden los vertidos son mayores de 75,000 pcs y en Gatún, es considerado un vertido de emergencia cuando se descarga con las 14 compuertas abiertas y el uso de las alcantarillas de las esclusas, o el uso de todos estos a la vez.

Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT): Zona estrecha donde convergen los alisios de los dos hemisferios.

11 ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACP	Autoridad del Canal de Panamá
CCI	Centro de Control de Inundaciones
CMP	Crecida Máxima Probable
EAAR	Sección de Recursos Hídricos
EEM	Error Estándar Medio
ECI	Ejercicio de Control de Inundaciones
FDP LP-III	Función de Distribución de Probabilidad Log Pearson Tipo III
IP	Departamento de Ingeniería y Administración de Proyectos
MML	Momentos Aplicados a los Logaritmos
OP	Departamento de Operaciones Marítimas
OPE	División de Esclusas
MTC	Control de Tráfico Marítimo
PLD	Nivel de Referencia Preciso del Canal
PCI	Programa de Control de Inundaciones
PMP	Precipitación Máxima Probable
SI	Departamento de Servicios Industriales
EAEG-GH	Sección de Generación Eléctrica
Sinaproc	Sistema Nacional de Protección Civil
SPI	Servicio de Protección Interinstitucional
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical
UTC	Por sus siglas en inglés (Coordinated Universal Time abbreviated UTC) es el tiempo estándar por el cual el mundo regula los relojes y la hora

CHCP	Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá
Idaan	Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

ABREVIATURAS DE UNIDADES DE MEDIDAS

cm	centímetro
h	hora
km	kilómetro
km/h	kilómetro por hora
m	metro
mm	milímetro
m/s	metro por segundo
m^3/s	metro cúbico por segundo
Pcs, pie^3/s	pie cúbico por segundo
Mpc	millones de pies cúbicos
Mmc	millones de metros cúbicos
s	segundo
mbar	milibar

12 APÉNDICE

12.1 Personal de la sección de Recursos Hídricos que participó en las operaciones de "La Purísima 2010"

Jorge A. Espinosa	Gerente de la sección de Recursos Hídricos (EAAR)
Modesto Echevers	Supervisor de la Unidad de Hidrología Operativa (EAAR-HO)
Johnny A. Cuevas	Coordinador del Programa de Control de Inundaciones (EAAR-HM)

Asistentes trabajo de oficina
Donna Spencer
Wellington Luck

Hidrólogos
Michael Hart
Daly Espinosa
Teodolinda Atencio
Tamara Muñoz
Fernando Díaz
Abelardo Bal
Tomás García
Erick Córdoba

Meteorólogos
Maritza Chandeck M.
Alberto Smith
Gloria Arrocha

Ingeniero multidisciplinario
Raúl Tejada

Técnicos Hidrólogos
Ayax Murillo
Gerardo Leis
Nelson Guerra
Oscar Baloyes
Eduardo Medrano
Rosendo Moreno

Técnicos meteorólogos
Antonio Grandison
Omar Moreno

Líderes, trabajadores de mantenimiento
Gerardo Melo
Pastor Moreno

Reparador de equipo pequeño
Eriberto Ramos

Trabajador de mantenimiento
Erick Almengor
José Asprilla
Emilio Góngora
Luis Martéz
Sebastián Moreno
Roberto Rodríguez

Palanqueros
Casildo Cansarí
Demetrio Flaco
Alonso García
Edison Gómez
Alex Moreno
Juan Núñez
Manuel Peñaloza
Wilfrido Prado
Francisco Valdespino

Ayudante de trabajador de mantenimiento
Guillermo Quezada

Auxiliares de hidrología EAAR
(Contratados temporalmente
durante la temporada de inundaciones)
Keyssi García
Minnelly Centeno
Edith Pineda
Russy Carrera
David Boy

Figura 97. Personal de la sección de Recursos Hídricos. 18Oct2010

12.2 Apéndice de estructuras de vertido del Canal de Panamá

ESTRUCTURAS DE VERTIDO		DESCARGA(m^3/s)
Vertedero de Gatún (14 compuertas abiertas)	Elevación embalse 26.67 m Elevación embalse 28.04 m	5150 7280
Alcantarillas, esclusas Gatún (de 3 a 255 m^3/s c/u)		765
Alcantarillas, esclusas Pedro Miguel (de 3 a 198 m^3/s c/u)		595
Vertedero de Miraflores (máximo permisible)	Pleamar(+3.05 m) Bajamar (-3.35 m)	1130 1980
Alcantarillas, esclusas Miraflores (de 3 a 198 m^3/s c/u)		595
Vertedero de Madden (las cuatro compuertas de tambor abiertas a 70.71 m)	Elevación embalse 76.81 m Elevación embalse 80.16 m	3600 7420

12.3 Descripción general de las represas y embalses ubicados en la CHCP

12.3.1 Represa y embalse Gatún

La construcción de la represa de Gatún se inició en 1907 y terminó en 1913. Su vertedero regula el embalse Gatún para cumplir con el propósito múltiple de abastecer agua potable, garantizar el agua necesaria en la operación de las esclusas de Gatún y Pedro Miguel, y garantizar el calado en la navegación de los buques que cruzan de océano a océano. La longitud total de la represa de Gatún es 2500 m y consiste en una presa de tierra a través del valle oriental (este), el vertedero de hormigón ubicado en un corte que atraviesa "El cerro Vertedero" ("Spillway Hill") y una presa de tierra sobre el lado occidental (oeste) del valle.

La cuenca hidrográfica del Canal de Panamá, la cual alimenta al embalse Gatún, tiene una superficie de drenaje de 3338 km^2 y se compone de la cuenca del embalse Alajuela y la cuenca aguas abajo de la represa de Madden. La cuenca aguas abajo tiene una superficie de 2313 km^2. La superficie o espejo de agua del embalse Gatún es de 436 km^2 a una elevación de 26.67 m. De acuerdo con los procedimientos actuales de operación, el almacenamiento útil del embalse Gatún entre las elevaciones 24.84 y 26.67 m es de 766 Mmc.

El vertedero de hormigón en arco de Gatún tiene 14 compuertas de deslizamiento vertical de 5.79 m (19 pies) de alto y 13.72m (45 pies) de ancho, las cuales se controlan individualmente. (Ver Figura 98).

Figura 98 Represa de tierra y vertedero de Gatún.

A continuación los datos más importantes del vertedero y embalse Gatún:

Longitud total del vertedero de hormigón:	246.25 m (807.96 pies)
Longitud neta:	192.01 m (630.00 pies)
Número de compuertas:	14
Tipo:	Deslizamiento vertical
Longitud	13.72 m (45 pies)
Altura	5.79 m (19 pies)
Elevación de la cresta:	21.00 m (68.89 pies)
Elevación de la parte superior de las compuertas (hasta el año 2014):	26.79 m (87.89 pies)
Base de las compuertas totalmente abiertas:	27.89 m (91.50 pies)
Elevación de la cresta de la presa de tierra:	32.00 m (105 pies)
Capacidad del vertedero:	5154 m^3/s (182 000 pcs) con elevación del lago en 26.67 m (87.50pies) 7277.43 m^3/s (257000 pcs) con elevación del lago en 28.04 m (92.00 pies)
Año de construcción:	1913
Nivel máximo operativo del embalse Gatún hasta el año 2014:	26.67 m (87.50 pies PLD)
Nivel máximo operativo del embalse Gatún a partir del año 2014:	27.12 m (89.00 pies PLD
Función:	Regula las aguas aportadas por los ríos principales Trinidad, Cirí Grande, Gatún, las aguas controladas del río Chagres y los aportes directos de la precipitación pluvial
Localización política:	Distrito de Cristóbal de la provincia de Colón
Localización geográfica (UTM):	1023852 N 617519 E

12.3.2 Represa de Madden y embalse Alajuela

La represa Madden retiene las aguas del río Chagres formando el embalse Alajuela. La construcción se inició en 1932 y terminó en 1935. Esta represa-vertedero regula el embalse para cumplir con el propósito múltiple de incrementar la disponibilidad de agua para esclusajes, abastecimiento de agua potable, hidrogeneración de energía eléctrica y manejo de crecidas del río Chagres. Ver Figura 99.

Las estructuras principales son la represa-vertedero que atraviesa el río Chagres, la central hidroeléctrica, una presa de roca con núcleo de arcilla que se extiende desde el estribo izquierdo de la represa-vertedero principal y otras presas auxiliares de tierra y grava que atraviesan las hondonadas que circundan el embalse. La represa-vertedero principal es de gravedad de hormigón masivo y su parte superior mide aproximadamente 290 m de largo y 67.05 m de altura en la sección máxima.

La superficie de drenaje de la cuenca del embalse Alajuela es 1026 km^2. La superficie o espejo de agua del embalse, a una elevación de 76.81 m, es de 50.2 km^2. La capacidad de almacenamiento activo disponible del embalse Alajuela entre las elevaciones 57.91 y 76.81 m es de 651 Mmc. El almacenamiento por debajo de la cota 57.91 m está reservado para el abastecimiento de agua de la ciudad de Panamá a través de la toma de la potabilizadora Federico Guardia Conte.

El vertedero está dividido por tres pilares de concreto que forman cuatro aperturas de 30.48 m, tiene 4 compuertas de tambor de operación simultánea de acero estructural de 5.49 m de altura instaladas sobre las crestas de concreto en dichas aperturas; 2 válvulas de aguja clausuradas y 6 compuertas de fondo. En 1963 a las compuertas de tambor se les agregó una extensión de 0.61 m en la parte superior, para tener un rango de almacenamiento de hasta 6.10 m. Los vertidos normales alcanzan hasta 2120 m^3/s (75000 pie^3/s) y los de emergencia hasta 7419 m^3/s (262000 pie^3/s).

Figura 99 Foto represa -vertedero Madden.

A continuación los datos más importantes de la represa-vertedero Madden:

VERTEDERO DE MADDEN	
Largo total incluyendo los pilares	140.20 m (460 pies)
Largo neto	121.91 m (400 pies)
4 Compuertas de Tambor:	
Longitud	30.48 m (100 pies
Altura	5.49 m (18 pies) más una extensión de 0.61 m (2 pies)
Elevación de parte superior de compuertas (totalmente abajo)	70.71 m (232 pies)
Elevación de parte superior de compuertas (totalmente arriba)	252
Elevación de la carretera (Cresta de la presa)	270
2 válvulas de aguja	
Elevación central de la toma diámetro 3.35 m (132 pl.)	38.10 m (125 pies)
Elevación central de la salida descarga diámetro 2.13 m (84 plg)	34.59 m (113.50 pies)
6 Compuertas de fondo 1.73 x 3.05 m (5’ 8” ancho x 10’ 0” Altura)	
Elevación central de toma	28.95 m (95.00 pies)
Elevación central de salida	28.85 m (94.67 pies)
Capacidad del vertedero:	
con elevación del lago en 76.81 m (252 pies)	4360.79 m^3/s (154000 pcs)
con elevación del lago en 80.16 m (263 pies)	7419.01 m^3/s (262000 pcs)

Año de construcción:	1935	
Nivel máximo operativo del embalse Alajuela:	76.81 m (252.00 pies PLD)	
Embalsa las aguas del río Chagres en su cauce y regula las aguas de los ríos principales Chagres, Pequení, Boquerón y los aportes directos de la precipitación pluvial.		
Localización política: Distritos de Chilibre y San Juan de las provincias de Panamá y Colón, respectivamente		
Localización geográfica (UTM):	1018318 N	652000 E

Nota: La capacidad de vertido con elevación del lago en 76.81 m (252 pies) es la suma de los vertidos de las 4 compuertas de tambor: 3597 m^3/s (127000 pcs), 6 compuertas de fondo: 623 m^3/s (22000 pcs) y 2 válvulas de aguja: 141.6 m^3/s (5000 pcs). Actualmente las válvulas de aguja están clausuradas, por lo que la capacidad de vertido disponible es del orden de 4219.21 m^3/s (149000 pcs).

12.3.3 Represa-vertedero y embalse Miraflores

La represa-vertedero de hormigón de Miraflores tiene 8 compuertas de deslizamiento vertical de 5.79 m (19 pies) de alto por 13.72 m (45 pies) de ancho, las cuales se controlan individualmente. Regula el embalse Miraflores para cumplir con el propósito de garantizar el calado de los buques en su tránsito de las esclusas de Miraflores a las de Pedro Miguel y viceversa, en el océano Pacífico; el embalse tiene una superficie de 3.94 kilómetros cuadrados, a una elevación de 16.46 m (54´ PLD). Ver Figura 100.

La superficie de drenaje de la cuenca del embalse Miraflores es de 96.8 km^2 y se encuentra fuera de la cuenca del Canal, por lo que no regula las aguas que son utilizadas para los esclusajes. El almacenamiento activo disponible del embalse entre las elevaciones 16.15 y 16.76 m (53 pies y 55 pies PLD) es de 2.46 Mmc.

Figura 100 Foto represa -vertedero Miraflores.

A continuación los datos más importantes de la represa-vertedero Miraflores:

VERTEDERO DE MIRAFLORES

Largo total incluyendo los estribos		147.53 m (484.04 p)
Largo neto		109.72 m (360 p)
8 Compuertas de desplazamiento Vertical		
Longitud (cada una)		13.72 m (45 p)
Altura		5.79 m (19 p)
Elevación de la cresta del vertedero		11.79 m (38.67 p)
Elevación del tope de la compuerta (cerrada)		17.58 m (57.67 p)
Elevación del puente de acceso		25,96 m (85.17 p)
Capacidad permisible del vertedero:	con marea alta	1132.67 m^3/s (40000 pcs)
	con marea baja	1982.18 m^3/s (70000 pcs)
Año de construcción:		1914
Nivel máximo operativo del embalse Alajuela:		16.76 m (55.00 pies PLD)
Embalsa las aguas del río Grande en su antiguo cauce, regula las aguas controladas de las esclusas de Pedro Miguel, los aportes naturales de los ríos Caimitillo y Camarón, y los aportes directos de la precipitación pluvial		
Localización política: Distrito de Ancón de la provincia de Panamá		
Localización geográfica (UTM):	995038 N	654578 E

12.4 Apéndice de fotografías

Fotografía 1. Alberto Alemán, administrador de la ACP;, Jorge Espinosa, gerente de la sección de Recursos Hídricos; Amelia Sanjur, supervisora del Equipo de Relaciones con la Comunidad de la ACP, y Milton Martínez, sociólogo de la ACP, en la comunidad de Santa Rosa, 10 de diciembre de 2010.

Fotografía 2. Condición del embalse Alajuela y río Chagres, aguas abajo de la presa Madden el 21 de enero de 2011.

Fotografía 3. Río Chagres, erosión en los bancos, cerca de la estación Chico, 21 de enero de 2011.

Fotografía 4. Al fondo, toma de agua cruda del IDAAN en el embalse Alajuela, 20 de diciembre de 2010.

Fotografía 5. Recolección de muestras por químicos y biólogos de la Unidad de Calidad de Agua de la División de Agua de la ACP en el embalse Alajuela frente a la toma de agua cruda del IDAAN, 13 de enero de 2011.

Fotografía 6. Rastros de crecida en la estación Chico, río Chagres, del 7 al 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 7. Vista del río Chagres desde el puente de la Transístmica, 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 8. Roberto Rodríguez y Luis Martéz, de la sección de Recurso Hídricos, desarmando la estación hidrométrica de la ACP en Santa Rosa, 8 de diciembre de 2010.

Fotografía 9. Rastros de la crecida en la estación hidrométrica de la ACP en Santa Rosa, 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 10. Residencia inundada contigua a la estación hidrométrica de la ACP en Santa Rosa, 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 11. Visita a las comunidades afectadas, 22 de diciembre de 2010.

Fotografía 12. Evaluación de las comunidades afectadas, por parte del equipo de la sección de Recursos Hídricos, 22 de diciembre de 2010.

Fotografía 13. Evaluación de las comunidades afectadas, por parte del equipo de la sección de Recursos Hídricos, 22 de diciembre de 2010.

Fotografía 14. Evaluación de las comunidades afectadas, por parte del equipo de la sección de Recursos Hídricos, 22 de diciembre de 2010.

Fotografía 15. Evaluación de las comunidades afectadas, por parte del equipo de la sección de Recursos Hídricos, 22 de diciembre de 2010.

Fotografía 16. Santa Rosa, una de las comunidades afectadas, 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 17. Santa Rosa, una de las comunidades afectadas, 9 de diciembre de 2010.

Fotografía 18. Río Chagres, rastros de la crecida producto de la tormenta “La Purísima 2010”.

Fotografía 19. Turbiedad del agua cruda en toma del Idaan, durante “La Purísima 2010”, 17 de diciembre 2010.

Fotografía 20. Centro de Comando de Incidentes del Idaan, en Chilibre, para hacer frente a la problemática del agua de la ciudad de Panamá y alrededores. De pie con la gorra, Carlos Vargas, VP de la División de Agua de la ACP.

Fotografía 21. Inspección de planicies de inundación el 11 de noviembre de 2010. De pie Johnny Cuevas, coordinador del Programa de Control de Inundaciones de la ACP, mostrando el letrero que indica la ruta de evacuación en caso de inundación en la comunidad de Santa Rosa.

Fotografía 22. Ejercicio de control de inundaciones de la temporada de Control de Inundaciones 2010, en el Centro de Manejo de Incidentes y Emergencias de la ACP.

Fotografía 23. Ejercicio de control de inundaciones de la temporada de Control de Inundaciones 2010, en el Centro de Manejo de Incidentes y Emergencias de la ACP. De pie el VP de EA, Esteban Sáenz, 14 de octubre de 2010.

Fotografía 24. Gira de trabajo para inspeccionar la parte alta del río Chagres y seleccionar sitio para aforo área pendiente, aguas arriba de la estación limnimétrica Chico. 1 de Febrero de 2011.

Fotografía 25. Inspección de la parte ala del río Chagres y selección del sitio pa ra aforo área pendiente, aguas arriba de la estación fluviográfica Chico.
De izquierda a derecha Jorge A. Espinosa, Gerente de EAAR y Robert Stallard del USGS.

Fotografía 26. Localización de marcas de la crecida en la parte alta del río Chagres por Manuel Peñaloza y Alonso Garcia (q.d.e.p).!

100 años
CANAL DE PANAMÁ