



**METRO
DE PANAMA**

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO, DIAGNÓSTICO PRELIMINAR FASE 1: CONDICIONES HIDROLÓGICAS E HIDRÁULICAS DEL SITIO DE DISPOSICIÓN DE MATERIAL DE EXCAVACIÓN FARFÁN

ELABORADO POR:



Boris Alberto Gómez Espino
Idoneidad 94-006-064
Ingeniero Civil

BORIS GOMEZ ESPINO

INGENIERO CIVIL

LICENCIA No. 94-006-064

FIRMA

Ley 15 del 26 de enero de 1959
Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
2	ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1	Área de descarga	6
2.2	Área del cauce inferior del río Farfán.....	9
2.3	Área aledaña al dique lateral del futuro relleno (mirando hacia Woodlands).....	11
2.4	Área del Dique de la ACP Colindante al norte del Nuevo Relleno	12
2.5	Área de Woodlands.....	14
3	REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA EXISTENTE	17
3.1	Modelo Digital de Elevaciones.....	17
3.2	Imágenes de Satélite.....	19
3.3	Información del Emplazamiento del Relleno.....	23
3.4	Coberturas SIG del EsIA	23
3.5	Análisis de Niveles de Marea en el Área	24
4	DETERMINACIÓN DE CUENCAS Y CORRIENTES DE AGUA	29
4.1	Subcuenca Norte (N).....	30
4.2	Subcuenca Oeste 1 (O1).....	31
4.3	Subcuenca Oeste 2 (O2).....	32
4.4	Subcuencas del Sector Sur (S1) y (S2)	33
5	COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA SEGÚN LINEAMIENTOS DEL MANUAL DE REVISIÓN DE PLANOS DEL MOP, 3ª EDICIÓN.....	35
6	ESTIMACIÓN DE CAUDALES.....	36
6.1	Métodos de Cálculo Hidrológico Aplicados.....	36
6.1.1	Método Racional	36
6.1.2	Método de Análisis Regional de las Crecidas Máximas	38
6.2	Método del Hidrograma Sintético Triangular.....	40
7	MODELACIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN.....	43
7.1	El Modelo RiverFlow2D para Infracworks 360.....	43
7.2	Determinación del entorno de análisis del modelo.....	44
7.2.1	Condición Existente. Modelo sin relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL	45
7.2.2	Condición futura. Modelo con relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL	47
8	RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO PRELIMINAR	49
9	ANEXOS.....	51

LISTADO DE TABLAS

Tabla N° 1.	Niveles característicos de referencia de la Marea en Balboa	24
Tabla N° 2.	Recurrencia de Niveles Máximos de Marea	26
Tabla N° 3.	Períodos de retorno de niveles extremos en Balboa incluyendo el efecto del Cambio Climático.....	28
Tabla N° 4.	Ecuación de Intensidad relación Frecuencia para eventos con duración d en horas de la cuenca del río entre Caimito y el Juan Díaz (mm/hr)	37
Tabla N° 5.	Ecuaciones representativas por zonas hidrológicas	39
Tabla N° 6.	Factores de Maximización.....	39
Tabla N° 7.	Cálculo de Caudales y Volúmenes.....	42
Tabla N° 8.	Coeficiente de Rugosidad de Manning.....	43

LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfico N° 1.	Regresión de Niveles Máximos Anuales de Marea.....	26
Gráfico N° 2.	Tendencia de Niveles Medios anuales en la Estación Balboa	27

LISTADO DE GRÁFICAS

Figura N° 1.	Puntos visitados en el Área de Estudio.	6
Figura N° 2.	Descarga del Río Farfán	7
Figura N° 3.	Salida al mar del área de Descarga de la ACP.....	8
Figura N° 4.	Cauce inferior del Río Farfán.	9
Figura N° 5.	Área aledaña al Dique lateral del futuro relleno (mirando hacia Woodlands).	11
Figura N° 6.	Área del Dique de la ACP colindante al Norte del Nuevo Relleno.	13
Figura N° 7.	Área de Woodlands.....	14
Figura N° 8.	Modelo Digital de Elevaciones Generado para el Estudio	17
Figura N° 9.	Orografía del Área de Estudio	18
Figura N° 10.	Pendientes en el Área de Estudio	18
Figura N° 11.	Imagen de Satélite superpuesta al DEM en el Área de Estudio.....	19
Figura N° 12.	Imagen de Satélite con Color Natural.....	20
Figura N° 13.	Imagen de Satélite con Falso Color.....	21
Figura N° 14.	Imagen de Satélite con Color Natural	22
Figura N° 15.	Imagen de Satélite con Falso Color.....	22
Figura N° 16.	Emplazamiento del Relleno en el Área de Estudio sobre Hoja Topográfica del Instituto Nacional Tommy Guardia.	23
Figura N° 17.	Niveles de referencia en Balboa	25
Figura N° 18.	Cuenca total.	29
Figura N° 19.	Subcuenca Norte (N).....	30
Figura N° 20.	Subcuenca Oeste 1 (O1).....	31

Figura N° 21.	Subcuenca Oeste (O2).....	32
Figura N° 22.	Alcantarilla de cruce del río Farfán en Howard	33
Figura N° 23.	Subcuenca Sur (S1).....	33
Figura N° 24.	Subcuenca Sur (S2)	34
Figura N° 25.	Mapa de zonas hidrológicas ETESA	38
Figura N° 26.	Esquema de Hidrograma Sintético Triangular	41
Figura N° 27.	Entradas y salidas con los códigos asignados.....	44
Figura N° 28.	Condición Existente. Modelo Sin relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL.....	46
Figura N° 29.	Detalle de inundaciones en el entorno de Woodlands	47
Figura N° 30.	Modelo 2: Con relleno – Nivel del Mar 2.10m MSL.....	48
Figura N° 31.	Comparación de los niveles de inundación.....	50

1 INTRODUCCIÓN

Como parte de la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental Categoría III para el Cruce de la Línea 3 por debajo del Canal de Panamá se prepara, a partir de la solicitud del Ministerio de Ambiente documentada en la segunda solicitud aclaratoria, un Estudio Hidrológico e Hidráulico Fase 1: Diagnóstico Preliminar de las Condiciones Hidrológicas e Hidráulicas del sitio de disposición de material de excavación Farfán para determinar la línea base actual del sitio y los cambios que puedan producir la ubicación del material de excavación derivado del proyecto del cruce del Canal en las condiciones actuales de la zona.

El relleno ocupará 53.39 ha en una zona al Este del Residencial Howard y Residencial Woodlands. La zona aledaña corresponde a un área inundable que se ve afectada por las mareas.

El presente estudio corresponde a la etapa del Diagnóstico Preliminar; en el mismo se presentan:

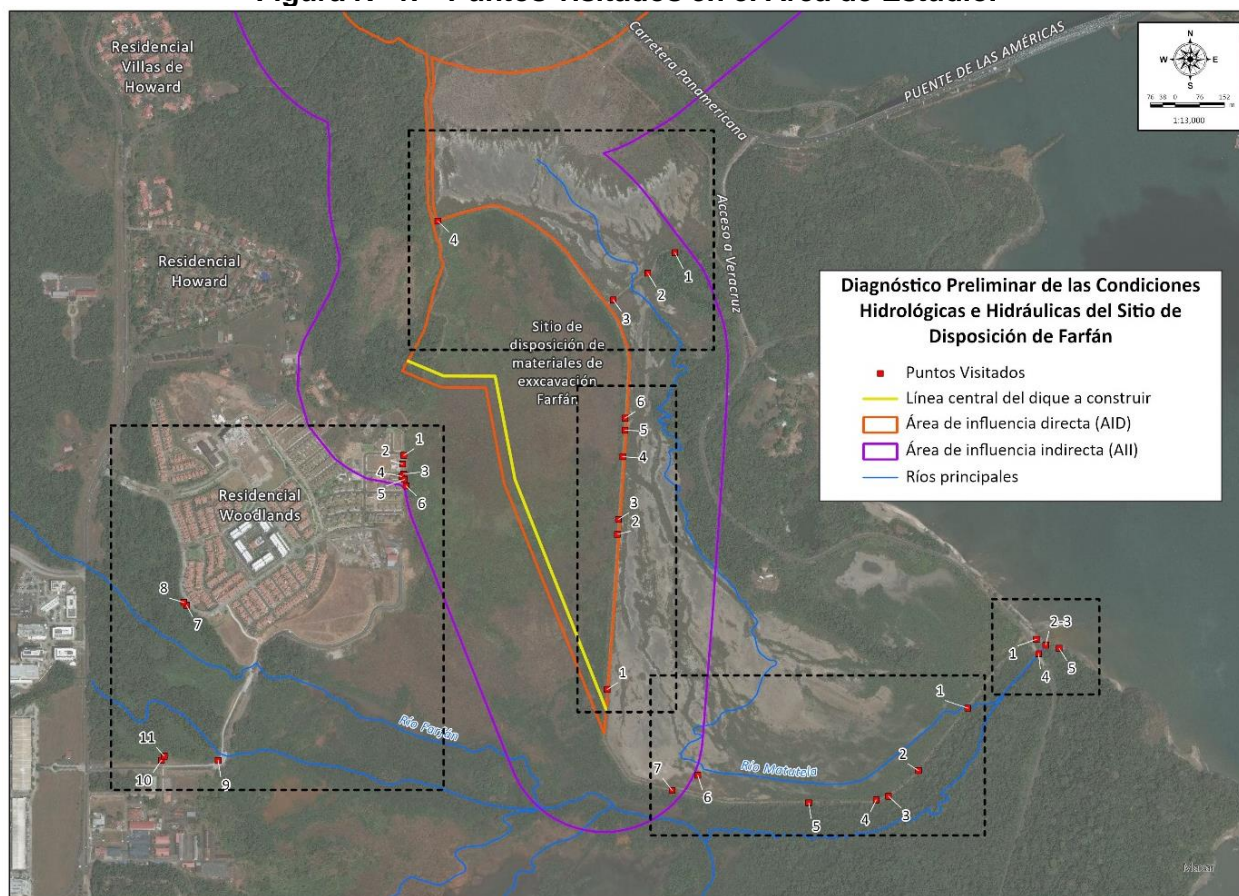
- Delimitación de subcuencas e identificación de corrientes de agua.
- Estimación de caudales y definición de coeficientes de escorrentía.
- Modelo de Inundación General mediante el Riverflow 2D Flood Simulation (FS) para Autodesk Infracore.

Los resultados del modelo permitirán establecer conclusiones generales sobre las condiciones de inundación. Con el diagnóstico se establecerán prioridades en el estudio hidrológico e hidráulico en las áreas consideradas de mayor impacto.

2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende una amplia zona baja próxima al Canal de Panamá donde se destacan las áreas de descarga de dragados que realiza la ACP en el Canal, áreas bajas correspondientes a planicies de inundación de los cursos de agua presentes, y nuevos asentamientos habitacionales en Howard y Woodlands.

Figura N° 1. Puntos visitados en el Área de Estudio.



Fuente: PLADES

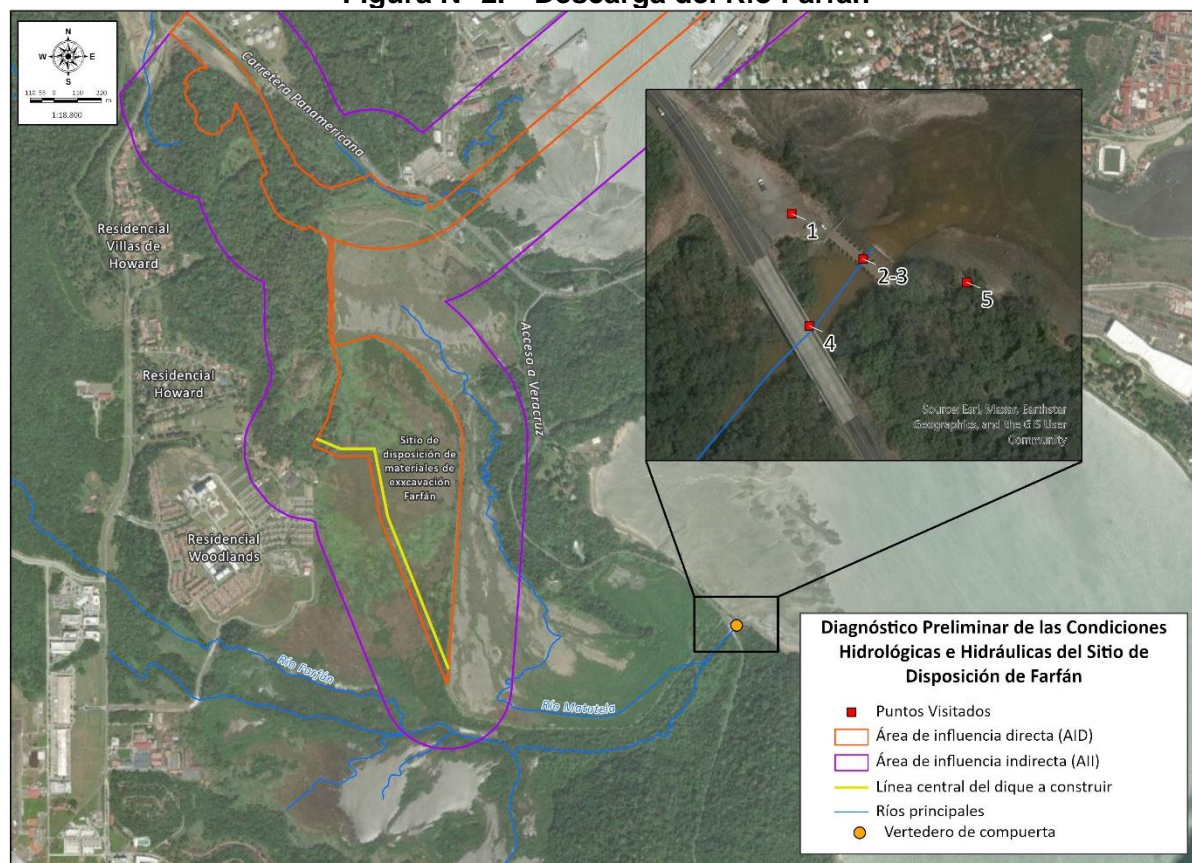
Las figuras a continuación permiten visualizar las características fisiográficas de las distintas zonas involucradas, en particular de las dos cuencas principales que corresponden a los ríos Matutela y Farfán.

2.1 ÁREA DE DESCARGA

Comprende la antigua obra de control de la descarga final del río Farfán y la batería de tubos de descarga del río Matutela en el área de vertidos de material de dragado de la ACP, al mar.

Como puede apreciarse la primera descarga corresponde al río Farfán, la cual está situada inmediatamente aguas abajo del puente de la carretera. Consiste en una batería de celdas originalmente reguladas por compuertas, con sólo cuatro operativas. En todos los casos, los vanos han sido parcial o totalmente cegados como se aprecia a continuación.

Figura N° 2. Descarga del Río Farfán





Fuente: PLADES



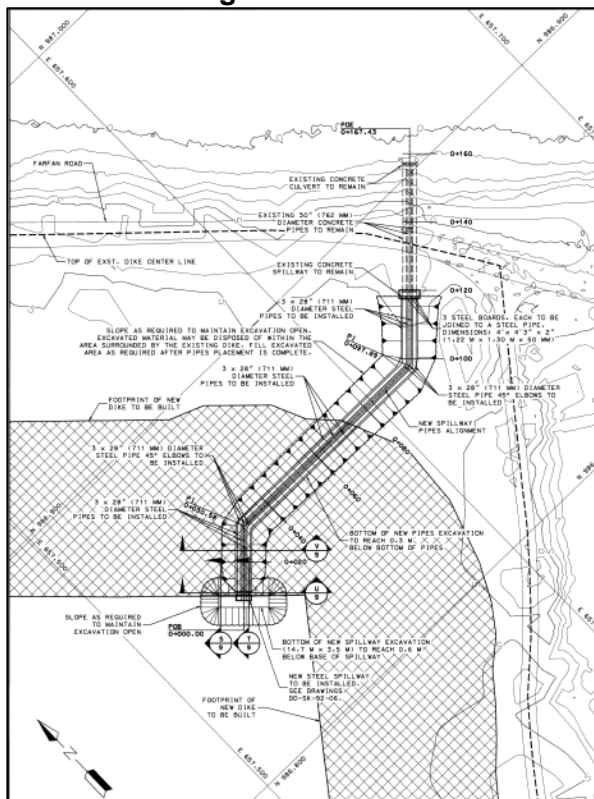
La segunda descarga corresponde a la cuenca del río Matutela, independiente de la anterior, consiste en una batería de tres tuberías de concreto de 30" de diámetro cada una, que descargan libres al mar.

Ambas descargas se presentan divididas por un dique cuya elevación es mayor que la de la carretera, por encima de cualquier nivel de inundación previsible.

Figura N° 3. Salida al mar del área de Descarga de la ACP.



Fuente: PLADES

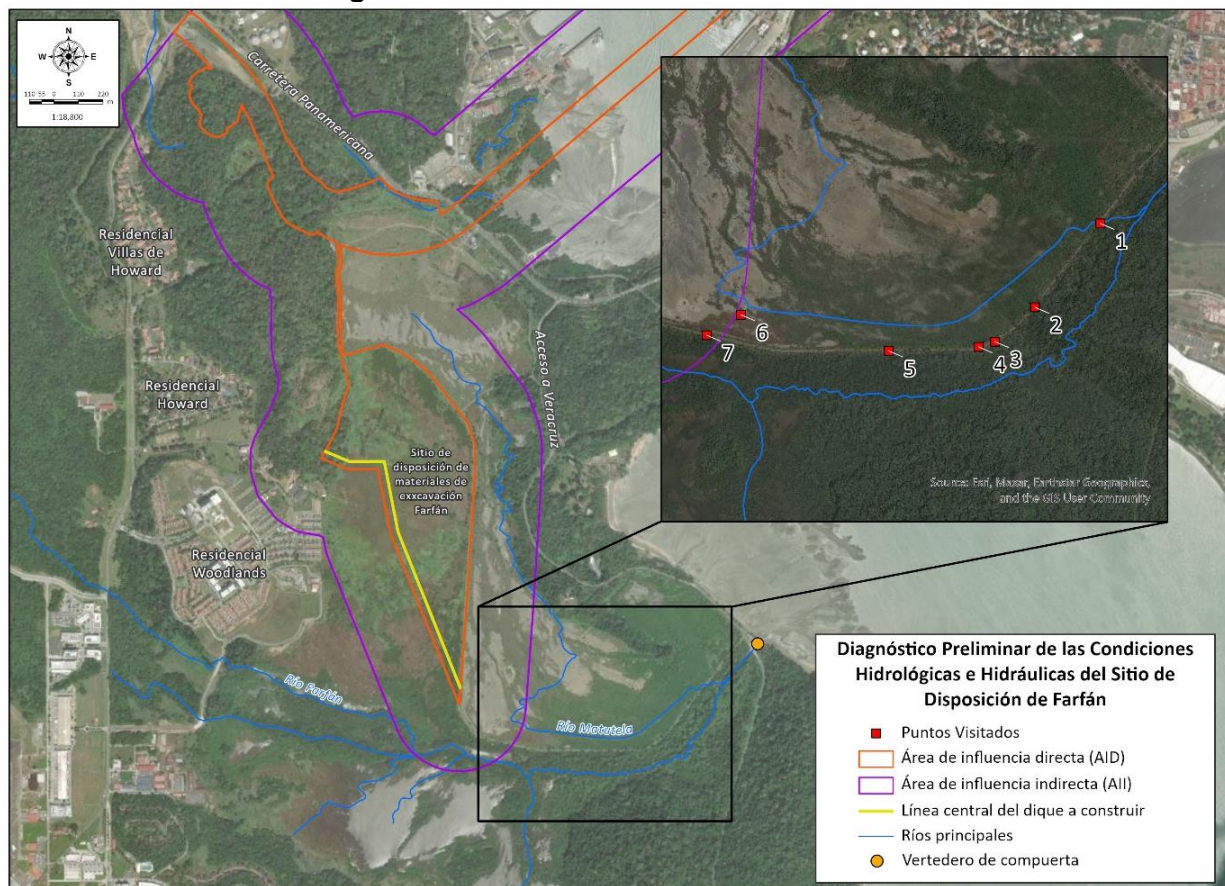


Cabe destacar que, cualquiera de los dos casos, las obras conectan el área de interés con los niveles de marea los cuales, combinados con las lluvias, condicionan o aun determinan los niveles de inundación.

2.2 ÁREA DEL CAUCE INFERIOR DEL RÍO FARFÁN

El cauce del río se encuentra limitado al Norte por el dique de contención de las descargas de material de dragado de ACP. El mismo presenta abundante vegetación y conserva aguas en buena parte de su recorrido, aun en ausencia de precipitación, lo que pone de manifiesto las limitaciones hidráulicas en la descarga. La figura a continuación corresponde a las fotografías presentadas más abajo las cuales reflejan la situación señalada.

Figura N° 4. Cauce inferior del Río Farfán.



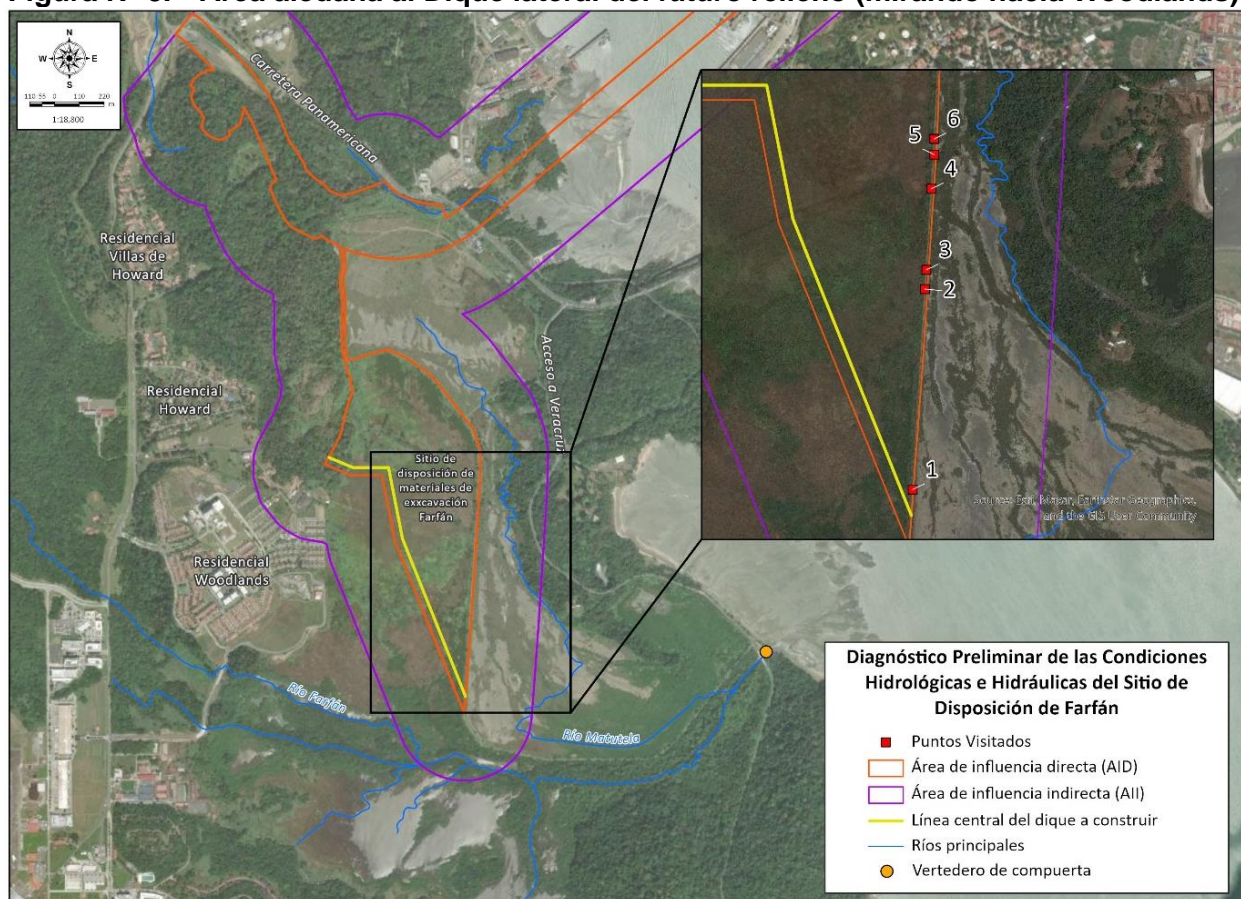


Fuente: PLADES

2.3 ÁREA ALEDAÑA AL DIQUE LATERAL DEL FUTURO RELLENO (MIRANDO HACIA WOODLANDS)

Las fotografías a continuación, en varias de las cuales se aprecia la urbanización de Woodlands al fondo describen, a través de la vegetación presente y los niveles apreciables a simple vista, una zona intermedia baja, susceptible a inundaciones intermitentes y áreas con anegación prolongada probablemente susceptibles a los niveles de marea.

Figura N° 5. Área aledaña al Dique lateral del futuro relleno (mirando hacia Woodlands).



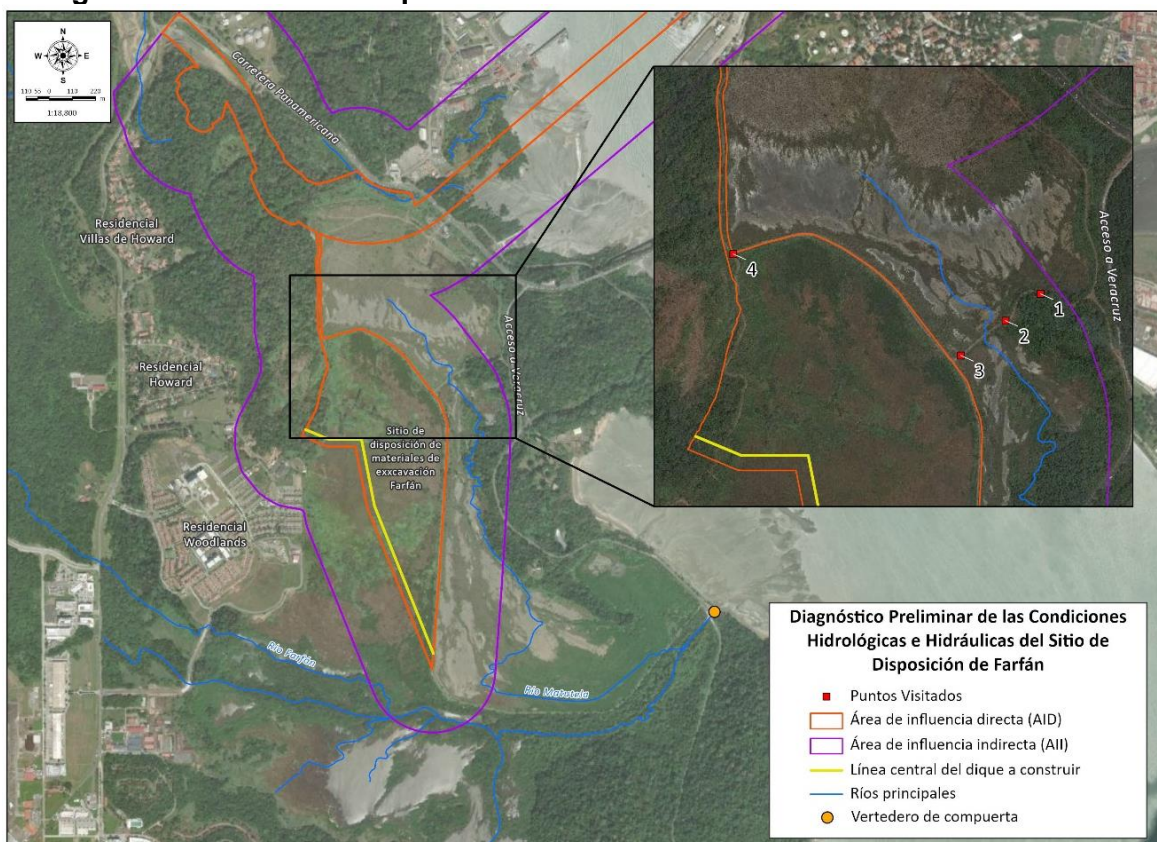


Fuente: PLADES

2.4 ÁREA DEL DIQUE DE LA ACP COLINDANTE AL NORTE DEL NUEVO RELLENO

En la visita se pudo observar, en el Punto 1, agua acumulada cercana al dique existente. En los puntos 2 y 3, existen compuertas que controlan el paso del agua de la subcuenca del Río Matutela, de un lado al otro del dique existente. En la siguiente etapa, en reuniones con ACP, se verificará la manera en que se operan estas compuertas y si, en algún momento, hay descarga al área de ubicación del nuevo relleno. En el punto 4 se observó que el dique existente de la ACP está a más de un metro arriba del camino que lleva a la antena cercana a los nuevos residenciales de Howard.

Figura N° 6. Área del Dique de la ACP colindante al Norte del Nuevo Relleno.

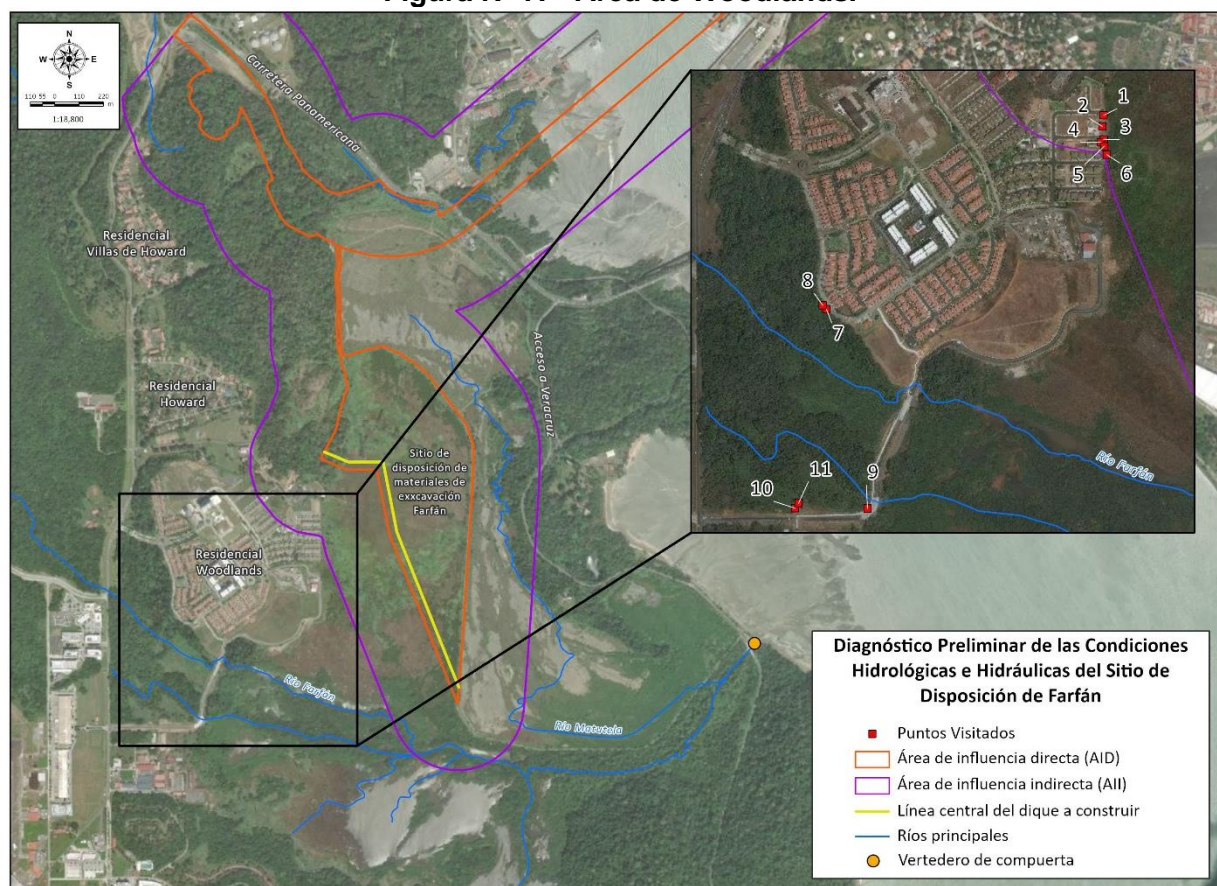


Fuente: PLADES

2.5 ÁREA DE WOODLANDS

Las fotografías que se señalan en la figura a continuación representan los puntos de interés asociados a las potenciales situaciones de inundación que se describen más adelante en el análisis. Las mismas comprenden las descargas del sistema pluvial de la urbanización (fotografías 1 a la 6), sectores susceptibles (fotografías 7 y 8), y áreas bajas en la vía de acceso (fotografías 9, 10 y 11) los que, como se señala en las Conclusiones y Recomendaciones del documento, constituyen un componente crítico en las verificaciones a realizar en la siguiente etapa.

Figura N° 7. Área de Woodlands.







Fuente: PLADES

3 REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA EXISTENTE

Para la elaboración del presente Diagnóstico Preliminar, la revisión de la información secundaria se ha basado en los siguientes cuatro elementos:

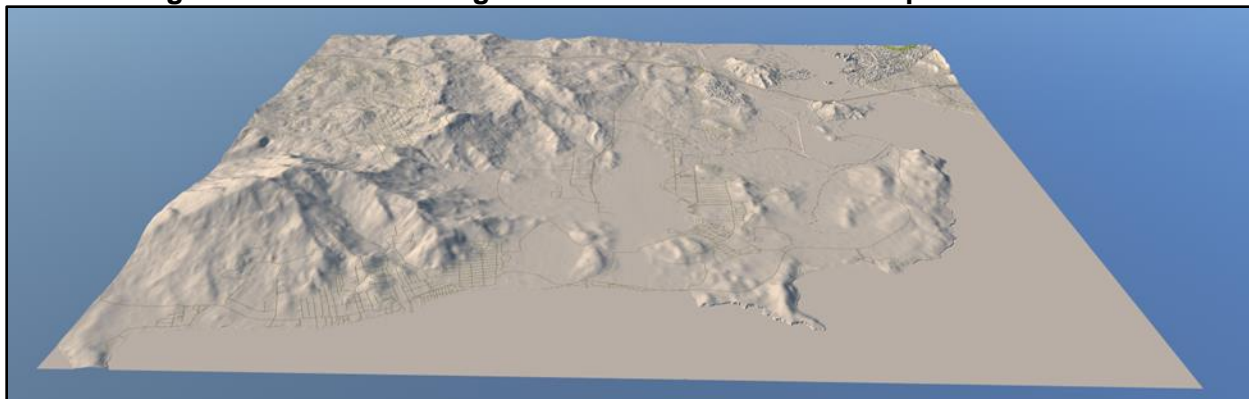
1. Modelo digital de elevaciones que permita tener resultados confiables en cuanto a topografía, pendientes, subcuencas y corrientes de agua.
2. Imágenes de Satélite que permitan ver el uso de suelo existente del área, determinar potenciales áreas inundables y las áreas que podrían verse afectadas por cambios en los niveles de inundación.
3. Información del emplazamiento del relleno del material de excavación del Cruce de la Línea 3 por debajo el Canal de Panamá.
4. Coberturas del Sistema de Información Geográfica del EsIA del proyecto que incluyen cuencas, subcuencas, áreas de impacto directo e indirecto.

3.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) ha sido generado utilizando información de LIDAR de la Autoridad del Canal de Panamá, LIDAR de la Línea 3 del Metro e información disponible del Tommy Guardia. Para la siguiente etapa, se contará con información más detallada que está gestionando el Cliente incluyendo LIDAR existente en la zona e información de las terracerías finales de los desarrollos de residencias que se están construyendo en la zona. Se realizarán verificaciones puntuales de elevaciones con GPS diferenciales, en áreas específicas.

El modelo tiene un área aproximada de 100 km² cubriendo el área de estudio completa con las subcuencas correspondientes.

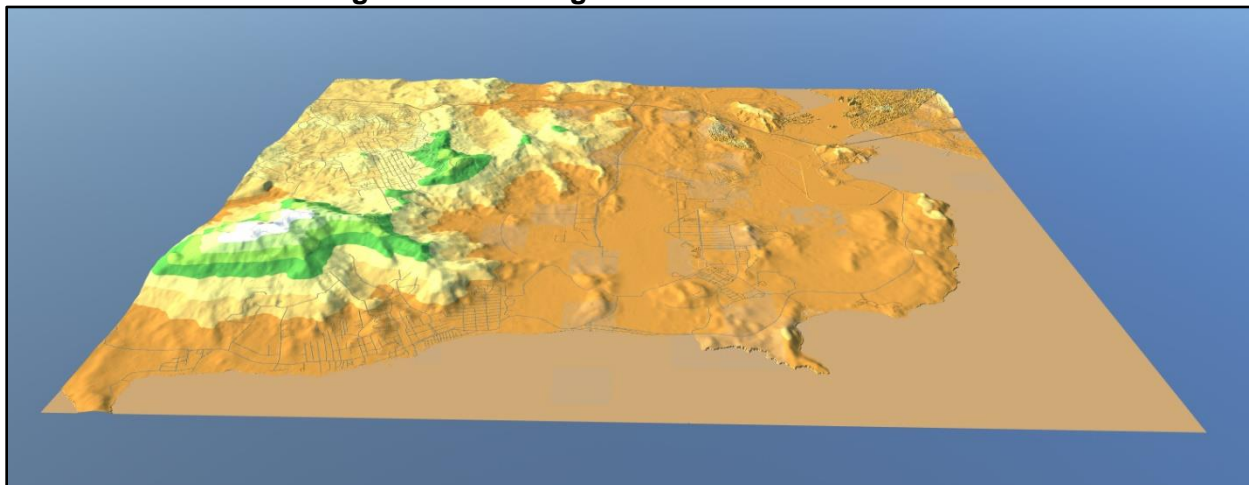
Figura N° 8. Modelo Digital de Elevaciones Generado para el Estudio



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore.

El rango de elevaciones de la zona varía entre 0 y 500 metros. Se unificó la referencia de la ACP, y el resto de la información topográfica, utilizando el Nivel Medio del Mar (el LIDAR de ACP utilizó como referencia el PLD por lo cual se hizo el ajuste pertinente en el modelo).

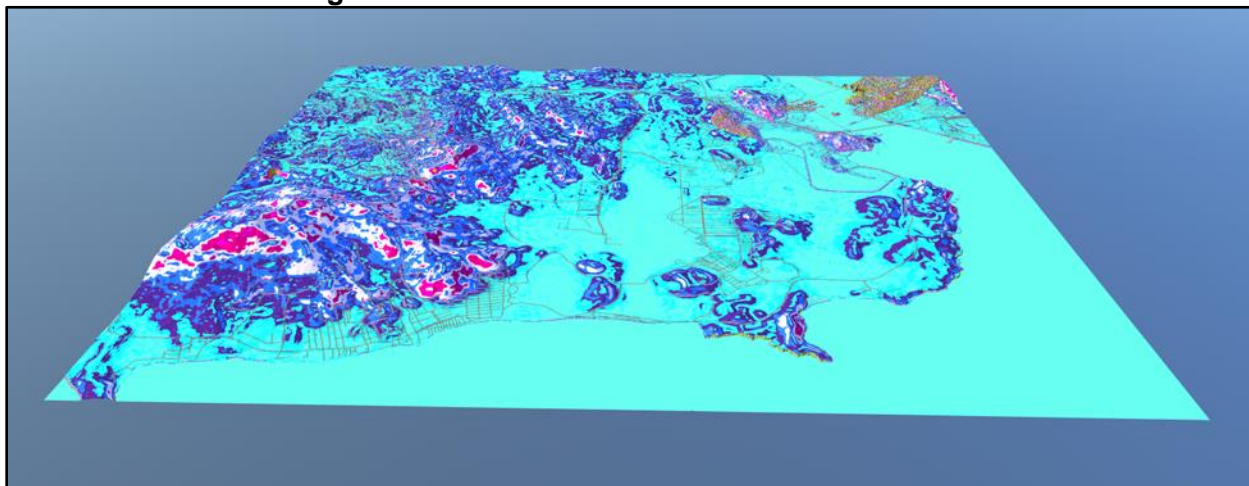
Figura N° 9. Orografía del Área de Estudio



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

Se verificó que la interpolación reflejara de manera adecuada las pendientes y la continuidad del terreno, importantes para la generación de las subcuencas y la acumulación y escurrimiento de agua.

Figura N° 10. Pendientes en el Área de Estudio

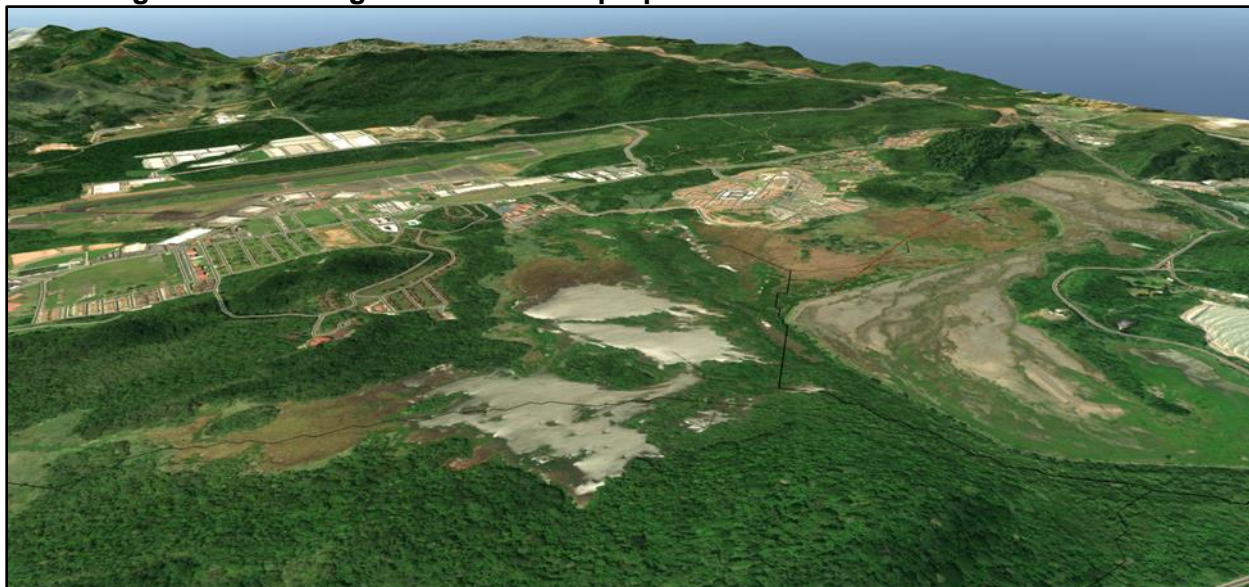


Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

3.2 IMÁGENES DE SATÉLITE

El Consultor ha verificado varias imágenes de satélite las cuales sirven de referencia para ubicar, principalmente, las áreas residenciales e infraestructura que se podría ver afectada. También se ha hecho análisis multiespectral, para conocer potenciales áreas con agua.

Figura N° 11. Imagen de Satélite superpuesta al DEM en el Área de Estudio



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

Como referencia, se presentan a continuación dos imágenes de satélite Sentinel-2:

IMAGEN DEL 18 DE JUNIO DEL 2021

En la misma se puede observar en color natural áreas en donde se retiene el agua. En la costa se puede observar que la marea no es alta.

Figura N° 12. Imagen de Satélite con Color Natural.



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

Realizando análisis multiespectral, generando un falso color de la imagen, se pueden identificar como una sombra azulada las áreas con agua. También se puede observar claramente en un marrón oscuro una zona húmeda que es por donde parece que va el agua saliendo poco a poco de la zona con una estrechez en la salida al mar.

Figura N° 13. Imagen de Satélite con Falso Color



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

IMAGEN DEL 24 DE MARZO DE 2022

La imagen más reciente que se obtuvo sin nubosidad fue la del 24 de marzo de 2022. La misma muestra que las áreas con agua son menores que las de junio de 2021 tomando en cuenta, además, que en este caso la marea está más alta. Se hace evidente este cambio al Norte y al Sur, en áreas en donde ahora el falso color muestra un verde intenso (tierra). Esta imagen fue tomada todavía en temporada seca mientras que, la del año 2021, ya fue tomada entrada la temporada lluviosa.

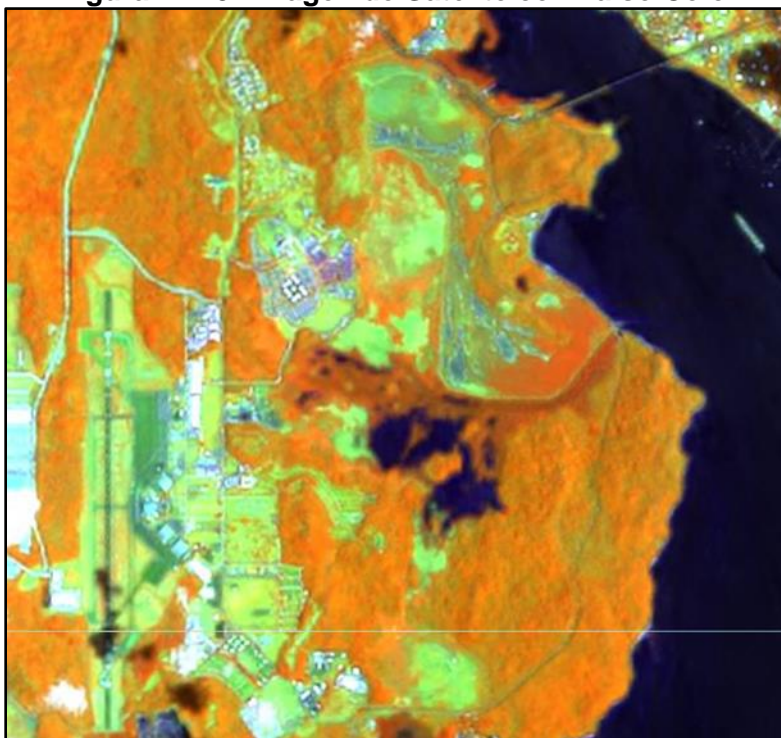
Es de resaltar también que la zona húmeda con color marrón oscuro se muestra similar en las dos imágenes.

Figura N° 14. Imagen de Satélite con Color Natural



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

Figura N° 15. Imagen de Satélite con Falso Color



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks.

3.3 INFORMACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DEL RELLENO

Se utilizó información de la Línea 3 del Metro, Autoridad del Canal de Panamá y del SIG de CSA Group para establecer el emplazamiento y la altura del relleno. Esta información fue utilizada en el modelo para el escenario Con Proyecto.

Figura N° 16. Emplazamiento del Relleno en el Área de Estudio sobre Hoja Topográfica del Instituto Nacional Tommy Guardia.



Fuente: IGN Tommy Guardia, hoja topográfica 1:50,000.

3.4 COBERTURAS SIG DEL ESIA

Se han utilizado como referencia las coberturas generadas por CSA Group Panamá, Inc. para el estudio de impacto ambiental. Por ejemplo, en el caso de las subcuencas y corrientes de agua, éstas han sido ajustadas de acuerdo con el Modelo Digital de Elevaciones que fue generado.

Complementariamente a la revisión de información existente, se han realizado tres visitas de campo y se han documentado diferentes puntos de interés con fotografías georreferenciadas que se encuentran descritas en el documento.

3.5 ANÁLISIS DE NIVELES DE MAREA EN EL ÁREA

Los niveles de agua marina en la ciudad de Panamá pueden caracterizarse mediante la información provista por la Autoridad del Canal de Panamá (A.C.P.) para la estación Balboa, la cual se encuentra ubicada en 8° 57' de Latitud Norte y 79° 34.4' de Longitud Oeste, en la desembocadura sur del Canal de Panamá. El nivel de referencia utilizado por la A.C.P. se denomina Nivel de Referencia Preciso (Precise Level Datum o P.L.D.).

Los niveles característicos del mar en Balboa se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 1. Niveles característicos de referencia de la Marea en Balboa

CERO DE MAREAS = MEAN LOW WATER SPRING (M.L.W.S.)	2.591	m debajo del Nivel Medio (M.S.L.)
	2.322	m debajo del P.L.D. A.C.P.
CERO DEL REGISTRO DE MAREAS	3.658	m debajo del P.L.D. A.C.P.
	3.927	m debajo del Nivel medio (M.S.L.)
	1.336	m debajo del M.L.W.S.
5.90	Marea Alta Extrema	
4.70	MHWS - Nivel Medio de Mareas Altas de Sicigias	
3.80	MHWN - Nivel Medio de Mareas Altas de Cuadratura	
2.59	Nivel Medio del Mar (MSL)	
1.10	MLWN - Nivel Medio de Mareas Bajas de Cuadratura	
0	MLWS - Nivel Medio de Mareas Bajas de Sicigias	
-0.46	Promedio Mensual de Marea Baja Extrema	

Fuente: Estación Balboa, ACP.

El nivel máximo horario registrado entre 1907 a 2010 es de 3.31 m (respecto al M.S.L.). El máximo instantáneo registrado indicado por la A.C.P. según el Formato SK 52-98 del Panamá Canal Eng. Div. Nov. 1967, es de 3.33 m, sólo 2 cm superior.

El nivel mínimo horario registrado es de -3.61 m. El mínimo instantáneo indicado por la A.C.P. en el Formato SK 52-98 del Panamá Canal Eng. Div. Nov. 1967, es de -3.71 m.

Existen algunas discrepancias menores con las referencias de nivel indicadas en el Documento "Monitoreo de Mareas en los Litorales Pacífico y el Caribe, de las Costas Panameñas. Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS)" (Autoridad Nacional de Administración de Tierras. Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia), que se ilustran en la siguiente figura.

Figura N° 17. Niveles de referencia en Balboa.



Fuente: ANATI (2013)

Las Mareas de Sicigias, son las mareas de mayor amplitud que ocurren en períodos de luna llena y luna nueva. Basado en las elevaciones medias de mareas para el período de 19 años (1916-1934) según ANATI el Nivel Medio de las mareas bajas de Sicigias está 7.617 pies (2,322 m) por debajo del Nivel de Referencia del Canal (PLD). Por lo tanto, el nivel Medio del Mar (MSL) está aproximadamente a 0.31 m por encima del PDL en Balboa.

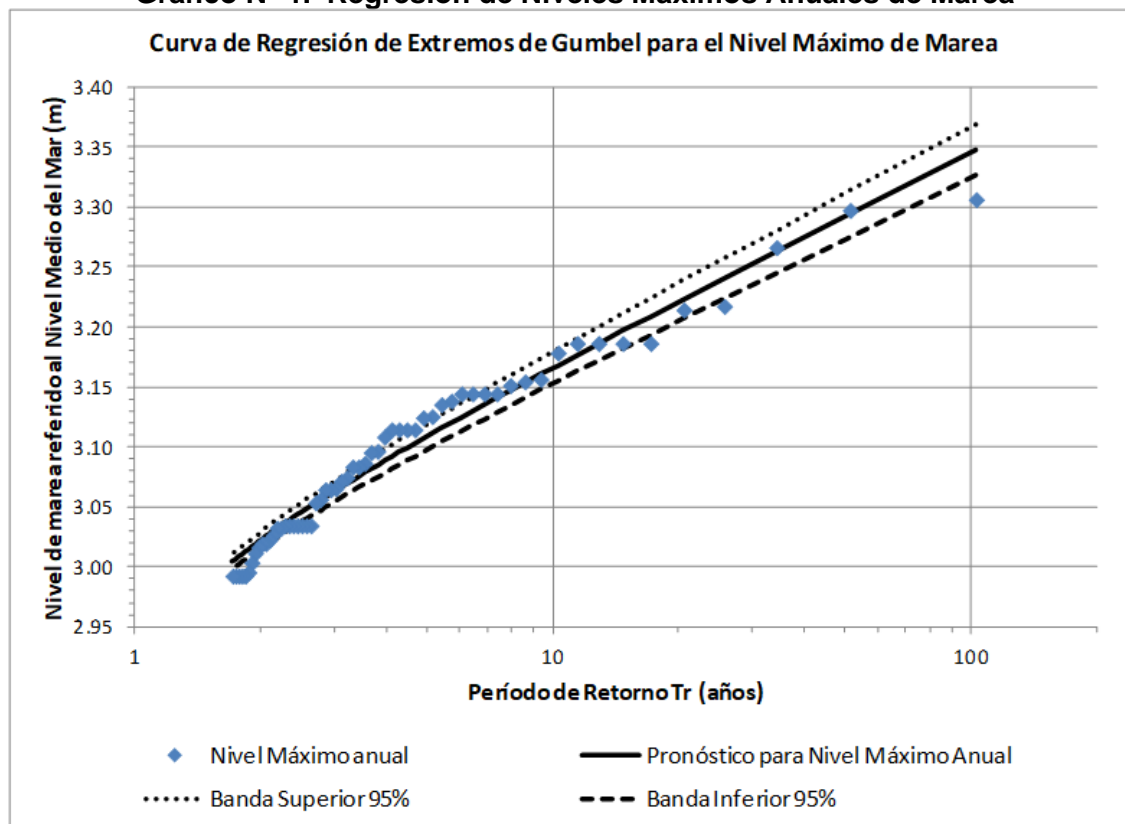
El siguiente gráfico muestra el ajuste de la estadística de niveles horarios máximos anuales mediante una distribución de extremos de Gumbel:

$$H_s (\text{máx.}) = a + b * y$$

$$y = \text{Variable reducida} = -\ln(-\ln(1-1/Tr))$$

Tr = Período de Retorno del evento (recurrencia), en años

El coeficiente de correlación obtenido fue $R = 0.98567$.

Gráfico N° 1. Regresión de Niveles Máximos Anuales de Marea


Fuente: PLADES

Los niveles pronosticados que se presentan en la tabla siguiente tienen una banda de incertidumbre de ± 2 cm con una probabilidad del 95%, según se puede apreciar en las bandas presentadas en el gráfico precedente.

Tabla N° 2. Recurrencia de Niveles Máximos de Marea

T_r (años)	Nivel M.S.L. ¹ (m)	Nivel M.L.W.S. ² (m)
2	3.02	5.61
5	3.11	5.70
10	3.17	5.76
25	3.24	5.83
50	3.29	5.88
100	3.35	5.94

Fuente: PLADES.

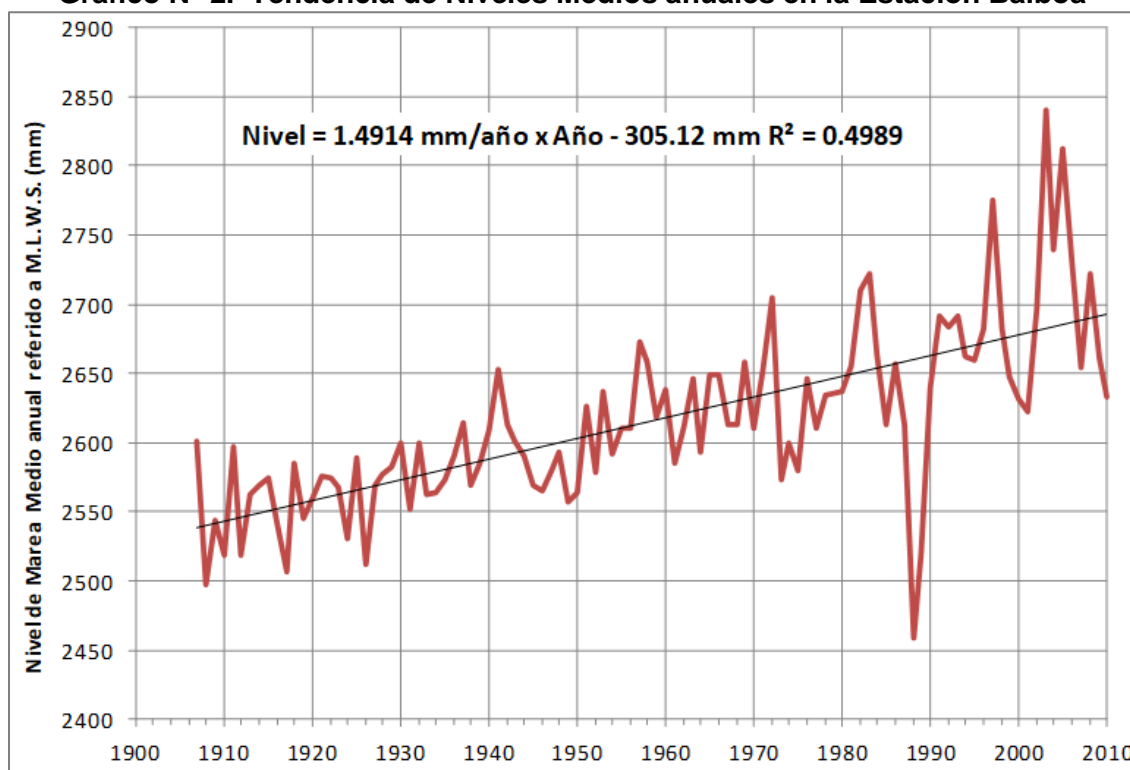
¹ M.S.L.: Mean Sea Level (Nivel Medio del Mar).

² M.L.W.S.: Mean Low Water Sprint (Nivel Medio de Bajamares de Sicigias).

Los niveles máximos anuales presentan escasa variación, a tal punto que en varias oportunidades los niveles máximos de años sucesivos son idénticos. El nivel máximo horario registrado presenta una recurrencia algo superior a los 50 años.

El Nivel Medio del mar está aumentando en las costas panameñas como en todo el planeta. El gráfico siguiente ilustra la tendencia calculada de los Niveles Medios Anuales obtenidos procesando el registro de niveles horarios. El nivel del mar se incrementa cada año en promedio en 1.5 mm, es decir, se estiman 15 cm por siglo.

Gráfico N° 2. Tendencia de Niveles Medios anuales en la Estación Balboa



Fuente: PLADES

En la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático – Panamá (Ministerio de Ambiente, 2018), se indica que mediante datos satelitales el incremento de niveles en Colón 1992-2012 equivale a 1.8 mm/año, mientras que según datos de mareógrafo entre 1909 y 1979 alcanzaba 1.4 mm/año, de lo cual se deduce un probable aumento de la tasa de incremento del nivel de mar.

Investigaciones del IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) afirman que debido al aumento de la temperatura global causada por los gases de efecto invernadero, el nivel medio del mar se elevará durante el presente siglo en un valor desconocido, pero que se estima entre 20 cm y 1 m, afectando las áreas costeras, tales como la Ciudad de Panamá.

Ello implica que, para el proyecto bajo análisis, resultará conveniente contemplar un margen moderado en las cotas de diseño, que permita compensar posibles incrementos del nivel del mar en las próximas décadas. Se adopta un margen de seguridad de 10 cm por este motivo para recurrencia 50 años y de 15 cm para recurrencia 100 años, el cual tiene en consideración también el margen de incremento de niveles instantáneos en relación con los valores horarios que se tuvieron en cuenta en la estimación de las recurrencias.

Las condiciones de niveles de marea considerando la posible sobreelevación del Nivel del Mar son, por lo tanto:

Tabla N° 3. Períodos de retorno de niveles extremos en Balboa incluyendo el efecto del Cambio Climático

Tr	Nivel de diseño M.S.L. ³	Nivel de diseño M.L.W.S. ⁴
(años)	(m)	(m)
2	3.1	5.7
5	3.2	5.8
10	3.3	5.9
50	3.4	6.0
100	3.5	6.1

Fuente: PLADES

No obstante, al considerar la combinación entre el nivel del mar y las precipitaciones, no se considera razonable que las condiciones máximas se combinen simultáneamente, cuestión que se trata más adelante.

La condición de marea considerada para analizar la hidrodinámica del área de estudio ha sido los Promedios de bajamares y pleamares de sicigia, con amplitud de 4.7 metros y nivel máximo de 2.10m MSL.

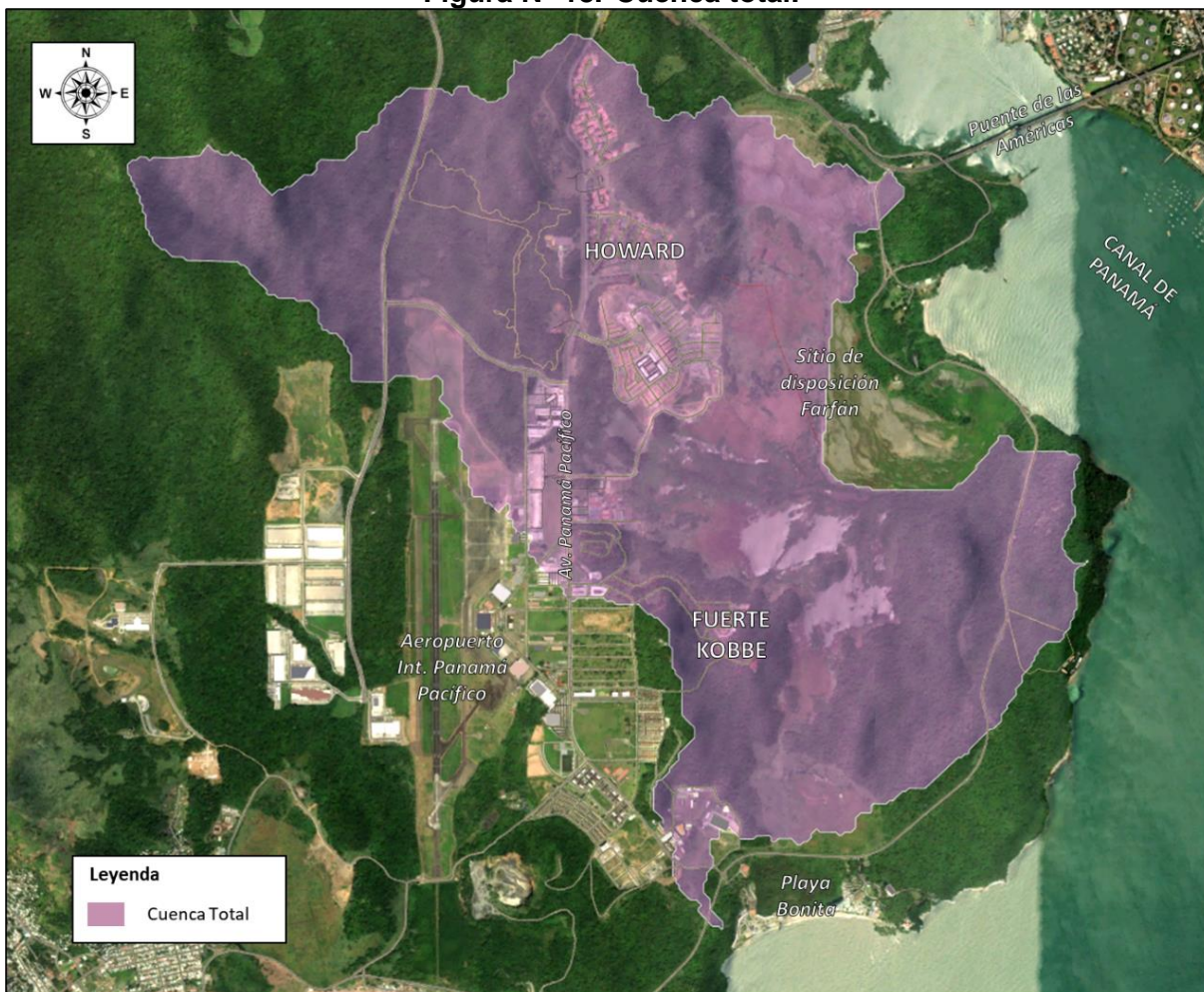
³ M.S.L.: Mean Sea Level (Nivel Medio del Mar)

⁴ M.L.W.S.: Mean Low Water Sprint (Nivel Medio de Bajamares de Sicigias)

4 DETERMINACIÓN DE CUENCAS Y CORRIENTES DE AGUA

La figura a continuación corresponde a la cuenca total, el cual tiene un área de 1,366 ha.

Figura N° 18. Cuenca total.



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore

La cuenca total ha sido particionada en cinco subcuencas principales de aporte, y un área de precipitación directa, utilizando el software Infracore 360. Las mismas se presentan individualmente en planta a continuación, y sus características morfológicas se indican en la tabla más adelante.

4.1 SUBCUENCA NORTE (N)

Figura N° 19. Subcuenca Norte (N)



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks

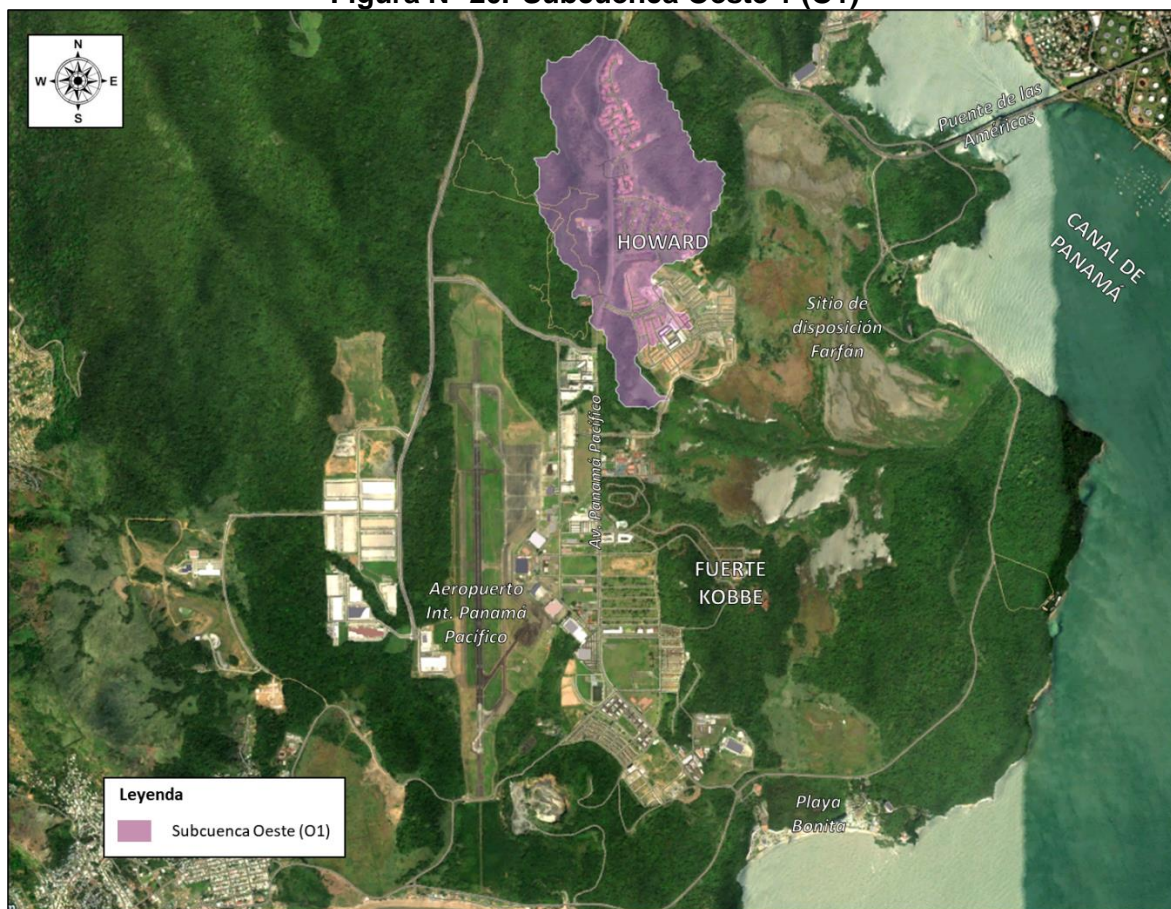
Entre el área de aporte a la zona de interés y la cuenca del río Matutela existe un dique que posee compuertas que comunican la última a través del mismo, como se ha comprobado en la inspección de campo; la condición de apertura de las mismas, y su operación será incluida con mayor detalle en la Fase 2 del estudio en base a la información que sea suministrada por la ACP,

Cabe señalar que, si bien a partir del Modelo Digital de Elevaciones ambas cuencas parecen conectadas, se considera que dicha conexión no es tal y que ambas regiones se mantienen separadas a través del dique; de ser así, ello determinará una ligera modificación de la subcuenca Norte.

En las condiciones representadas, el área es de 146 ha (N).

4.2 SUBCUENCA OESTE 1 (O1)

Figura N° 20. Subcuenca Oeste 1 (O1)



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks

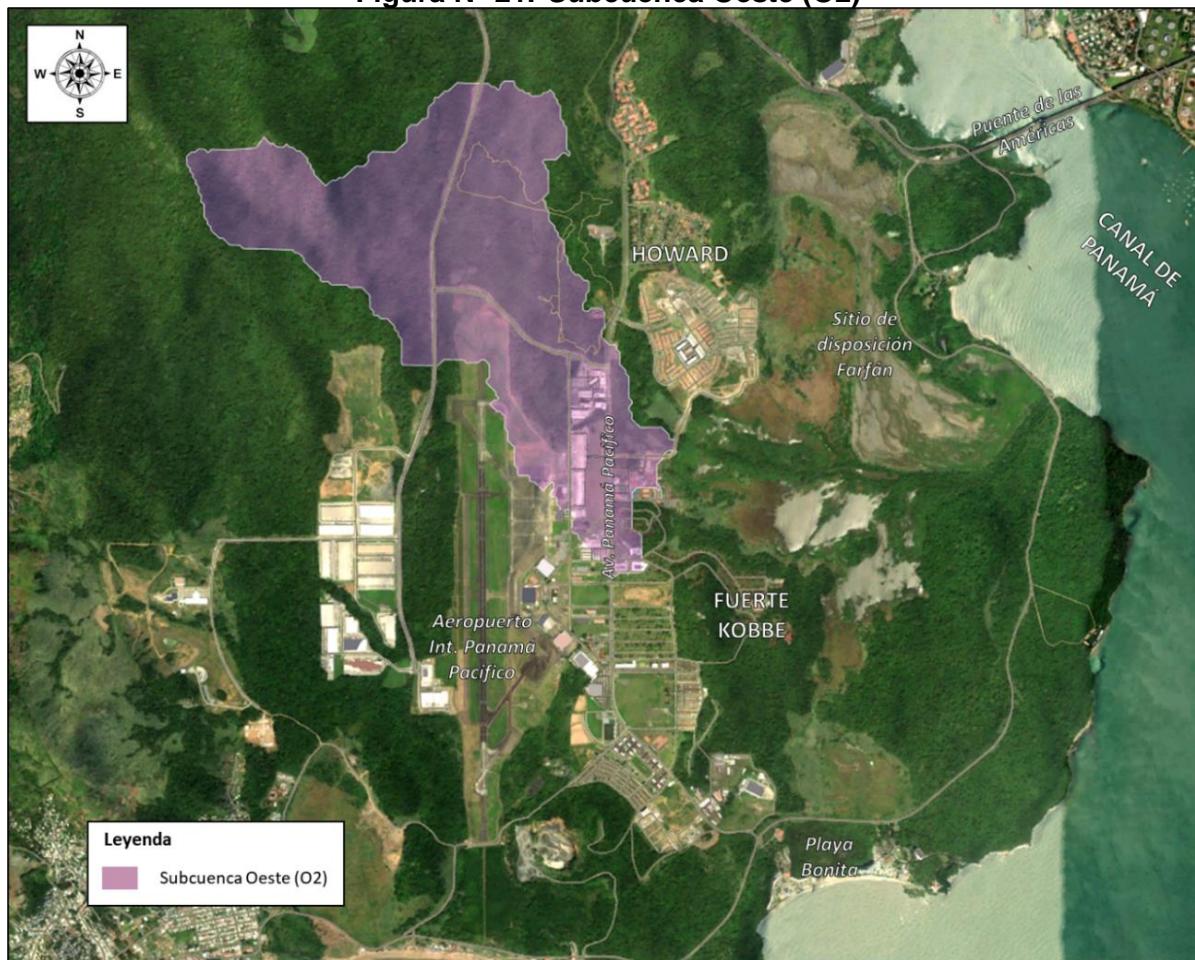
Esta subcuenca entra al área de estudio aledaña al lado Oeste de Woodlands determinándose un área potencialmente inundable que pudo comprobarse en la investigación de campo.

El área en cuestión es de 192 ha (O1).

4.3 SUBCUENCA OESTE 2 (O2)

Es la mayor área de aporte, correspondiente a la cabecera del río Farfán, con un área de 426 ha (O2).

Figura N° 21. Subcuenca Oeste (O2)



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks

Esta área atraviesa la avenida principal de Howard con una alcantarilla cajón como se aprecia en las fotos a continuación. La capacidad de descarga de la misma, sin desborde, se ha estimado preliminarmente en 60 m³/s.

Figura N° 22. Alcantarilla de cruce del río Farfán en Howard



Fuente: PLADES

4.4 SUBCUENCAS DEL SECTOR SUR (S1) Y (S2)

La primera subcuenca, que entra al área inmediatamente antes de la descarga al mar, es de 69 ha (S1).

Figura N° 23. Subcuenca Sur (S1).



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infraworks

La segunda subcuenca que entra al sistema, también inmediatamente antes de la descarga, tiene 295 ha (S2).

Figura N° 24. Subcuenca Sur (S2)



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore

Todas las subcuencas han sido analizadas por separado y en conjunto, utilizando distintos métodos de cálculo, como se indica más adelante. Para ello se han tenido en cuenta, en forma individual, sus características hidrológicas relevantes (área, longitud del cauce, desnivel, pendiente) y se han integrado en el modelo de inundaciones considerando las situaciones más conservadoras en cuanto a caudales y niveles, compatibles con la recurrencia de diseño.

En la Fase 2 se incorporará más información en el modelo digital de elevaciones ajustándose de ser necesario las subcuencas.

5 COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA SEGÚN LINEAMIENTOS DEL MANUAL DE REVISIÓN DE PLANOS DEL MOP, 3ª EDICIÓN

El coeficiente de escurrimiento es un valor adimensional utilizado en hidrología, en particular en el Método Racional, que representa la relación entre la parte de la precipitación que circula superficialmente y la precipitación total. Además de la duración de la lluvia, también dependerá de la zona a que corresponda (urbana, suburbana, rural) y a los materiales constituyentes de la superficie de escurrimiento.

A los efectos del análisis, la determinación de este parámetro se basará en el criterio del MOP de la página 178 de la 3ª Edición del Manual de Revisión de Planos: según la cual se exige la utilización de los siguientes valores mínimos de C:

- $C = 0.70$ Para proyectos, cuyo aporte de caudal provenga de zonas protegidas sin posibilidad de futuros desarrollos (Parques nacionales, cuenca del canal de Panamá y áreas protegidas previamente establecidas).
- $C = 0.75$ Para diseños pluviales en áreas rurales y de bajo crecimiento, con desarrollo de lotificaciones con tamaños de lotes mayores a 1000m^2 .
- $C = 0.85$ Para diseños pluviales en áreas rurales y en rápido crecimiento, con desarrollo de lotificaciones con tamaños de lotes entre 600m^2 y 1000m^2 .
- $C = 0.90 - 1.00$ Para diseños pluviales en áreas urbanas deforestadas (se adopta 0.95).
- $C = 1.00$ Para diseños pluviales en áreas completamente pavimentadas.

Dada las características del área de estudio, resulta evidente la aplicación del primer valor de $C = 0.70$, para la casi totalidad de la cuenca, a excepción de una porción de las cuencas O1 y O2 donde cabe utilizar el valor de $C = 0.75$.

6 ESTIMACIÓN DE CAUDALES

6.1 MÉTODOS DE CÁLCULO HIDROLÓGICO APLICADOS

6.1.1 Método Racional

El caudal se calcula utilizando la expresión

$$Q [m^3/s] = \frac{C \times I \times A}{360}$$

donde

- C: coeficiente de escorrentía ponderado según criterios del MOP, según lo establecido en el punto anterior
- ITR: intensidad para el Tiempo de Concentración y el período de retorno TR en años, según fórmulas del MOP
- A: área de la cuenca en hectáreas

Los resultados se presentan en la más adelante Tabla N° 4 más adelante

6.1.1.1 Determinación del tiempo de concentración

Para la determinación del Tiempo de Concentración se aplicó la expresión de Kirpich:

$$Tc (minutos) = 60 \times 0.95 \times \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

con

- L: Longitud del cauce principal en km
- H: desnivel en m

Los resultados se presentan en la Tabla N° 4 más adelante.

6.1.1.2 Determinación de la intensidad de diseño

La determinación de las intensidades de precipitación se basó en los siguientes criterios:

La 3ª Edición del Manual de Revisión y Aprobación de Planos del MOP, en el caso de las Ecuaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia, en la página 181 indica... *“El inconveniente principal para la elaboración de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia reside en que no se cuenta con la calidad de los registros y la longitud de estos. Por calidad nos referimos a que se requieren series de datos que nos proporcionen*

datos cada 5, 10 ó 15 minutos esto requiere de una estación registradora automática, pero la mayoría de las estaciones cuentan con registros de precipitación manuales, o sea estaciones pluviométricas, es decir un observador humano acude a las 7:00 am y a las 6:00 pm todos los días y lo que tenemos así es un dato diario”.

La siguiente tabla, tomada de la página 194 de la 3ª Edición, indica la ecuación de intensidad, para distintas duraciones y períodos de retorno, para las cuencas cercanas al proyecto:

Tabla N° 4. Ecuación de Intensidad relación Frecuencia para eventos con duración d en horas de la cuenca del río entre Caimito y el Juan Díaz (mm/hr)

Tabla: Ecuación de Intensidad Relación Frecuencia para Eventos con Duración d en Horas de la cuenca del río entre Caimito y el Juan Díaz [mm/hr].

$$I = \frac{a}{d + b}$$

T (años)	2	5	10	20	30	50	100
a (mm)	135.191	192.060	230.796	268.408	290.252	317.666	354.980
b (hr)	0.596	0.718	0.780	0.829	0.853	0.881	0.914
R ²	99.19%	98.92%	98.73%	98.55%	98.45%	98.33%	98.17%

Fuente: 3ª Edición del Manual de Revisión y Aprobación de Planos del MOP.

La aplicación de la tabla, para la duración de 50 minutos y 100 años de recurrencia, típica de la cuenca total del proyecto, arroja una intensidad de 204 mm/hora, que se considera un valor excesivo.

Cabe mencionar que la 3ª Edición (página 218) habilita, en cuanto a las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, el uso temporal de la edición anterior; y cita: “... Sin embargo los promotores podrán utilizar las ecuaciones del manual anterior hasta 24 meses después de la fecha de publicación de este documento en Gaceta Oficial”.

Con este criterio aplicado a T=100 años y TC=50 minutos:

$$I_{100} = \frac{(370 * 25.4)}{(33 + 50)}$$

La fórmula arroja una intensidad de 113 mm/h, muy inferior a la que se determina con las ecuaciones de la 3ª Edición del Manual del MOP.

Analizando estos criterios, se concluyó que la opción más recomendable es utilizar las ecuaciones del Manual de Revisión de Planos del MOP; 2ª Edición.

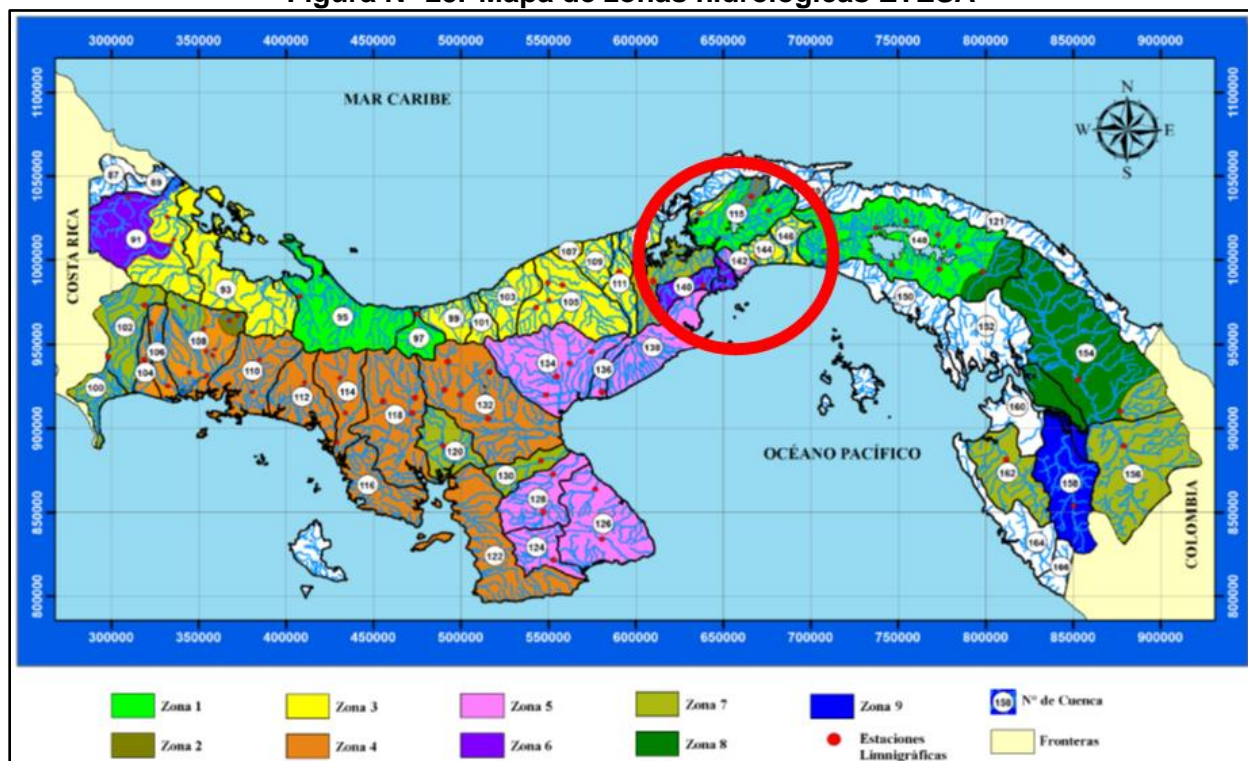
Los resultados se presentan en la tabla más adelante.

6.1.2 Método de Análisis Regional de las Crecidas Máximas

Dado que el área de algunas subcuencas supera las 250 ha, indicado como límite de validez del método Racional, para la determinación del caudal de análisis se ha utilizado también el Método de Análisis Regional de las Crecidas Máximas de ETESA, para lo cual:

- Se delimita y se mide el área de drenaje de la cuenca hasta el sitio de interés, en Km².
- Se determina a qué zona pertenece el sitio de interés de acuerdo con el Mapa de la figura continuación; nuestro caso corresponde a la Zona 5, representada por la cuenca 142 de los ríos entre el Caimito y el Juan Díaz, entre los que se cuenta el río Farfán utilizado como referencia.

Figura N° 25. Mapa de zonas hidrológicas ETESA



Fuente: ETESA.

- Se calcula el caudal máximo promedio utilizando una de las ecuaciones representativas:

Tabla N° 5. Ecuaciones representativas por zonas hidrológicas

Zona	Número de ecuación	Ecuación	Distribución de frecuencia
1	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$	Tabla # 1
2	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$	Tabla # 3
3	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 1
4	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 4
5	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$	Tabla # 1
6	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$	Tabla # 2
7	4	$Q_{\text{máx}} = 9A^{0.59}$	Tabla # 3
8	5	$Q_{\text{máx}} = 4.5A^{0.59}$	Tabla # 3
9	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$	Tabla # 3

Fuente: ETESA.

En nuestro caso resulta aplicable la Ecuación No. 5:

- Se calcula el caudal máximo instantáneo para distintos periodos de recurrencia, multiplicando el caudal promedio máximo, que se obtuvo en el punto anterior, por los factores que se presentan en el cuadro a continuación, utilizando la tabla correspondiente a la zona del sitio de interés:

Tabla N° 6. Factores de Maximización

<i>Factores $Q_{\text{máx.}}/Q_{\text{prom.máx}}$ para distintos Tr.</i>				
Tr , años	Tabla # 1	Tabla # 2	Tabla # 3	Tabla # 4
1.005	0.28	0.29	0.3	0.34
1.05	0.43	0.44	0.45	0.49
1.25	0.62	0.63	0.64	0.67
2	0.92	0.93	0.92	0.93
5	1.36	1.35	1.32	1.30
10	1.66	1.64	1.6	1.55
20	1.96	1.94	1.88	1.78
50	2.37	2.32	2.24	2.10
100	2.68	2.64	2.53	2.33
1,000	3.81	3.71	3.53	3.14
10,000	5.05	5.48	4.6	4.00

Fuente: ETESA.

Para el caso que nos ocupa, el período de retorno a considerar es de TR= 100 años, con el factor resulta **2.68**.

En la Tabla N° 7 más adelante se presentan los resultados de los caudales determinados con este método.

6.2 MÉTODO DEL HIDROGRAMA SINTÉTICO TRIANGULAR

Para la determinación del hidrograma asociado al caudal máximo de cada subcuenca, se ha utilizado el Método del Hidrograma Sintético Triangular, según el cual:

- Se delimita y se mide el área de drenaje hasta el sitio de interés, en ha.
- Se determina el hietograma de la tormenta de diseño utilizando las intensidades máximas de TR= 100 años indicadas por el MOP para el sector Pacífico, como se presenta en la tabla más adelante.
- Se determina el Tiempo de Concentración según se indicó en tabla más adelante
- Se determina el Tiempo al Pico T_p mediante la expresión

$$T_p \text{ minutos} = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.6 \times T_c$$

siendo D=duración de la lluvia, T_L = tiempo de retardo (o Lag), y T_c = tiempo de concentración

- Se determina la duración de la tormenta con la expresión correspondiente a grandes cuencas⁵:

$$D = 2 * \sqrt{T_c}$$

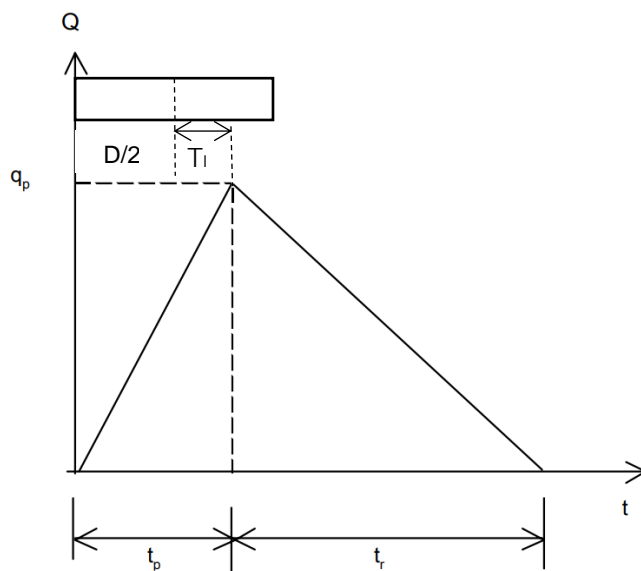
- Se determina el tiempo total de duración del hidrograma como

$$T_t = 2.67 \times T_p$$

- Se construye un hidrograma sintético para cada cuenca como se indica en la figura.
- El caudal de pico se calcula según el Método de Análisis de Regional de Crecidas Máximas como se indicó en la tabla.

⁵ Alternativamente se utiliza el Tiempo de Concentración para cuencas pequeñas

Figura N° 26. Esquema de Hidrograma Sintético Triangular



Fuente: PLADES

Para la Fase 2 se verificarán y, de ser necesario, se ajustarán los hidrogramas, volúmenes y caudales de acuerdo con las subcuencas e información complementaria recabada.

Tabla N° 7. Cálculo de Caudales y Volúmenes

CUENCA	AREA (ha)	LONGITUD (m)	ALTURA INICIAL (m)	ALTURA FINAL (m)	PENDIENTE MEDIA	TC (hr)	C	TR (AÑOS)	I (mm/hr)	Q (m³/S) RACIONAL	Q (m³/s) CRECIDAS	D (hr)	Tp (hr)	Tt (hr)	VOL (m³)
Oeste 1 (O1)	191.58	2543.1	15.781	2.4	0.005	1.03	0.72	100.0	99.2	38.02	55.06	2.27	1.75	4.68	463,601
Oeste 2 (O2)	382.5	3741.9	85.629	2.4	0.022	0.79	0.72	100.0	116.5	89.09	82.80	2.27	1.61	4.30	641,355
Norte	67	930	6.32	2.4	0.004	0.52	0.70	100.0	146.9	19.14	29.62	2.27	1.44	3.86	205,669
Sur 1 (S1)	69.05	709.7	19.75	2.4	0.024	0.21	0.70	100.0	205.3	27.56	30.16	2.27	1.26	3.37	182,994
Sur 2 (S2)	258.54	2311.4	8.004	2.4	0.002	1.29	0.70	100.0	85.2	42.85	65.71	2.27	1.91	5.09	602,402

Nota: la duración de la lluvia y los datos asociados podrán ajustarse en función de los volúmenes resultantes de la modelación.

TC: tiempo de concentración

C: coeficiente de escorrentía ponderado según criterios del MOP

TR: periodo de retorno

I: intensidad

Q: caudal

D: duración de la lluvia

Tp: tiempo pico

Tt: tiempo total de duración del hidrograma

Fuente: PLADES, S.A.

7 MODELACIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN

7.1 EL MODELO RIVERFLOW2D PARA INFRAWORKS 360

El modelo RiverFlow2D Flood Simulation de Hydronia para Autodesk InfraWorks es una tecnología que combina la simulación de inundaciones bidimensionales (2D) con un modelo 3D del terreno; con ello, los usuarios de InfraWorks obtienen la capacidad de simular, visualizar y animar eventos de inundación bidimensionales directamente en el entorno del modelo de Autodesk InfraWorks mientras se utiliza el modelo hidrodinámico de última generación Hydronia RiverFlow2D, con el cual se puede configurar y realizar rápidamente simulaciones prácticas de inundaciones fluviales y costeras para abordar las evaluaciones de riesgo de inundaciones en zonas costeras e inundables urbanizadas, exactamente el alcance que persigue este proyecto.

Las características salientes del modelo incluyen:

- Crear área de simulación de flujos de entrada y salida del modelo
- Creación automática de una malla de superficie simplificada
- Establecer valores n de Manning uniformes o especialmente variados para el modelo. A este respecto, cabe destacar que se ha utilizado la tabla de la 3ª Edición del Manual de Revisión de Planos del MOP que establece los siguientes valores:

Tabla N° 8. Coeficiente de Rugosidad de Manning

" n "	Descripción del tipo de canal
0.012	Para Canales de Matacán repellado.
0.015	Para Canales de Matacán Liso sin Repellar
0.020	Para Canales de Matacán Liso y Fondo de Tierra.
0.025	Para Cauce de tierra lisa con Vegetación Rasante.
0.030	Para Cauce de tierra con Vegetación normal, lodo con Escombros o irregular a causa de erosión.
0.035	Excavaciones Naturales, cubiertas de escombros con vegetación.
0.020	Excavaciones Naturales de trazado sinuoso.

Fuente: 3ª Edición del Manual de Revisión y Aprobación de Planos del MOP.

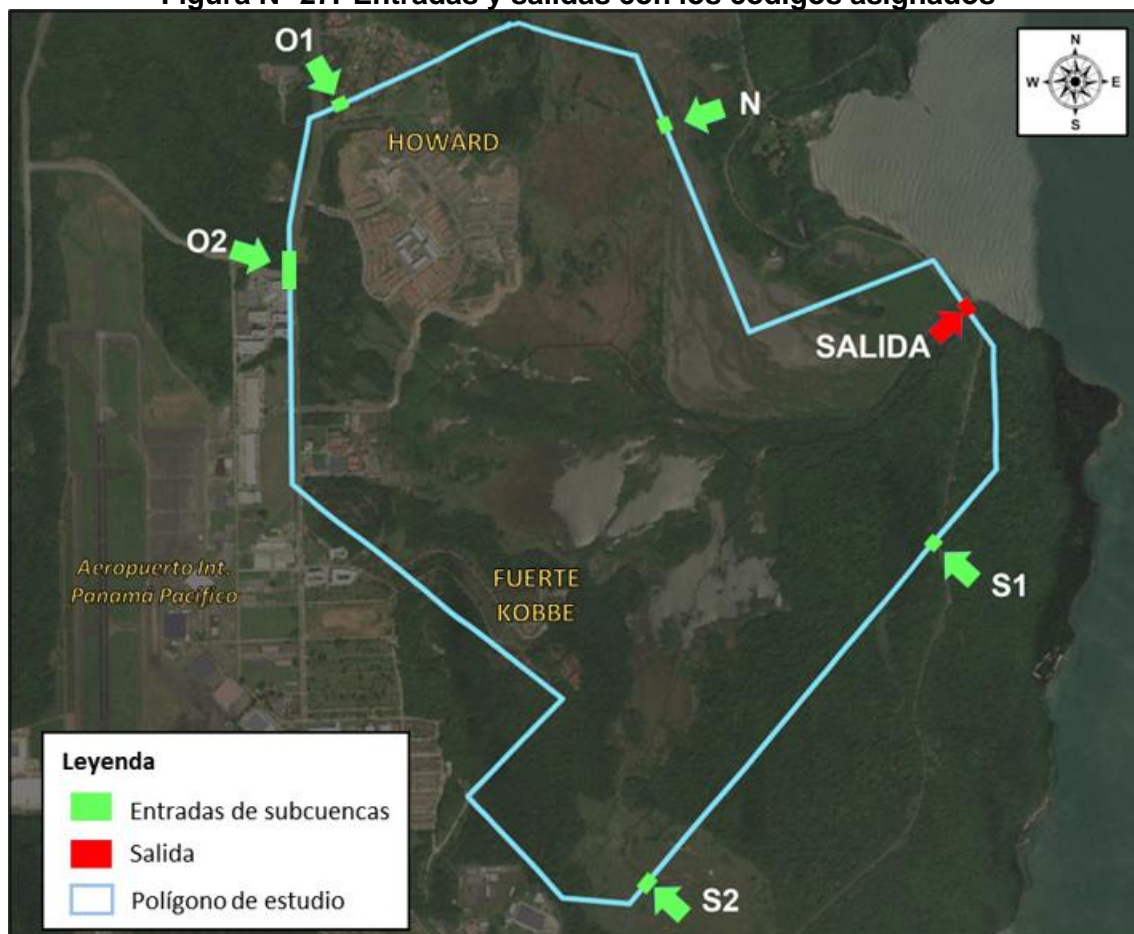
- Determinar el tiempo de simulación y su incremento.
- Obtener planos detallados, y altimétricamente precisos, de la superficie de inundación.
- Animar la superficie de inundación resultante por elevación, profundidad y velocidad del agua.

- Exportar los datos del modelo a otros modelos hidráulicos.

7.2 DETERMINACIÓN DEL ENTORNO DE ANÁLISIS DEL MODELO

Una de las ventajas del modelo, como se indicó, es su adaptabilidad al entorno Infracworks, que permite trabajar con escenarios topográficos reales determinando, por su parte, las condiciones de borde de manera sumamente simple: en efecto, indicando un polígono (definido por el usuario) que enmarca el área de interés, y señalando los puntos de ingreso y salida del caudal sobre el entorno real 3D de Infracworks, se obtiene la base de elementos de interés para el análisis hidráulico. Los datos de entrada incluyen, además, los hidrogramas de diseño con sus caudales pico y las condiciones de marea, en un marco temporal conjunto que permite compatibilizar los tiempos de cada uno. La figura a continuación, en conjunto con la Tabla N° 7, representa lo indicado.

Figura N° 27. Entradas y salidas con los códigos asignados



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracworks

A partir de lo señalado, se han analizado dos escenarios:

7.2.1 Condición Existente. Modelo sin relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL

Corresponde a la situación de la Línea Base, considerando caudales de aporte de 100 años de recurrencia, calculados con el método más conservador según la Tabla 7 (Método de las Crecidas Máximas), y una condición de marea sinusoidal con amplitud comprendida entre el promedio de las bajamares de sicigia (origen de mareas según las tablas de mareas y cartas náuticas), y el promedio de las pleamares de sicigia; como se indicó, este conjunto posee 4.7 m de amplitud, y un nivel máximo de marea de 2.1 m MSL; a esta situación, se le ha asignado una probabilidad del 100% que, combinada con la de la lluvia ($p=0.01$), mantiene la recurrencia de análisis en 100 años, al considerarse ambos eventos independientes.

La ecuación de la función de marea utilizada es:

$$h(t) = H \times \sin(t/T \times 180)$$

siendo

H= Amplitud de la marea asumida= 4.7m

T= duración de un hemicycle de marea= 12 horas

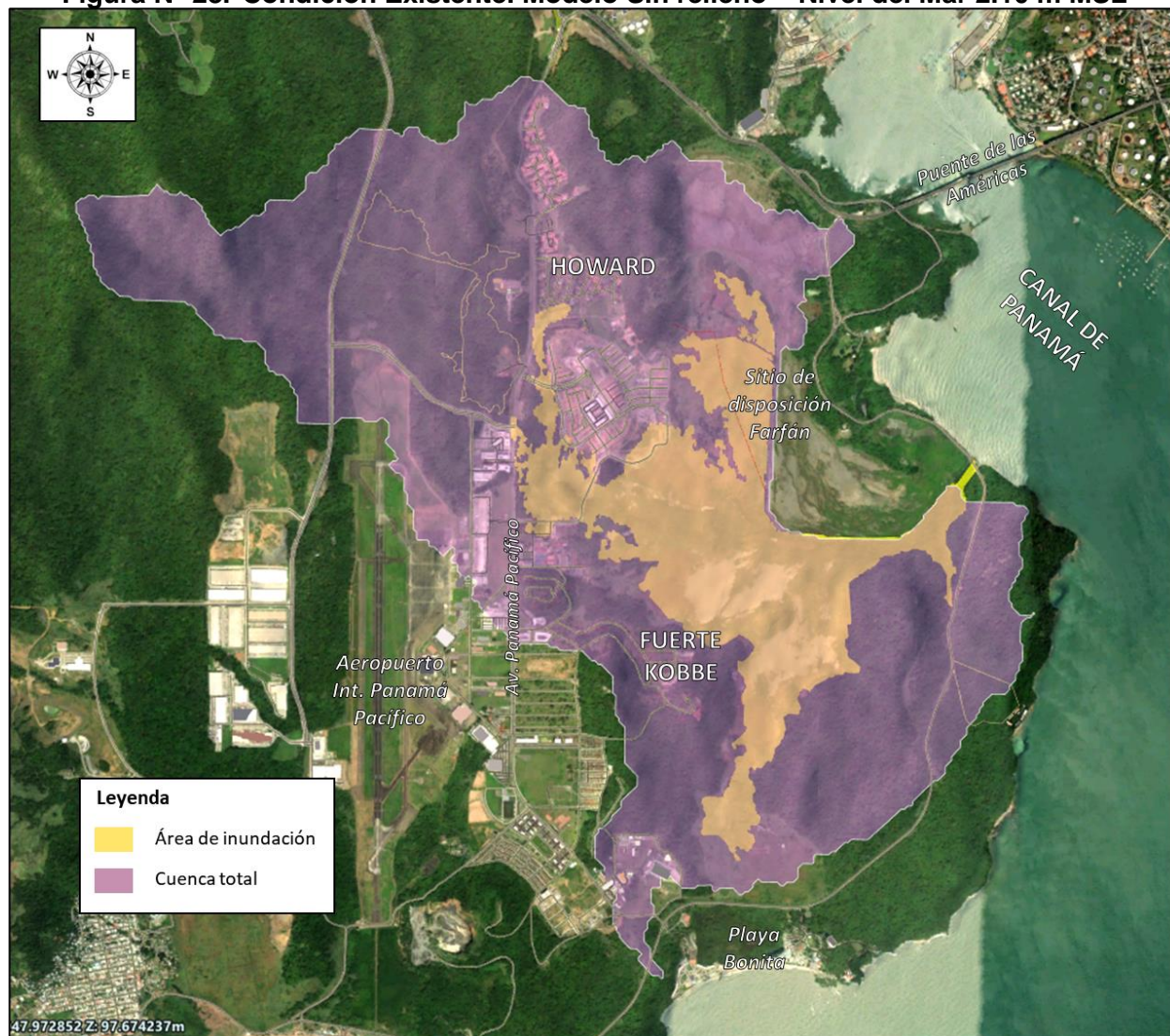
Cabe agregar que, al nivel máximo de marea, se le ha adicionado un valor constante de 0.30m que resulta de considerar el aporte directo de la precipitación sobre el área inundada, calculada a partir de los datos de la Tabla N° 7 como sigue:

- Promedio de la Intensidad de precipitación= 130.6 mm/h
- Duración máxima de la lluvia= 2.27 horas
- Altura de precipitación directa sobre el área inundada= 0.30m

A partir de este supuesto, el nivel de agua de partida, considerando ambos efectos de marea y precipitación directa, es de 2.40 m MSL.

La figura a continuación muestra el resultado de la modelación en la condición sin relleno (superficie verde), en el marco de la cuenca total de aporte (superficie morada):

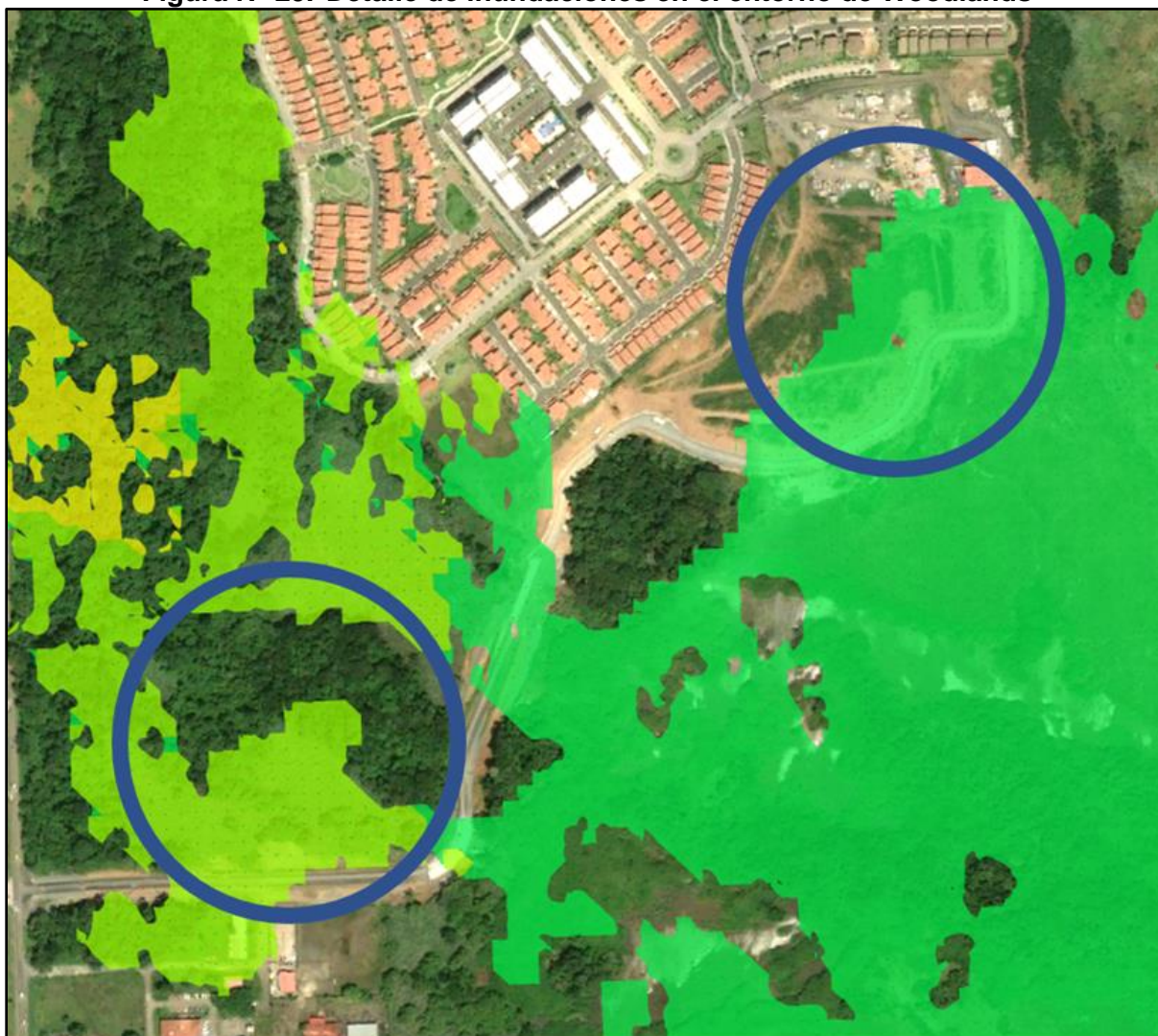
Figura N° 28. Condición Existente. Modelo Sin relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore.

En la actualidad, en la parte Oeste de Woodlands se observa la inundación del río Farfán cruzando y llegando a algunas viviendas al Norte y al Sur de la vía. En la parte Sureste de Woodlands se observa, asimismo, una porción inundable en la condición actual, pero se trata de un área en construcción. En la fase 2 del estudio se incluirá en el modelo el puente existente (parte Oeste) y los niveles finales de terracería para mayor precisión en el resultado del mismo.

Figura N° 29. Detalle de inundaciones en el entorno de Woodlands



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore.

7.2.2 Condición futura. Modelo con relleno – Nivel del Mar 2.10 m MSL

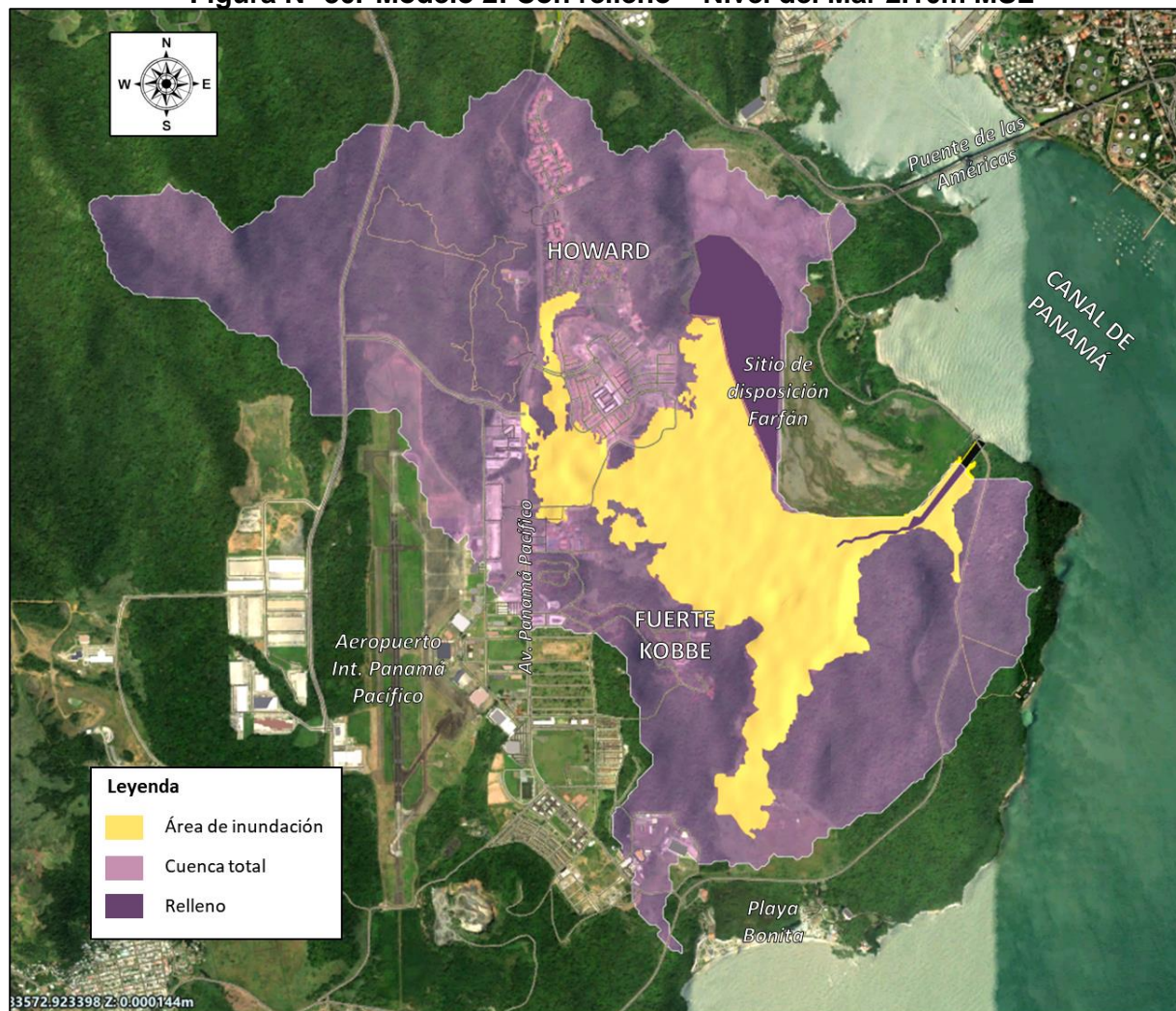
Para este análisis el modelo incorpora, en el sector Norte, el relleno de 53.39 ha previsto para el depósito del material de excavación del túnel, ocupando un área de inundación de la situación existente.

Debe tenerse presente que dicho relleno tendrá, asimismo, aportes de caudal al sistema, producto del sistema de drenaje que se diseñe, por lo que las áreas y caudales de aporte podrán variar sólo ligeramente con respecto a la situación previa a su construcción.

El resto de los supuestos permanece constante a los efectos de la simulación.

La figura a continuación representa la situación resultante con relleno:

Figura N° 30. Modelo 2: Con relleno – Nivel del Mar 2.10m MSL



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infravworks.

Para la Fase 2 se realizarán ajustes al modelo introduciendo más información al DEM realizando levantamientos topográficos puntuales de las obras de descarga existente del Río Farfán, cruces de calles y vías existentes, niveles de terracería y obras de descarga del Residencial Woodlands. También se verificarán las condiciones operativas de la ACP en el área de disposición de lodos incluyendo los trasvases y condiciones adicionales de recurrencia de lluvias y mareas.

En la sección siguiente se comparan ambas situaciones.

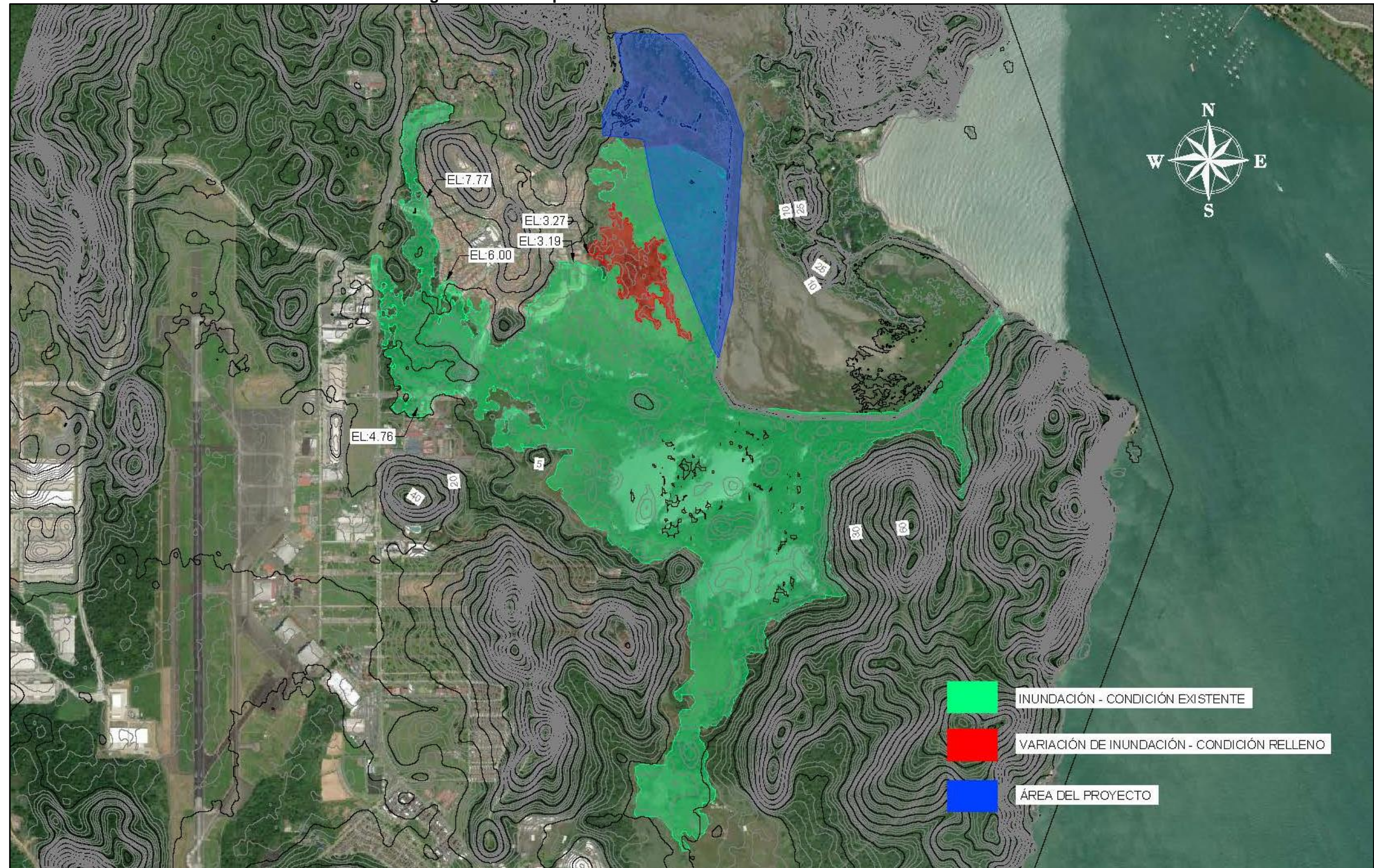
8 RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

Se han comparado, a lo largo del perímetro inundado en uno y otro caso, los niveles obtenidos con los resultados que se indican en la figura a continuación:

Como puede observarse, la diferencia entre ambas situaciones, en cuanto a los niveles de inundación, se reduce al área roja al Sureste de Woodlands. Preliminarmente se puede observar que, **no afecta los niveles de la urbanización**. Resta verificar si dicha situación pudiese afectar los niveles de descarga del sistema pluvial; sin embargo, el nivel de inundación resultante resulta inferior a 4.0 m MSL, valor menor que el nivel inferior de descarga de los pluviales reportado por Woodlands, de 4.50 m MSL.

Los resultados del diagnóstico preliminar que emanan del presente informe deberán verificarse en la siguiente etapa, a la luz de información detallada de campo y escritorio.

Figura N° 31. Comparación de los niveles de inundación.



Fuente: PLADES, mediante Autodesk Infracore.

9 ANEXOS

Los siguientes anexos son entregados en formato digital (USB)

- **Anexo 1:** Shapefile del área de inundación – condición existente.
- **Anexo 2:** Shapefile de variación de inundación – condición con relleno.
- **Anexo 3:** Video de Simulación con Relleno.
- **Anexo 4:** Video de Simulación sin Relleno.