



MEMORIA DE LOS TRABAJOS DE EFECTOS COSÍMICOS: TSUNAMIS

PROYECTO: ESTUDIO DE LA AMENAZA SÍSMICA Y LA VULNERABILIDAD FÍSICA DEL GRAN SANTO DOMINGO

Santiago de Compostela, 19 de mayo de 2016

Jefe del Proyecto designado por el IGME: Dr. Miguel Llorente Isidro



Equipo técnico:

Dr. Miguel Llorente Isidro (IGME)
D. Luis Laín Huerta (IGME)
Dr. José Alberto Díaz de Neira (IGME)
D. Eusebio Lopera Caballero (IGME)
Dr. José A. Fernández Merodo (IGME)
Dr. Juan C. García (IGME)
D. Félix Cañadas García-Baquero
D. Ana María Plata González
D. José F. Palomino Cabrero

Dr. Santiago Muñoz Tapia (Dir. SGN)
D. Julio Bautista (SGN)
D. Annette Suardi (SGN)
D. Sandra José Clases (SGN)
D. María Calzadilla (SGN)
Dr. Jorge Macías Sánchez (UMA)
Dr. Sergio Ortega Acosta (UMA)
Dr. Manuel Jesús Castro Díaz (UMA)
Dr. José Manuel González Vida (UMA)



ÍNDICE

Antecedentes	4
Experiencias previas	6
Marco legal e Instrumentos de la República Dominicana	7
Definición del problema	8
Objetivos del proyecto	9
Zona de estudio	9
Los suelos del Gran Santo Domingo	10
Cenozoico (Plioceno-Pleistoceno)	10
Holoceno	15
Estudio de susceptibilidad a tsunamis	19
Introducción	19
Marco tectónico	21
Materiales	22
El Modelo Numérico: Tsunami-HySEA	25
Tiempo de cálculo	34
Fuentes Tsunamigénicas	35
Resultados numéricos	38
Remonte del tsunami (<i>runup</i>)	61
Series temporales	62
Perímetro de seguridad	66
Otras simulaciones	68
Referencias	77
ANEXO I – Mapa de susceptibilidad a tsunamis	83

Antecedentes

La Española es una isla que se encuentra ubicada en el borde de la interacción entre las placas tectónicas de Norte América y del Caribe, provocando que toda ella, y particularmente las zonas situadas en las regiones afectadas por las fallas Septentrional y Enriquillo (Figura 1), se encuentre expuesta a un elevado peligro sísmico. En la República Dominicana, la historia registra movimientos sísmicos de importancia y con afectación a las poblaciones en los años 1562, 1615, 1673, 1691, 1775, 1842, 1843, 1887, 1946, 1953 y 2003; siendo el más significativo el ocurrido en 1946. Este sismo, cuya magnitud fue de 8.1 grados, generó un tsunami con oleajes de hasta 5 metros, el cual se propagó de este a oeste, afectando toda la costa norte y dejando alrededor de 500 muertos. Otros desastres relevantes como consecuencia de estos eventos fueron la destrucción de las ciudades de La Vega, Santiago, y en gran medida, Santo Domingo, Azua, entre otras más.

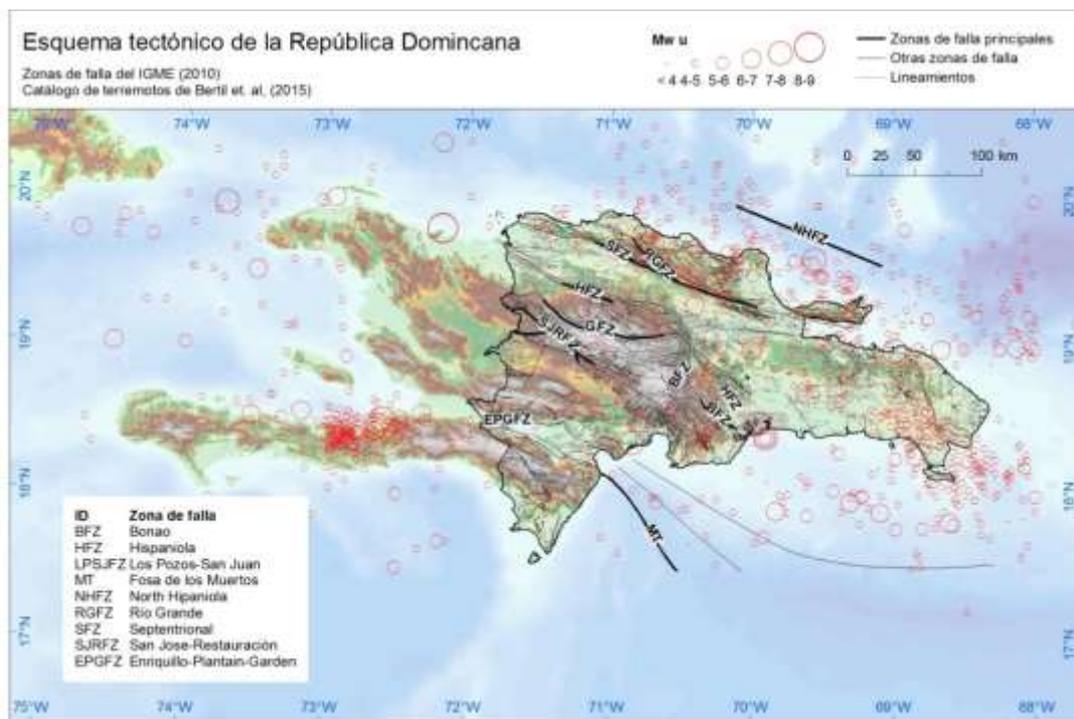


Figura 1. Principales zonas de falla en la República Dominicana.

A lo largo de los últimos años, las principales ciudades de la República Dominicana han experimentado un crecimiento urbano acelerado e incontrolable con tendencia a la construcción de edificaciones sin normas técnicas adecuadas. Esto se hace más evidente en los distritos más pobres, donde la edificación de vivienda nueva o ampliación de viviendas ya construidas es realizada por maestros constructores que, en la mayoría de los casos, no adoptan códigos de sismo-resistencia ni aplican las consideraciones



mínimas de seguridad para este tipo de estructuras. Hasta marzo de 2011, el sector de la construcción ha estado regulado por un código creado en el año 1979, cuyas recomendaciones no fueron elaboradas con todos los requerimientos mínimos que necesitan las edificaciones para resistirlos movimientos sísmicos.

Dada la necesidad de conocer en mayor profundidad la amenaza que representa la sismicidad en el territorio y de abordar la situación sobre la alta concentración de vulnerabilidades sociales y urbanas de las principales ciudades, es preciso promover iniciativas que incrementen el conocimiento y la evaluación del riesgo sísmico, así como también, medidas y/o mecanismos que garanticen el cumplimiento de las normas sismorresistentes y un adecuado proceso de planificación urbana y ordenamiento territorial. En tal sentido, y con arreglo al contexto de riesgo sísmico en la República Dominicana, se pueden mencionar cuatro importantes medidas a tomar en consideración:

1. La elaboración de estudios de microzonificación sísmica en las áreas geográficas donde residen las principales ciudades del país. Estos instrumentos asisten a autoridades locales, ingenieros y arquitectos, y expertos en el ordenamiento del territorio, en la identificación de las zonas expuestas a la amenaza sísmica, promoviendo la disposición de medidas para reducir la vulnerabilidad de los elementos sometidos a riesgo: personas, viviendas y edificaciones, estructuras críticas, y el medio natural.
2. La elaboración de estudios de vulnerabilidad física dentro de las áreas urbanas más expuestas a la amenaza sísmica. El propósito es contar con un inventario de elementos de riesgo a partir del cual se realicen estimaciones de daños y pérdidas en base a sismos tipo, para así poder planificar medidas de rediseño y reforzamiento de estructuras en base al código de sismo resistencia vigente.
3. El fortalecimiento de capacidades de los gobiernos locales y las instituciones nacionales involucradas en la generación del conocimiento geocientífico, la reducción de la vulnerabilidad física, la regulación del sector de la construcción, el ordenamiento del territorio, y la respuesta a emergencias y/o desastres.
4. La promoción de medidas de sensibilización dirigidas al sector público y privado, especialmente al sector de la construcción, y a la población en general, en pos de generar una cultura de prevención frente al riesgo sísmico. Sumado a esto, es importante incorporar acciones de formación en cuanto al diseño y construcción de estructuras en base al actual código de sismo resistencia.



Experiencias previas

Como consecuencia del terremoto de Haití en enero de 2010, la reducción del riesgo sísmico cobró una mayor relevancia en la agenda del gobierno dominicano. Una iniciativa importante en la generación de conocimiento geocientífico fue el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de los Caballeros en 2010. Este estudio fue llevado a cabo dentro de uno de los componentes del SYSMIN II (Cartografía Geotemática), y financiado por la Unión Europea en el marco del 9º Fondo Europeo de Desarrollo (FED), cuyo periodo de ejecución fue de 2005 a 2010.

Otros de los resultados importantes que se lograron a través del SYSMIN II fueron la constitución y organización del Servicio Geológico Nacional (SGN), creado de acuerdo a la Ley 50-2010; la instalación de una red geocientífica accesible desde Internet; y la elaboración del mapa geológico nacional, el cual tiene como cobertura todo el territorio de República Dominicana a escala 1/50.000.

Entre las acciones realizadas para conocer la vulnerabilidad física de las edificaciones del país, la Oficina Nacional de Evaluación Sísmica y Vulnerabilidad de Infraestructura y Edificaciones (ONESVIE) registra un total de 5,000 escuelas y 220 hospitales evaluados hasta el año 2009, ampliando para el periodo 2010-2012 sus evaluaciones a complejos municipales, provinciales y regionales, edificios gubernamentales y privados, e instituciones policiales y de respuesta de emergencia (Defensa Civil, Cuerpo de Bomberos, entre otros).

Recientemente, en el marco de las actividades del “Programa Hospitales Seguros Ante Desastres” se han logrado evaluar 33 hospitales priorizados de importancia a nivel nacional. Estas acciones han sido coordinadas por el Ministerio de Salud Pública y la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS). Sumado a estas iniciativas, existen avances en la realización de actividades de capacitación para ingenieros y arquitectos en acciones antisísmicas, especialmente orientadas a la formación de evaluadores de estructuras y edificaciones.

La obligatoriedad del nuevo código de sismo resistencia en el país, “Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras” vigente desde marzo de 2011, bajo el Decreto No. 201-11, representa un importante avance normativo y técnico que garantiza la seguridad humana a través del diseño y construcción de nuevas edificaciones según los criterios propios basados en las condiciones geológicas y sismogénicas del país. Emitido por la Dirección General de Reglamentos y Sistemas (DGRS), Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), este reglamento sustituye y actualiza las recomendaciones mencionadas en el instrumento “Recomendaciones Provisionales para el Análisis Sísmico de Estructuras” de 1979.



Otros considerables aportes que han promovido la reducción del riesgo sísmico en el país son las distintas iniciativas llevadas a cabo en el marco del VIII Plan de Acción DIPECHO Caribe 2011-2012, las cuales tuvieron como beneficiarios un número importante de municipios y comunidades ubicadas en las provincias de Barahona, San Pedro de Macorís, Santiago y Puerto Plata. Estas acciones tuvieron como propósito, principalmente, el fortalecimiento de capacidades locales a nivel institucional y comunitario para la adopción de medidas de preparación y respuesta frente a eventos sísmicos.

Marco legal e Instrumentos de la República Dominicana

Bajo el marco normativo de la Ley 147-02 sobre Gestión de Riesgos, promulgado en el año 2002, el país cuenta como una Política de Gestión de Riesgos cuyo instrumento principal es el Sistema Nacional de Prevención, Mitigación y Respuesta ante Desastres (SN-PMR). Sumado a esto, el Reglamento No 874-09 de aplicación de la Ley 147-02 establece la conformación de los comités provinciales y municipales de prevención, mitigación y respuesta, así como su funcionamiento y responsabilidades dentro del SN-PMR.

Otro de los instrumentos de la Política de Gestión de Riesgos definida en la Ley 147-02 es el Plan Nacional de Gestión de Riesgos cuya versión actualizada fue presentada en febrero de 2012. El proceso de actualización fue liderado por el Comité Técnico Nacional de Prevención y Mitigación de Riesgos (CTNPMR) y financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), contando con la participación de distintos actores institucionales y de la sociedad civil. Adicionalmente, el Plan Nacional de Contingencia para Terremotos representa una importante herramienta orientada a la prevención de daños ante la ocurrencia de un eventual fenómeno sísmico. Este Plan fue elaborado por el Centro de Operaciones de Emergencias (COE) en conjunto con el Comando Sur de los Estados Unidos en el año 2009.

Dada la situación de riesgo sísmico a la que se enfrenta la República Dominicana, por iniciativa del gobierno nacional y con la asistencia técnica del PNUD se formuló y presentó el Plan Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico (PNRSS) en febrero de 2012. Este Plan se incorpora dentro de los procesos institucionales ya iniciados en el marco de la aplicación de la Política de Gestión de Riesgos. Así mismo, se vincula con el Plan Nacional de Gestión de Riesgos y el Plan Nacional de Emergencias debido a su carácter complementario y articulador respecto a los procesos de reducción integral del riesgo en el territorio.



Definición del problema

El Gran Santo Domingo está conformado por los municipios de las provincias de Santo Domingo y San Cristóbal, incluido el Distrito Nacional, concentra más de la tercera parte de la población de República Dominicana, un total de 3.909.340 habitantes según el censo del año 2010, de los cuales 48.85% son hombres (1.910.057) y 51.15% mujeres (1.999.283). Este número importante de personas se encuentran en riesgo de ser afectadas por la ocurrencia de cualquier evento sísmico considerable, principalmente por el estado y calidad de las construcciones, las cuales en su gran mayoría no han sido construidas según el código de sismo resistencia vigente y fueron diseñadas sin contar con estudios geotécnicos que determinan las zonas aptas para el desarrollo urbano y ordenamiento del territorio.

El Distrito Nacional alberga la mayor parte de las edificaciones gubernamentales tales como la sede de la Presidencia de la República, las sedes ministeriales y oficinas de gobierno. Así mismo, dentro de su área geográfica se encuentran la mayoría de hospitales, universidades, escuelas, infraestructuras, líneas vitales, y centros de decisión de organismos de Defensa Civil y militar. Un considerable agravante es que gran parte de estas edificaciones fueron construidas entre los años 60 y 70, antes del instrumento “Recomendaciones Provisionales para el Análisis Sísmico de Estructuras” de 1979, y son pocas las estructuras que han pasado por un proceso de evaluación, rediseño y reforzamiento.

En base a la experiencia de Puerto Príncipe tras el terremoto de Haití en 2010, se ha puesto de manifiesto que el colapso físico de las estructuras de gobierno incide directamente en los procesos de gobernabilidad, respuesta y recuperación de desastres a nivel de país. Dado esto, es necesario considerar prioritario el conocimiento de las características, condiciones y capacidades estructurales de las edificaciones gubernamentales más fundamentales, así como de otras instalaciones estratégicas, y de los edificios que afecten potencialmente a muchos ciudadanos. Sumado a esto, las instituciones que orientan y regulan el tema de la construcción, cuentan con escasos mecanismos y capacidades para el control y supervisión de los proyectos.

Ante los posibles escenarios de pérdidas que afrontaría la ciudad de Santo Domingo, dada la situación de riesgo que posee, es prioritario fortalecer las capacidades de los ayuntamientos en cuanto a la regulación y gestión del planeamiento urbano, uso del suelo, y edificación de su territorio a través de la apropiación de instrumentos geotécnicos y normativos. Así mismo, es preciso fortalecer las estructuras locales de preparación y respuesta, las cuales están representadas por los comités municipales de prevención, mitigación y respuesta (CM-PMR), en coordinación con las instancias nacionales de respuesta.



Por otro lado, es imperante mejorar las capacidades y sinergias de las instituciones a nivel nacional a través de la creación de instrumentos y metodologías, formación de recursos humanos y técnicos, equipamiento y coordinación, orientadas a la generación de conocimiento geocientífico, evaluación y reducción de la vulnerabilidad de estructuras, regulación del sector de la construcción formal e informal, procesos de gestión de riesgos y respuesta, y la planificación urbana y ordenamiento del territorio.

Finalmente, en base al escaso conocimiento de la población dominicana sobre el riesgo sísmico y a una débil cultura de prevención a nivel institucional y social, es necesario promover acciones de formación y sensibilización en el sector público y privado, (particularmente en el sector de la construcción) y a la población en general.

Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto es responder a las necesidades del gobierno dominicano en materia de peligrosidad sísmica en el ámbito del área metropolitana del Gran Santo Domingo. Para lograrlo, se han realizado distintas actividades, tales como la campaña geotécnica o la cartografía geológica por mencionar sólo dos. Esta memoria aborda el apartado de los efectos cosísmicos, es decir, la susceptibilidad (o probabilidad relativa y cualitativa) a la fenomenología de licuefacción de suelos, movimientos del terreno y tsunamis.

Zona de estudio

El área de interés para el proyecto es de aproximadamente 261 km², de los cuales, 100 km² han sido priorizados y los 161 km² restantes han sido tratados como secundarios.

En particular, las superficies a estudiar cubren la siguiente extensión por municipios:

1. Distrito Nacional: 87 km²
2. San Cristóbal: 12 km²
3. Bajos de Haina: 10 km²
4. San Gregorio de Nigua: 2 km²
5. Santo Domingo Este: 68 km²
6. Santo Domingo Oeste 33 km²
7. Santo Domingo Norte 33 km²
8. Los Alcarrizos: 16 km²

Estas extensiones aproximadas están calculadas sobre la base cartográfica NAD27 UTM19N en ArcGIS 9.3, si bien se ha utilizado finalmente ArcGIS v10.2.2 y el sistema de referencia de coordenadas ha sido el WGS84, generalmente en su proyección UTM19N.



Los suelos del Gran Santo Domingo

En la zona de trabajo afloran materiales pliocenos y cuaternarios, que constituyen dos conjuntos netamente diferenciados ([Llorente et al. 2016a](#)), ([Llorente et al. 2016b](#)). Los materiales pliocenos y pleistocenos, configuran la morfoestructura de la zona; se trata de rocas sedimentarias de origen marino cuya disposición es el resultado de la acción combinada de la tendencia ascendente de la región y de las pulsaciones eustáticas. Los materiales cuaternarios, holocenos predominantemente, se disponen de manera discontinua sobre los anteriores y responden a un espectro genético variado, que incluye depósitos de origen kárstico, marino-litoral, fluvial y antrópico.

Cenozoico (Plioceno-Pleistoceno)

Los sedimentos pliocenos y pleistocenos son el constituyente fundamental de la “Llanura Costera del Caribe”. Se trata de una gran llanura con una extensión de 240 km y una anchura de 30 a 40 km, con cotas máximas de unos 100 m sobre el nivel del mar. Se asientan sobre un sustrato que no es visible en el Gran Santo Domingo, pero que se observa en afloramientos cercanos a los bordes de la llanura, evidenciando que consiste en un paleorrelieve modelado sobre rocas sedimentarias paleógenas y, especialmente, sobre rocas ígneo-metamórficas integrantes del basamento de las cordilleras Oriental y Central.

Este conjunto plio-pleistoceno presenta una disposición horizontal y su espesor en la zona de trabajo, no se puede precisar al no aflorar su base, aunque probablemente esté comprendido entre los 150 y los 200 m. Incluye cuatro formaciones con claras implicaciones genéticas, las formaciones San Cristóbal, Yanigua, Los Haitises y La Isabela.

Formación San Cristóbal

La formación San Cristóbal está constituida principalmente por arcilla verdosa. En la base de la formación se observan arcillas verdosas de baja plasticidad que pasan gradualmente hacia techo a gravas polimícticas redondeadas o subangulosas con centiles importantes (de 10 a 20 cm, Figura 2 y Figura 3). La edad de esta unidad es Mioceno Superior y se interpreta como una zona de abanicos aluviales distales que desembocan en una plataforma marina somera de ambiente restringido.



Figura 2. Vista del afloramiento AF400, en el cual se observa la Fm. San Cristobal.



Figura 3. Afloramiento 402, Fm. San Cristóbal.

Formación Yanigua

La formación Yanigua está formada por una sucesión monótona de margas de tonos ocres, con intercalaciones de niveles de caliza y calcarenitas. Su fácil alterabilidad las confiere una coloración amarillenta típica (Figura 4) y se ha descrito por ingenieros locales como una formación autocementante, posiblemente como consecuencia de un proceso de disolución-precipitación en una unidad de baja transmisividad hidráulica. Estos depósitos se interpretan en un contexto de plataforma interna protegida por la barrera arrecifal constituida por la formación Los Haitises.



Figura 4. Vista del afloramiento AF85, en el cual se observa el color amarillento típico de la Fm. Yanigua.

Formación Los Haitises

La formación Los Haitises está conformada por un conjunto calcáreo de origen arrecifal, con una fisionomía muy característica debido a la evolución eustática y al intenso desarrollo de la meteorización química en la región (Figura 5).

Aparece como un monótono conjunto de calizas grises a blanquecinas, con un alto contenido fosilífero visible a simple vista.



Figura 5. Vista del afloramiento AF520, en el cual se aprecia la Fm. Haitises.

Formación Isabela

La formación Isabela, semejante a la anterior, también está formada por calizas arrecifales que se han ido desarrollando en diferentes estadios (o plataformas) siguiendo la migración de la línea de costa. En la cartografía de este proyecto se han diferenciado de acuerdo a su posición respecto a los de los distintos escalonamientos topográficos existentes (plataformas superior, media e inferior). Aparece como una superposición y acumulación de esqueletos de colonias de coral, en posición de vida o volcadas, con costras de diverso grosos de algas rojas coralinas (Figura 6).



Figura 6. Vista del afloramiento AF249, en el cual se aprecia la Fm. Isabela.

Holoceno

Terrazas fluviales

En sentido estricto, no se trata de una Formación Geológica, pero se han querido destacar bajo este epígrafe a los diferentes niveles de terrazas aluviales medias y bajas de los cauces de los principales ríos de la zona de estudio (Ozama, Isabela, Nigua y Haina). Se trata de una unidad geológica-geomorfológica reciente, activa, con un predominio de conglomerados polimícticos de naturaleza diversa con una matriz de tipo arenosa suelta en su mayor parte, si bien en algunos casos puede haber bancos de arena y arcillas asociados a los procesos fluviales. Asociada a los cauces principales, esta unidad puede tener potencias importantes (superiores a 20 m) y debido tanto a la climatología con altas precipitaciones acumuladas anuales, como a la alta transmisividad hidráulica y su proximidad a masas de agua permanentes, en esta unidad se esperan niveles freáticos altos.

Llanura de inundación

Bajo la denominación de llanura de inundación y canales abandonados se ha cartografiado un conjunto de materiales muy recientes, activos, formados por cantos redondeados y subangulosos de tamaño centimétrico, flotando en una matriz limo-arenosa (Figura 7).



Figura 7. Vista del afloramiento AF395, en el cual se aprecian materiales de la llanura de inundación.

Fondo de valle

Muy similar a la unidad anterior, los aluviones de fondo de valle son materiales asociados a los principales arroyos, constituidos en general por depósitos irregulares, fundamentalmente fangosos y arenosos de colores pardos oscuros, con gravas sin estructura, con presencia de materia orgánica y abundantes residuos urbanos de toda clase (Figura 8).



Figura 8. Vista del afloramiento AF396, en el cual se aprecian materiales de los fondos de valle.

Coluviones

Se han agrupado a los depósitos coluviales o coluviones que ocupan el pie de las zonas de mayor relieve en el área de San Cristóbal y parecen corresponder a un retrabajamiento de materiales sueltos superficiales por escorrenría difusa (y por tanto presenta centiles variables).

Depósitos antrópicos

Aquí se han agrupado tanto los depósitos de tipo vertederos como escombreras, terraplenes y pedraplenes (Figura 9).



Figura 9. Vista del afloramiento AF552, en el cual se aprecia una explanada con rellenos.

Dolina

En las zonas calcáreas karstificadas existentes a lo largo de la zona de estudio aparecen zonas con distinto grado de alteración y que especialmente se concentran en el fondo de dolinas y en los dominios kársticos. Allí aparecen arcillas de descalcificación de color rojizo y ocre con distinto grado de continuidad (Figura 10).



Figura 10. Vista del afloramiento AF34, en el cual se aprecia una dolina rellena de arcillas de descalcificación con cantos de caliza de diverso tamaño.

Fondo endorreico

Son zonas palustres-lacustres donde se produce una sedimentación de lutitas en zonas de marcado endorreísmo topográfico.

Área pantanosa

Son zonas palustres-lacustres con una alta proporción de materia orgánica y lutitas vinculadas a zonas fluviales activas.

Estudio de susceptibilidad a tsunamis

Introducción

Un tsunami es un vocablo japonés que en la literatura científica y técnica se refiere a perturbaciones de carácter oscilatorio en una masa de agua, caracterizadas principalmente por su gran longitud de onda (Figura 11); es decir, se trata de una ola (o un tren de olas). Estas perturbaciones oscilatorias se propagan perdiendo energía por fricción desde el lugar donde se originan y penetran en la masa de agua hasta una profundidad equivalente a la mitad de la longitud de onda. Cuando el fondo no es lo suficientemente profundo, esta oscilación regular se deforma, lo que se manifiesta en una alteración en la geometría de la perturbación, irguiendo la cresta hasta su rotura y su consiguiente expansión tierra adentro en forma de inundación. En función de la geometría del oleaje, se definen distintas zonas que se pueden observar en cualquier día de playa (Figura 12). El peligro del tsunami viene dado por la inundación que provoca en tierra, que vendría a ser una “gran zona de swash” (Figura 13).

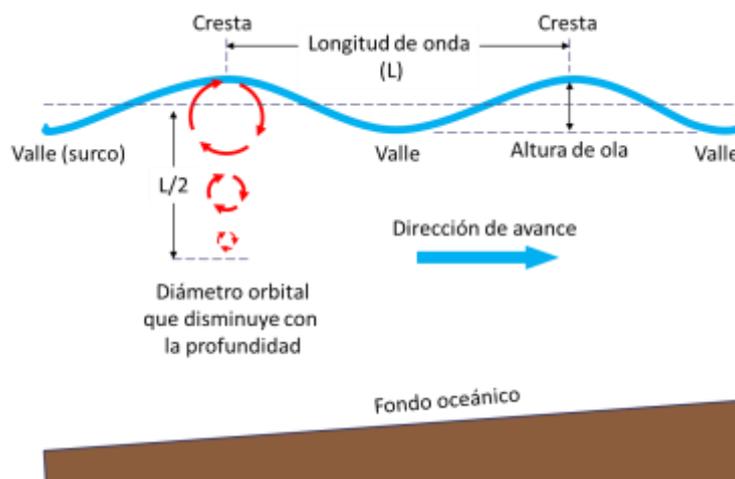


Figura 11. Parámetros de una ola (una onda) en mar abierto.

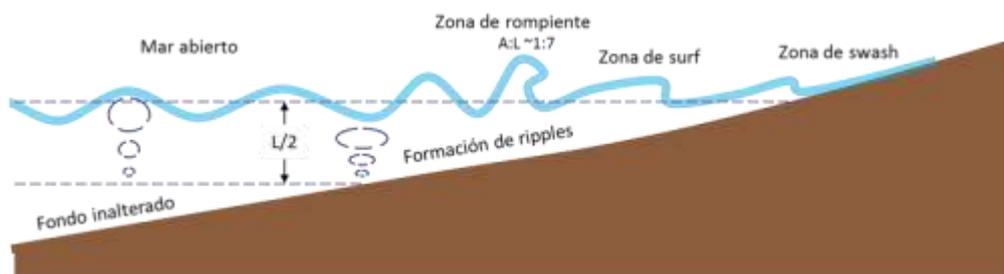


Figura 12. Parámetros de una ola en su llegada a la costa.



Figura 13. Tsunami de Japón del 11 de marzo de 2011.

A diferencia de una ola común (Tabla 1), generada principalmente por el viento y por el efecto gravitatorio de los astros, y por cambios de presión atmosférica, un tsunami puede originarse por causas muy diversas. Desde un movimiento del terreno (caída de rocas, deslizamientos costeros, deshielos repentinos, deslizamientos submarinos), el impacto de un cuerpo celeste en una masa de agua (un meteorito), procesos volcánicos (erupciones, explosiones), e incluso un terremoto. El caso que nos ocupa, es el del escenario sísmico y para que un terremoto de lugar a un tsunami, es requisito que éste se produzca en las rocas bajo el fondo del mar y que genere una deformación epicentral significativa en el fondo del mar, lo que implica un salto vertical a lo largo de un segmento de varios kilómetros (pero no necesariamente una línea de ruptura superficial, o grieta). Un terremoto puede desencadenar un tsunami de manera indirecta sin deformación epicentral si, como consecuencia de éste, tiene lugar un movimiento del terreno submarino o costero. Como se puede esperar, resulta muy complejo determinar la causa última de muchos eventos de tsunami, y además, se dispone de muy poca información oceánica para poder evaluar fuentes sísmicas o de otra naturaleza. A ello hay que añadir, que no se han desarrollado suficientes esfuerzos en la búsqueda de depósitos de tsunami (tsunamitas) que permita incrementar los catálogos de tsunami existentes.

Según el catálogo mundial de la NOAA sobre tsunamis (NGDC/WDS Tsunami Event Database), han ocurrido más de un centenar de eventos de tsunami en el ámbito del Caribe, o afectando a sus islas y costas. De estos cien eventos, quince han afectado a la



isla de La Española, cinco de los cuales han afectado a la República Dominicana. Por este motivo existe un temor fundado a la ocurrencia de un tsunami en las costas del país, lo que se pone de manifiesto en las distintas inversiones públicas en su estudio, como el presente, cuyo objetivo y alcance está limitado a determinar la susceptibilidad de tsunami.

El concepto de susceptibilidad a tsunami no está bien determinado, pero por similitud con otros ámbitos de los riesgos naturales, el término “susceptibilidad” pretende reforzar la idea de la incertidumbre existente en la determinación de los parámetros causales, o su probabilidad, o ambos, o su desarrollo espacial o temporal inespecífico. En este caso se han considerado un conjunto de escenarios posibles, pero de probabilidad indeterminada y desconocida, y usando el conocimiento actual sobre la geología de la región y de las principales mega-estructuras sismo-tsunami-génicas, se ha seleccionado la que “parece razonable considerar” según el criterio del equipo de trabajo, con la referencia de una ola en el orden de los 5 a 7 m en su llegada a costa, lo que conformaría un escenario posiblemente de máximo esperable. Además, la localización de la fuente se ha adoptado siguiendo criterios desfavorables desde el punto de vista de orientación de la perturbación respecto a la costa siguiendo un segmento activo de la fosa de los muertos según el criterio del socio Francés del proyecto (el *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, BRGM). Una vez definidos los parámetros del “sismo tsunamigénico de referencia”, se han simulado sus efectos mediante un modelo hidrodinámico.

Tabla 1. Características típicas de olas y tsunamis

Característica	Tsunami	Ola común
Longitud de onda	> 50 Km	90 m O. Atlántico 300 m O. Pacífico
Velocidad máxima	900 km/h y más	< 100 km/h
Período	De 10 a 90 min.	< 15 s
Altura o amplitud	Pocos centímetros	< 13 m
Influencia en el fondo	Perturba totalmente el fondo	Ninguna, sólo en la playa

Marco tectónico

La isla de La Española se sitúa en el límite entre las placas Caribeña y Norteamericana, que es una zona de compleja deformación ([Mann et al., 1984](#)). La convergencia entre ambas placas es oblicua y presenta un desplazamiento relativo entre ellas de 20 mm/año ([DeMets et al., 2000](#)). La presencia de zonas de subducción en el mar, tanto al Norte como al Sureste de la isla, y la presencia de dos zonas de fallas subparalelas al límite de placa (zona de falla Septentrional y de Enriquillo) amortiguan el desplazamiento relativo anteriormente comentado, lo que contrasta con la transversal de Puerto Rico, cuyo sistema está escasamente particionado ([Bertil et al. 2010](#)).

Todo ello hace que, a nivel regional, la deformación pasa de un régimen de desgarre senestro de dirección N75°E al oeste a una estructura transpresiva de dirección N95°E hacia el Este. Esto unido a la presencia de fallas inversas dentro de la isla (Figura 14) indican la presencia de movimientos compresivos causados por la geometría del borde de placas ([Bertil et al. 2010](#)).

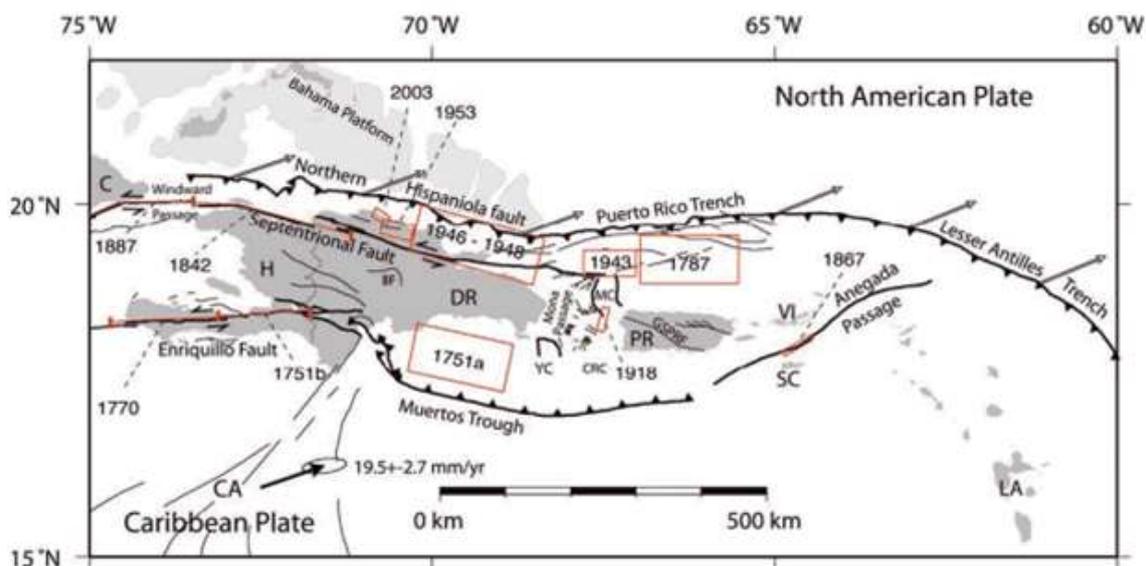


Figura 14. Principales fallas corticales y zonas de subducción representadas en líneas negras ([Manaker et al. 2008](#)). Los terremotos principales se indican en rojo.

A pesar de que no se han identificado estructuras superficiales de origen tectónico en la zona de estudio ni en las hojas geológicas próximas ([Díaz de Neira y Hernaiz Huerta, 2004](#)), la actividad tectónica durante el Cuaternario es evidente. El ascenso de la plataforma carbonatada pliocena no se puede justificar únicamente por las variaciones del nivel del mar, y por tanto, debe asociarse a un proceso tectónico que se refleja en el ascenso de La Española y el consiguiente incremento de su superficie. Este ascenso se ha producido con tasas de elevación diferentes en los distintos dominios de la isla. En este sentido, pese a la escasez existente de dataciones en materiales cuaternarios, los datos aportados por los aterrazamientos marinos asociados a las formaciones La Isabela y Los Haitises, permiten establecer al menos pautas generales y tasas de elevación orientativas en el orden de 0,100 a 0,165 mm/año.

Materiales

Además de los parámetros tsunamigénicos, los modelos numéricos del relieve emergido y sumergido son fundamentales como elementos para definir las condiciones de

contorno de las simulaciones numéricas. En este sentido se han utilizado los siguientes elementos para la realización de los trabajos (Figura 15 a Figura 18):

- Modelo Digital de Elevaciones del terreno procedente de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) a 90 m de pixel, en adelante, MDE SRTM 90m.
- Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio emergida obtenido por Lidar aerotransportado a 1m de resolución, en adelante, MDE GSD 1m. Ocupando una extensión de unos 530 km².
- Modelo Digital Batimétrico del *Global Multiresolution Topography* (GMRT) v.3.0 a 117 m de pixel (sobremuestreado y completado con GEBCO_08 (General Bathymetric Chart of the Oceans; [Ryan et al. 2009](#)), en adelante MDB GMRT 100m. Ocupando una extensión de unos 80.669 km².
- Modelo Digital Batimétrico de la campaña del Hespérides a 100m de pixel, en adelante MDB H 100m. Ocupando una extensión de unos 56.149 km².
- Modelo Digital Batimétrico del Proyecto a resolución 1m, en adelante, MDB GSD 1m. Ocupando una extensión de unos 184 km².

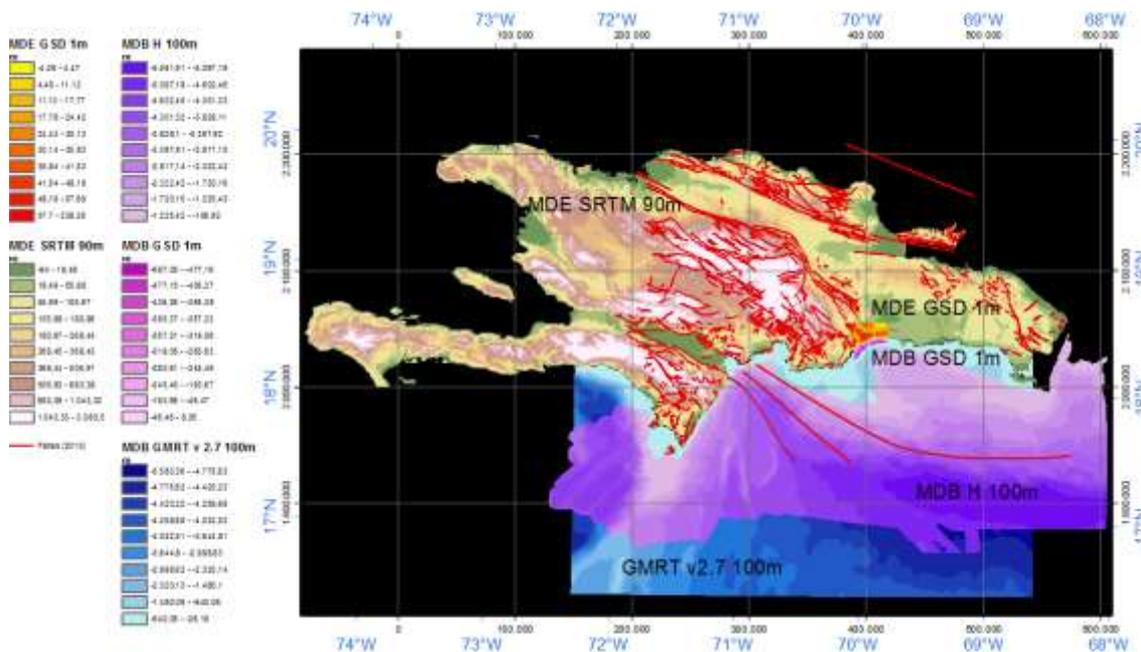


Figura 15. Mapa hipsométrico general de la Isla La Española, hipsométrico detallado de la zona del Gran Santo Domingo, información batimétrica preliminar disponible y principales fallas cartografiadas por el IGME en proyectos previos a 2010. Coordenadas WGS84 UTM19N.

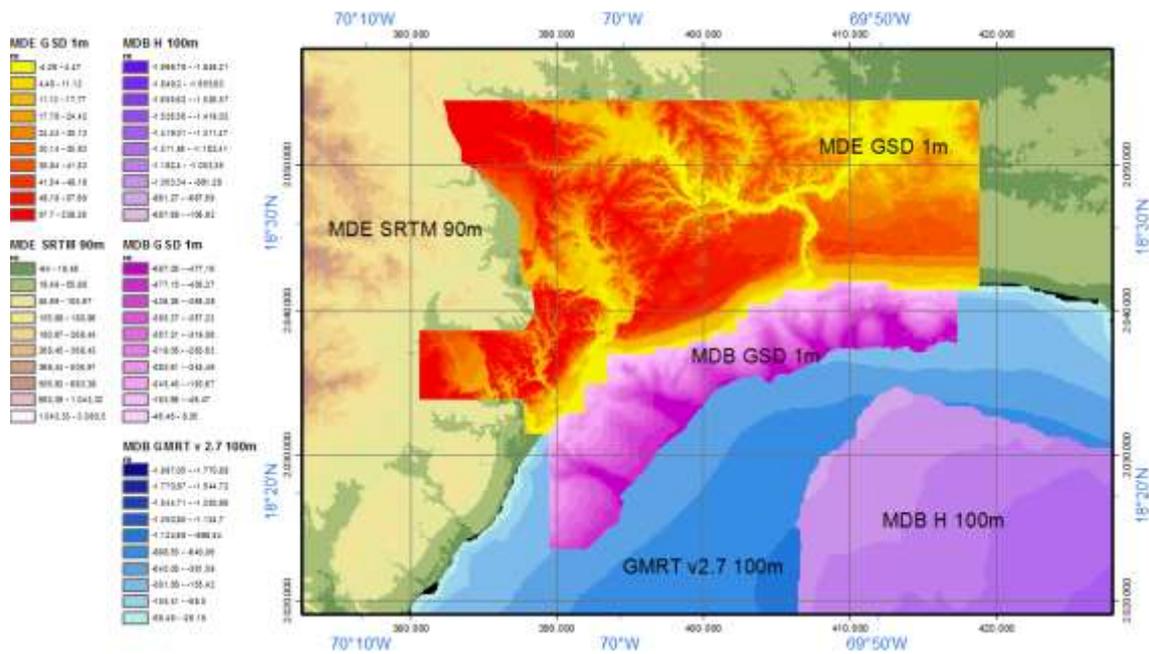


Figura 16. Detalle de los modelos numéricos disponibles. Coordenadas WGS84 UTM19N.

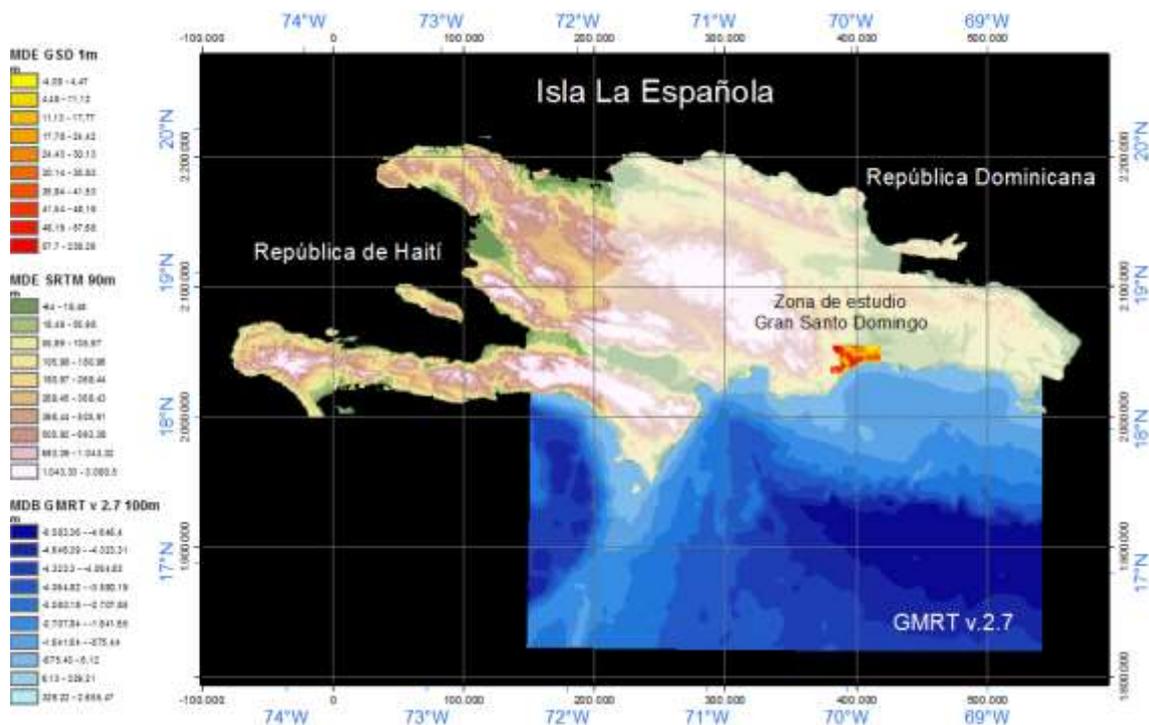


Figura 17. Mapa general de la batimetría GMRT v. 2.7 y su relación con la zona de estudio. Coordenadas WGS84 UTM19N.

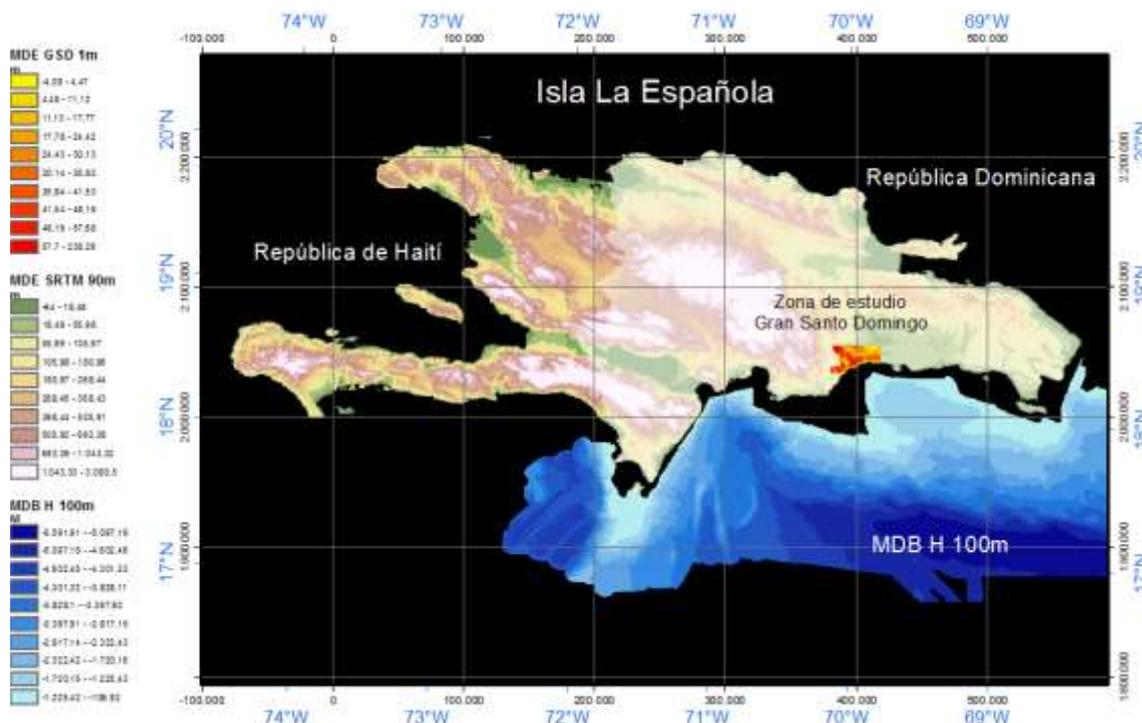


Figura 18. Mapa general de la batimetría obtenida por el Hespérides y su relación con la zona de estudio. Coordenadas WGS84 UTM19N.

El Modelo Numérico: Tsunami-HySEA

El software simulación numérica HySEA (de Hyperbolic Systems and Efficient Algorithms) está formado por una familia de códigos para la simulación de flujos que se basan en la ecuaciones de aguas someras ya sean de una sola capa, dos capas o para sistemas multicapa. Los códigos que componen HySEA han sido desarrollados e implementados por el grupo EDANYA (<https://edanya.uma.es>) de la Universidad de Málaga (UMA) a lo largo de más de una década y se encuentran en continua evolución y actualización. En un primer momento estos códigos fueron desarrollados e implementados sin un nombre o identificador común, siendo los correspondientes esquemas numéricos que en ellos se implementaban publicados de forma independiente en revistas científicas de primer nivel.

A partir de 2005, los miembros del grupo EDANYA han publicado diversos desarrollos relacionados con este tipo de modelos en revistas internacionales con revisión a pares (peer-review). En estos trabajos se presentan diversos tests con validaciones mediante soluciones analíticas y tests experimentales. Ordenados por su fecha de aparición, algunos de estos desarrollos se pueden encontrar en la abundante bibliografía existente [Castro et al. \(2005, 2006, 2008, 2012\)](#), [Gallardo et al. \(2007\)](#), [Fernández et al. \(2008\)](#) y [de la Asunción et al. \(2013\)](#), entre otros. En Septiembre de 2013, en el congreso ITS



2013, que tuvo lugar en Göcek (Turquía), por primera vez, se les dio el nombre genérico de HySEA al conjunto de códigos para la simulación de flujos geofísicos desarrollados por el grupo EDANYA y, en particular, se presentaron los códigos *Landslide-HySEA* para una aplicación a un deslizamiento aéreo y *Tsunami-HySEA* en dos contribuciones separadas, [González-Vida et al. \(2013\)](#) y [Macías et al. \(2013b\)](#), respectivamente. El trabajo que recientemente se publicó en la revista *Marine Geology*, [Macías et al. \(2015\)](#), en este caso para un deslizamiento submarino, representa el primer artículo en una revista con revisión por pares donde un código de la familia *HySEA* se presenta bajo este nombre.

Tsunami-HySEA es el modelo numérico de la familia HySEA diseñado específicamente para la simulación de tsunamis. Este código combina robustez, fiabilidad y una buena precisión en un modelo que está implementado para ser integrado utilizando GPUs para poder así realizar simulaciones en tiempos muy por debajo del tiempo real (FTRT, del inglés Faster Than Real Time).

Este modelo ha sido ensayado de forma exhaustiva y en particular ha pasado todos los tests en [Synolakis et al. \(2008\)](#), pero también otros tests de laboratorio y otros problemas de referencia propuestos en la bibliografía (benchmarks). Algunos de estos ejemplos de validación pueden encontrarse en [Castro et al. \(2005, 2006, 2008, 2012\)](#), [Gallardo et al. \(2007\)](#), [Fernández et al. \(2008\)](#) y [de la Asunción et al. \(2013\)](#). Los tests en [Synolakis et al. \(2008\)](#) para *Tsunami-HySEA* se recogen en [Millán \(2014\)](#) y parte de ellos serán recogidos en un informe del NTHMP, [EDANYA Group \(2015\)](#), actualmente en su fase final de redacción. Entre estos ejemplos de referencia el test de la Bahía de Monai, que es uno de los casos test más emblemáticos para los códigos de simulación de tsunamis, se presentó en el EGU 2013 en [Macías et al. \(2013a\)](#). En la referencia [Macías et al. \(2015\)](#) se presenta una comparación entre los resultados numéricos de *Tsunami-HySEA* comparados con el modelo MOST (PMEL/NOAA) para el escenario LANTEX 2013 y su impacto en las costas de Puerto Rico.

Además de todos estos desarrollos, también se ha hecho un esfuerzo adicional en desarrollar un código específico dentro de la familia HySEA para la simulación de tsunamis en el contexto de Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis (con siglas en inglés de TEWS, para Tsunami Early Warning Systems). Este trabajo para desarrollar un código de tsunamis para la realización de simulaciones en tiempos muchos más cortos que el tiempo real se presentó en el EGU 2014 en [Macías et al. \(2014\)](#) y en “Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics” en la referencia [Castro et al. \(2014b\)](#). La versión de *Tsunami-HySEA* para Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis (TEWS del inglés Tsunami Early Warning Systems) es en la actualidad el núcleo del modelo numérico que se utiliza en el Sistema Nacional de Alerta Temprana de Tsunamis de Italia gestionado por el INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e



Vulcanología). Tsunami-HySEA también ha sido recientemente adoptado por el JRC (Joint Research Centre) de la Comisión Europea como uno de los códigos de cálculos de su Sistema de Alerta de Tsunamis (TAT, de Tsunami Alert Tool). Por su parte, el IGN (Instituto Geográfico Nacional) en el SAT2 (Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis) español, que acaba de ponerse en marcha, propone la utilización de Tsunami-HySEA como modelo numérico de referencia para el momento en que este nuevo sistema esté preparado para realizar simulaciones en tiempo real.

Para obtener la aprobación por parte del INGV para que el código *Tsunami-HySEA* fuera adoptado por el sistema italiano de alerta temprana de tsunamis se pasó por un proceso de validación exhaustivo que se prolongó durante todo un año en el INGV. Se implementaron 16 esquemas numéricos diferentes, tanto TVD (*total variation diminishing*) con no TVD y se testearon buscando robustez, velocidad de cálculo y resultados numéricos precisos. Todo ello para con el objetivo de llevar a cabo la elección final de código para el sistema nacional de alerta temprana de Italia. En [Castro et al. \(2014a\)](#) se hace un estudio comparativo donde se recogen la mayoría de estos esquemas numéricos. La aplicación del modelo *Tsunami-HySEA* al caso emblemático de Tohoku 2011 puede verse en [González-Vida et al. \(2015\)](#). En Diciembre de 2014, se simularon los escenarios de Lisboa 1775 y Puerto Rico 1918 con *Tsunami-HySEA*, presentándose los resultados en el “Experts Meeting Workshop on Tsunami Modeling and Mitigation” que tuvo lugar en Cartagena de Indias (Colombia; [Macías, 2014](#)).

En lo que respecta a tsunamis generados por deslizamientos, la familia *HySEA* cuenta con un modelo estratificado de dos capas que acopla un modelo de Savage-Hutter para el medio granular y un modelo de shallow water para el fluido. Este modelo, *Landslide-HySEA*, se implementó fundamentándose en el trabajo desarrollado en [Fernández et al. \(2008\)](#). Este código ha sido validado comparando sus resultados numéricos con los experimentos de laboratorio de [Heller and Hager \(2011\)](#) y [Fritz et al. \(2001\)](#) (véase [Sánchez-Linares \(2011\)](#)). Un hito en el proceso de validación de este código lo supuso la simulación numérica del mega-tsunami de la Bahía de Lituya de 1958 con datos topobatemétricos reales, [González-Vida et al. \(2015a\)](#). Esta validación se llevó a cabo bajo un contrato de investigación suscrito con PMEL/NOAA. El resultado de este proyecto llevó al NCTR (*National Oceanic And Atmospheric Administration Center for Tsunami Research* de EEUU) a adoptar *Landslide-HySEA* como el código numérico utilizado para generar las condiciones iniciales para inicializar el modelo MOST en el caso de un escenario de un tsunami generado por un deslizamiento de sedimentos. Una investigación relacionada consistió en un trabajo conjunto con PMEL/NOAA sobre un hipotético deslizamiento submarino en el Cañón de Hudson. Este trabajo numérico se llevó a cabo en 2013, escribiéndose un memorandum recogiendo un trabajo redactado por [de la Asunción et al. \(2013\)](#). Por último, recientemente se ha concluido un trabajo conjunto con miembros del Departamento de Estratigrafía, Paleontología i Geociències

Marines (GRC Geociències Marines, Universitat de Barcelona) donde se modeliza el potencial tsunamigénico de cuatro deslizamientos submarinos localizados en el Canal de Ibiza en el Mediterráneo Occidental, en revisión en [Iglesias et al. \(2015\)](#).

Ecuaciones del modelo

El modelo *Tsunami-HySEA* resuelve el sistema de ecuaciones no lineales de aguas someras (Shallow Water Equations en la terminología anglosajona) en dos dimensiones de espacio, tanto en coordenadas Cartesianas como esféricas. Por brevedad aquí solamente presentamos el sistema de ecuaciones en derivadas parciales para el modelo en coordenadas Cartesianas, que se escribe como sigue:

$$h_t + (q_x)_x + (q_y)_y = 0$$

$$(q_x)_t + (q_x^2/h + g h^2/2)_x + (q_x q_y/h)_y = ghH_x + S_x$$

$$(q_y)_t + (q_x q_y/h)_x + (q_y^2/h + g h^2/2)_y = ghH_y + S_y$$

En las ecuaciones anteriores, $h(\mathbf{x}, t)$, denota el espesor de la capa de agua en el punto $\mathbf{x} \in D \subset \mathbb{R}^2$ en el tiempo t , representando D la proyección horizontal del dominio tridimensional donde el tsunami tiene lugar. La variable $H(\mathbf{x})$ representa la profundidad del fondo en el punto \mathbf{x} medida a partir de un nivel de referencia que debemos fijar. La función $\eta(\mathbf{x}, t) = h(\mathbf{x}, t) - H(\mathbf{x})$ define la posición de la superficie libre del mar. Denotamos por $q(\mathbf{x}, t) = (q_x(\mathbf{x}, t), q_y(\mathbf{x}, t))$ el flujo de masa de agua en el punto \mathbf{x} en el tiempo t . Este flujo de masa se relaciona con la velocidad promedio del fluido integrada en la capa de agua, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, mediante la expresión $q(\mathbf{x}, t) = h(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$. La notación $(\)_t$, $(\)_x$ y $(\)_y$ hace referencia a las derivadas parciales en tiempo y en espacio en las direcciones x e y respectivamente.

Los términos S_x y S_y parametrizan los efectos de fricción y vienen dados por una ley de Manning:

$$S_x = -gh M_n^2 u_x \|u\| / h^{4/3}$$

$$S_y = -gh M_n^2 u_y \|u\| / h^{4/3}$$

donde $M_n > 0$ representa el coeficiente de Manning, que para este estudio se ha fijado en el valor estándar de 0,03.

Tsunami-HySEA implementa en un mismo código las tres fases que componen la simulación de un tsunami generado por un terremoto submarino: 1) generación a partir de la fuente sísmica, 2) propagación y 3) inundación de las zona costera. En la fase de generación, se hace uso del modelo de deformación por fallas de Okada, [González-Vida et al. \(2015a\)](#), para predecir la deformación inicial del fondo marino que se va a



transmitir de forma instantánea a la superficie del mar para generar la onda inicial del tsunami. Este método del Okada asume que el terremoto se genera por la ruptura de un único plano de falla. Esta falla se describe por una serie de parámetros físicos que son: 1) Buzamiento (dip), 2) Ángulo de deslizamiento (strike), 3) Azimut (rake), 4) Anchura de la falla, 5) Longitud de la falla, y 6) Profundidad del epicentro. *Tsunami-HySEA* puede además combinar varios planos de falla, cada uno definido por su conjunto de parámetros, para modelizar una deformación del fondo más compleja. Además, cada falla puede iniciar su movimiento en distintos instantes de tiempo, pudiendo tratarse de una ruptura sincrónica o asíncrona, con rupturas que ocurren de manera sucesiva. A continuación se simulan las etapas de propagación e inundación mediante la utilización de un modelo basado en las ecuaciones de shallow water 2D no lineales escritas en longitud/latitud para el caso de aplicaciones a tsunamis reales.

El paso de tiempo no está fijado, viene dado por una condición de tipo CFL (en referencia a *Courant, Friedrich y Levy*, que la describieron en 1928) que hará que el paso de tiempo se ajuste a la velocidad de propagación de las ondas. De forma general el número CFL que se toma es igual a 0,9.

Método de resolución

El código *Tsunami-HySEA* resuelve el sistema de ecuaciones de aguas someras no lineales bidimensionales por medio de esquemas en volúmenes finitos caminos conservativos de alto orden (segundo y tercer orden). Los valores para h , q_x y q_y en cada una de las celdas representan el promedio de cada una de estas variables (espesor de agua y las componentes del flujo) en la celda. El esquema numérico es conservativo tanto para la masa como para el momento para fondo plano y, en general, la masa se preserva para batimetrías arbitrarias. El alto orden se consigue mediante un operador de reconstrucción TVD (de Total Vanishing Diminishing) no lineal en las variables h , q_x , q_y y $\eta=h-H$. Posteriormente, la reconstrucción de H se obtiene a partir de las reconstrucciones de h y η . Además, en el proceso de reconstrucción, se asegura la positividad del espesor de la capa de agua. *Tsunami-HySEA* implementa varios operadores de reconstrucción: MUSCL (véase [van Leer, 1979](#)) que proporciona un segundo orden de precisión, la reconstrucción hiperbólica de Marquina (véase [Marquina, 1994](#)), que proporciona tercer orden y una combinación TVD de reconstrucciones 2D parabólicas y lineales a trozos que también proporcionan tercer orden, [Gallardo et al. \(2011\)](#). El alto orden en tiempo se obtiene usando el método de Runge-Kutta TVD de segundo y de tercer orden descrito en [Gottlieb and Shu \(1998\)](#). En cada interfase entre celdas, *Tsunami-HySEA* utiliza el método de Godunov basado en la aproximación de un problema de Riemann 1D proyectando sobre la dirección normal a cada lado. En particular, *Tsunami-HySEA* implementa un método de tipo PVM que hace uso de las velocidades de onda mayor y menor, de forma similar al método



HLL, [Castro y Fernández-Nieto \(2012\)](#). Una visión general de la derivación de los métodos de alto orden se ha llevado a cabo en [Castro et al. \(2009\)](#). Para dominios computacionales grandes, como simulaciones en todo el Océano Pacífico y en el marco de Sistemas de Alerta Temprana de Tsunamis (TEWS, del inglés Tsunami Early Warning Systems), *Tsunami-HySEA* también implementa un esquema a dos pasos similar al esquema leap-frog para la propagación de la onda en aguas profundas y un esquema TVD-WAF de segundo orden con limitadores de flujos, que se describe en [de la Asunción et al. \(2013\)](#), para la etapa de propagación cerca de costa y para la inundación, todo en un único código. La combinación de ambos esquemas garantiza la conservación de la masa en el dominio completo y previene la formación de oscilaciones de alta frecuencia espúreas que se generan por los esquemas de tipo leap-frog cerca de discontinuidades. Al mismo tiempo, este esquema numérico reduce los tiempos de cálculo comparado con otros esquemas numéricos, a la vez que la amplitud de la primera onda de tsunami se preserva.

En lo que respecta a la discretización de los frente seco/mojados, *Tsunami-HySEA* implementa el tratamiento numérico que se describe en [Castro et al. \(2005\)](#) y [Gallardo et al. \(2007\)](#), que consiste en reemplazar localmente el resolvidor de Riemann unidimensional que se usa en la fase de propagación por otro resolvidor de Riemann que tiene en cuenta la presencia de una celda seca. Además, el paso de reconstrucción también se modifica para preservar la positividad del espesor de la capa de agua. Los esquemas numéricos resultantes son bien equilibrados para el agua en reposo, es decir, preservan de forma exacta las soluciones con agua en reposo, y son de segundo o tercer orden dependiendo del operador de reconstrucción y el método de evolución en tiempo.

Por último, la implementación numérica de *Tsunami-HySEA* se ha llevado a cabo en clústers de GPUs, [de la Asunción et al. \(2013\)](#); [Castro et al. \(2011\)](#); [Fritz et al. \(2001\)](#) y hay disponible una versión que calcula en mallas anidadas, [Macías et al. \(2013b\)](#) [Macías et al. \(2014\)](#); [Castro et al. \(2014 a, b\)](#); [Macías \(2014\)](#) y [Sánchez-Linares \(2011\)](#). Estos dos hechos permiten acelerar los cálculos de forma muy notable, permitiendo a este código realizar simulaciones realistas de gran complejidad en dominios extensos en tiempos de cálculo mucho muy reducidos, mucho menores que el tiempo real ([Macías et al. 2013b, 2014](#)), [Castro et al. \(2014 a, b\)](#). La implementación de las mallas anidadas se hace mediante un algoritmo bidireccional que permite utilizar un número cualquiera de niveles y de submallas en cada nivel. *Tsunami-HySEA* permite simular de forma precisa los procesos de runup y de rundown, así como mapas de inundación de gran detalle. Todos los algoritmos se han implementado para arquitecturas multi-GPU que hace uso de técnicas de descomposición de dominios y MPI con un algoritmo de particionamiento que equilibra el esfuerzo computacional entre las diferentes GPUs. La combinación de todas estas diferentes técnicas permite obtener tiempos de simulación muy reducidos para problemas de gran tamaño.



Condiciones de contorno

Debido a que *Tsunami-HySEA* siempre calcula inundación y que siempre utiliza su algoritmo de tratamiento de zonas seco/mojadas en las costas, esto hace que sólo deban fijar condiciones de contorno en las fronteras correspondientes a mar abierto. En estas fronteras se suele imponer la condición de flujo libre, que consiste esencialmente en no imponer nada y minimizar el efecto de la frontera en los resultados numéricos.

Hardware de cálculo

Todas las simulaciones numéricas llevadas a cabo para la realización del presente estudio se han hecho en el clúster del que dispone la Unidad de Métodos Numéricos (UMN) del Servicio Central de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Málaga (UMA). Este clúster (denominado atlántico, <http://atlantico.uma.es>) está formado por 8 nodos de cálculo con procesadores duales Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620v2 a 2.10 GHz y 2 GPUs Titan Black con 2880 núcleos de procesamiento a 889 MHz cada uno. Lo cual hace un total de 16 tarjetas gráficas Titan Black. La conectividad dentro del clúster se lleva a cabo mediante Infiniband FDR.

Datos topo-batimétricos utilizados

Los datos topobatimétricos utilizados para la generación de la geometría numérica del problema han resultado de la integración de los modelos numéricos del relieve emergidos y sumergidos descritos anteriormente, priorizando el mosaico por el método de máxima resolución.

Mallas de cálculo

Se han utilizado mallas anidadas para obtener una representación detallada de la inundación en el área metropolitana del gran Santo Domingo. La extensión de la malla global se muestra en la Figura 19, en la que se observa como cubre gran parte del Caribe. En la Figura 19 también se muestra la extensión y localización para los dos primeros niveles de refinamiento (con razones de refinamiento 8 y 4, respectivamente). El nivel 2 cubre la franja costera de interés, que será a su vez cubierta por las 10 submallas del nivel 3, que con una resolución de 2 m han permitido un estudio detallado de la inundación (Figura 20).

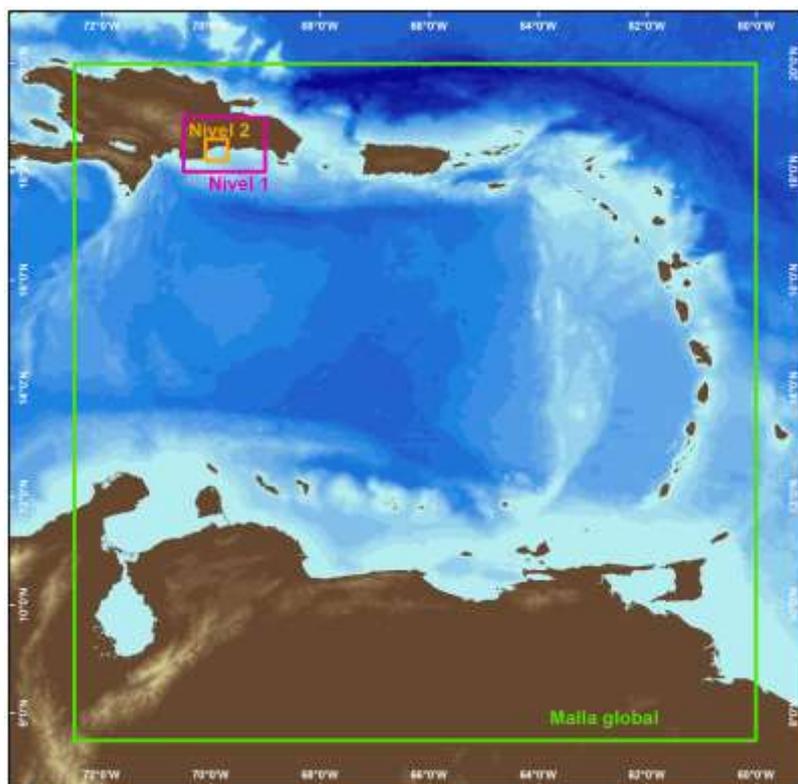


Figura 19. Dominio de cálculo o malla global y niveles 1 y 2 de mallas anidadas.

En la Figura 20 se recoge una ampliación sobre la costa meridional de la República Dominicana (que corresponde a la extensión de la malla del Nivel 1) donde se muestra la extensión de la malla de Nivel 2 y de las 10 submallas que componen el Nivel 3. Estas 10 submallas se utilizan para cubrir la franja costera del Gran Santo Domingo (que es la zona de costa donde evaluar el riesgo por inundación por tsunami). El nivel de refinamiento para el Nivel 3, a partir del Nivel 2, es de 8 veces más, lo que significa una resolución numérica en la franja costera de 2 metros, por tanto la inundación se está simulando con un gran nivel de detalle.

En la Tabla 2 se recogen los datos para cada una de las mallas consideradas. Puede observarse que el tamaño total del problema numérico a resolver está constituido por más de 57 millones de volúmenes (57.288.665).

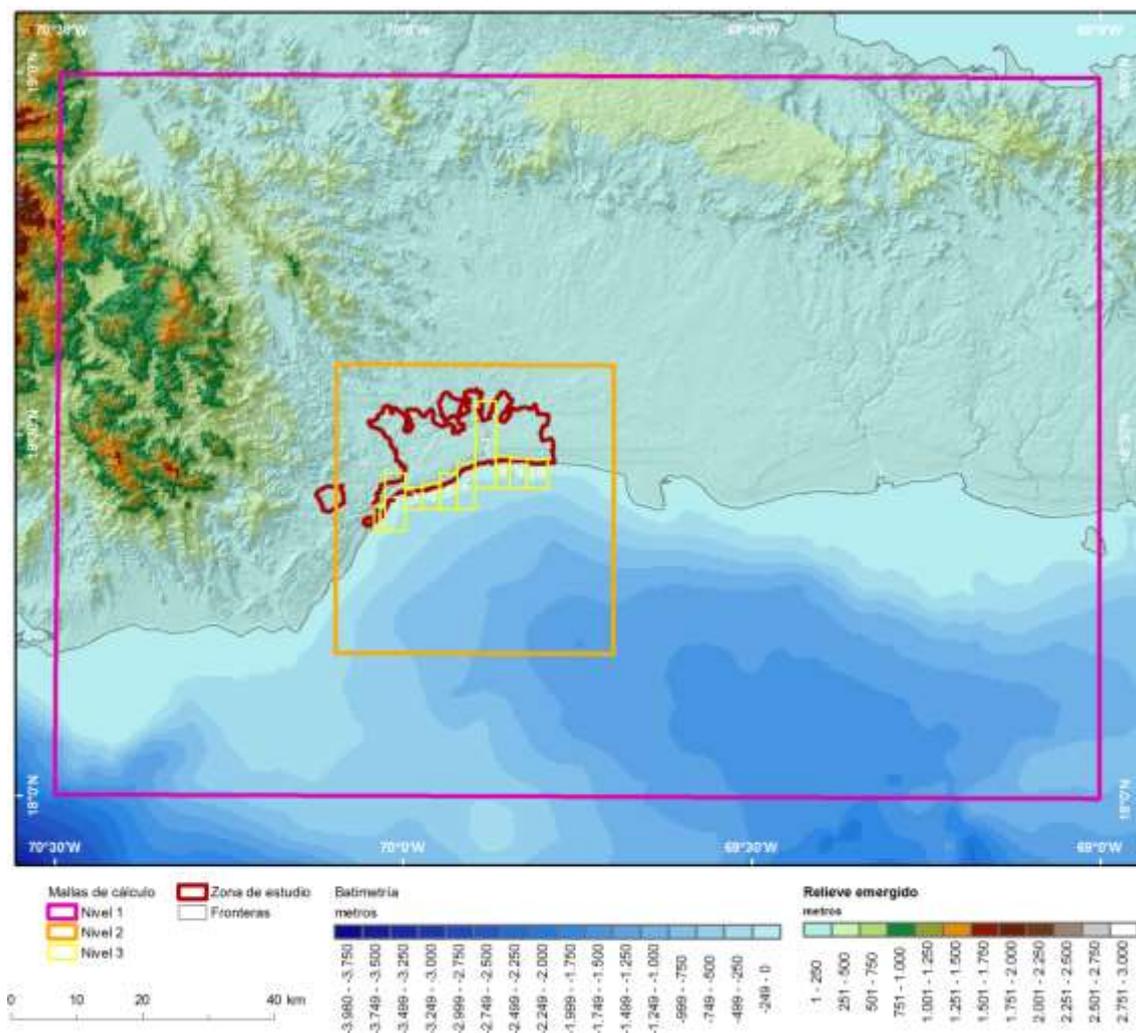


Figura 20. Mallas anidadas de niveles 1 a 3 dentro de la malla global (no se muestra). El Nivel 3 está compuesto por 10 submallas, utilizadas para la simulación de la inundación en la franja costera del Gran Santo Domingo con una resolución de 2 metros.

Tabla 2. Datos de las mallas consideradas (ref. indica el nivel de refinamiento).

Malla	Coordenadas	Elementos	Resolución	Ref.	
Global	[-72,5048; -60,0118] x [7,49517; 19,9882]	2.587 x 2.587 = 6.692.569	17,385 arc-seg (aprox. 515 metros)	-	
Nivel 1	[-70,5012; -69,0011] x [18,0014; 18,999]	2.488 x 1.656 = 4.120.128	2,17 arc-seg (aprox. 64 metros)	8	
Nivel 2	[-70,0995; -69,7001] x [18,2003; 18,6001]	2.652 x 2.656 = 7.043.712	0,54 arc-seg (aprox. 16 metros)	4	
Nivel 3	Submalla 1	[-70,0449; -70,0289] x [18,37; 18,4049]	840 x 1.848 = 1.552.320	0,0678 arc-seg (aprox. 2 metros).	8
	Submalla 2	[-70,0289; -70] x [18,37; 18,4499]	1.528 x 4.240 = 6.478.720		
	Submalla 3	[-70,0; -69,975] x [18,40; 18,4301]	1.320 x 1.592 = 2.101.440		
	Submalla 4	[-69,975; -69,95] x [18,4; 18,435]	1.320 x 1.856 = 2.449.920		
	Submalla 5	[-69,95; -69,925] x [18,4; 18,4499]	1.320 x 2.648 = 3.495.360		
	Submalla 6	[-69,925; -69,9] x [18,4; 18,465]	1.320 x 3.448 = 4.551.360		
	Submalla 7	[-69,9; -69,87] x [18,43; 18,55]	1.584 x 6.368 = 10.086.912		
	Submalla 8	[-69,87; -69,85] x [18,4301; 18,4749]	1.056 x 2.376 = 2.509.056		
	Submalla 9	[-69,8499; -69,825] x [18,4301; 18,471]	1.320 x 2.168 = 2.861.760		
	Submalla 10	[-69,8249; -69,795] x [18,4301; 18,4699]	1.584 x 2.112 = 3.345.408		

Tiempo de cálculo

El tiempo de cálculo necesario para realizar 1200 segundos (20 minutos) de simulación completa con inundación en todas las submallas de la costa para las simulaciones realizadas en una malla de tamaño reducido de algo más de 8 millones y medio de volúmenes y una resolución en costa de 5 metros y en solamente dos GPUs fue de 3.365,545 segundos, es decir, 56 minutos y 5 segundos. Posteriormente, las simulaciones definitivas han sido realizadas en una resolución mucho mayor, resolviendo el problema de propagación en un conjunto de mallas anidadas con un total de más de 57 millones de volúmenes, con 10 submallas con una resolución para la inundación en costa de 2 metros. En este caso, las simulaciones de este informe, con una duración de 2400 segundos (40 minutos) de tiempo simulado, para el problema completo y realizadas en 4 GPUs tardaron 17 horas y 43 minutos cada una de ellas. Esta cifra contrasta con la necesaria para simular tan sólo la propagación de la onda de tsunami, reduciendo el tiempo de cálculo a tan sólo unos pocos segundos utilizando varias GPUs. Por ejemplo, para la fuente de Venezuela (LANTEX 2016), el tiempo de cálculo para la simulación incluyendo sólo propagación (es decir, sin inundación en las



mallas anidadas) en el caso de una simulación de 2 horas en una malla de 2.397.241 volúmenes con resolución 1 arc-min tarda en una única GPU unos 100 s, en dos GPUs 54 s y en 4 GPUs solamente 30 s, es decir, tiempos de sistema de alerta temprana frente a tsunamis.

Fuentes Tsunamigénicas

El objetivo de este estudio es realizar una modelización numérica de tsunamis para evaluar su posible impacto en la franja costera de interés del proyecto, que va desde San Gregorio de Nigua hasta Santo Domingo Este, mediante la realización de una única simulación a partir de una fuente tsunamigénica estrictamente teórica. A pesar de que el objetivo concreto se restringe a un único escenario, se han realizado un gran número de simulaciones numéricas con diversas fuentes tsunamigénicas en el Caribe con impacto en la costa meridional de la República Dominicana, al objeto de seleccionar un escenario que, desde la perspectiva de fuente-impacto resultara de impacto medio a extremo. Se han considerado tanto fuentes sismo-tsunamigénicas locales cercanas a la costa situadas en la fosa de los muertos con diversas geometrías, formadas por uno o dos segmentos de falla, variando parámetros que caracterizan la fallan. En particular se destaca el ángulo de buzamiento (dip) y el desplazamiento (slip), pero también la longitud y anchura de los planos de rotura teóricos.

También se han realizado las simulaciones para los dos escenarios correspondientes al ejercicio LANTEX 2016 (escenario de Venezuela y el escenario del norte de La Española). Finalmente, en este estudio, para realizar un análisis de susceptibilidad detallado del impacto por tsunami en la franja costera de interés para el proyecto, se ha restringido el análisis a tres escenarios locales, cuya fuente de generación se encuentra situada en la Fosa de los Muertos y formadas por dos segmentos de falla. Para estos tres escenarios la localización, el número de segmentos de falla la mayoría de los parámetros que definen la deformación del fondo coinciden. Para cada uno de estos tres casos sólo se ha modificado el ángulo de buzamiento (11°, 30° y, finalmente, 50°) produciendo diferentes deformaciones iniciales del fondo y, en consecuencia, distintos impactos en la franja costera. La Figura 21 muestra la localización de los dos segmentos de falla en la Fosa de los Muertos. La Tabla 3 muestra las coordenadas y los valores de los parámetros de Okada para los dos segmentos de falla que dan lugar a la deformación inicial.

Tabla 3. Parámetros de Okada para cada uno de los dos segmentos que componen la falla situada sobre la Trinchera (o Fosa) de los Muertos. Como valores para el ángulo de buzamiento hemos considerado 11°, 30° y 50°.

	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Strike	Rake	Slip (m)	Long (km)	Ancho (km)
1	17°23'59,9''	69°47'35,69''	15	279,833°	90°	8	63,8	60
2	17°18'13,95''	69°02'42,84''	15	276,364°	90°	8	96,6	60

De los tres escenarios considerados, se ha tomado como escenario de referencia el segundo de ellos (buzamiento 30°) que corresponde al evento de impacto intermedio. Se trata de un escenario con una afectación importante en la franja costera, particularmente en las zonas de las desembocaduras de los ríos Haina y Ozama. El impacto en la costa este del Gran Santo Domingo será mucho menor debido a la morfometría de la Formación Isabela en tres terrazas de plataforma con elevación creciente en sus paleoacantilados y la Fm. Los Haitises en cota aún superior.

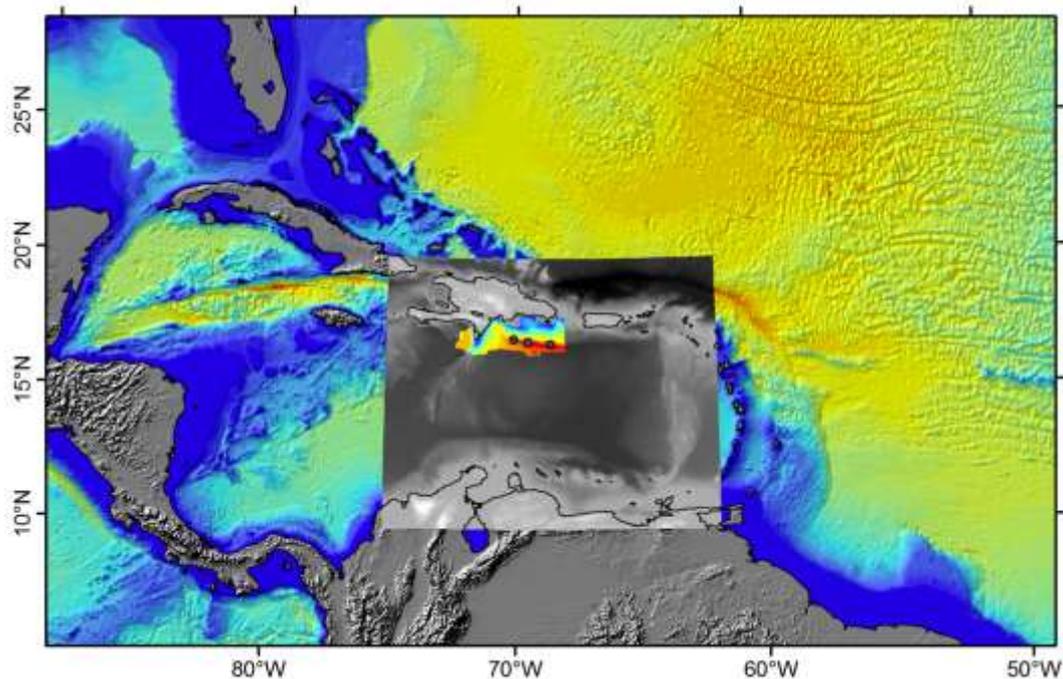


Figura 21. Localización de los dos segmentos de ruptura de la falla, sobre la Trinchera de los Muertos, considerados para los dos escenarios principales de este estudio.

El Escenario 1 utiliza una fuente con un ángulo de buzamiento de 50° y que corresponde al escenario de máximo impacto. En la Figura 22 se muestra la perturbación inicial que esta deformación produce en la superficie libre del mar, cuyos valores máximo y mínimo son de 6,66/-5,66 metros. En la Tabla 4 se recogen estos valores extremos en comparación con los otros dos escenarios. Para el Escenario 2 el ángulo de buzamiento

es de 30° , este escenario se corresponde a un evento con un impacto alto, con una deformación inicial con valores extremos de 3,73/-0,61 metros (y que es el escenario de referencia del proyecto). El Escenario 3 corresponde a un evento de impacto medio-alto con ángulo de buzamiento 11° y valores extremos para la deformación inicial entre 1,99 y -1,85 m. La Figura 22 muestra las correspondientes condiciones iniciales para la superficie libre de los tres escenarios considerados.

Tabla 4. Valores de elevación máxima y mínima (máxima depresión) para la perturbación inicial para cada uno de los tres escenarios principales considerados.

Escenario	Impacto	Buzamiento	Máx. elevación (m)	Máx depresión (m)
Escenario 1	Máximo	50°	6,66	-5,66
Escenario 2	Alto	30°	3,73	-0,61
Escenario 3	Medio	11°	1,99	-1,85

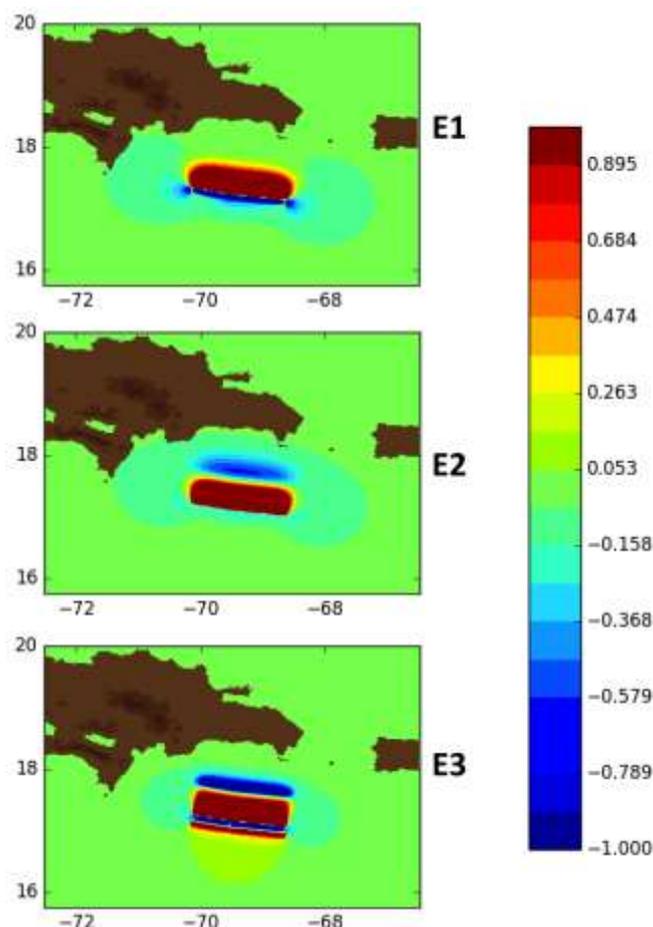


Figura 22. Perturbación inicial de la superficie de la mar producida por la deformación del fondo para los tres escenarios considerados en la Trinchera de los Muertos. Escenario 1 buzamiento= 50° ; E2, B= 30° ; E3 b= 11° . Unidades en metros.

Resultados numéricos

En este apartado se presentan los resultados numéricos frutos de este estudio de forma gráfica, con una breve descripción. Los ficheros de los resultados se han entregado como parte del Sistema de Información Geográfica del Proyecto.

Tiempos de llegada

La Figura 23 (y en su versión ampliada de la Figura 24) muestra los tiempos de llegada de la onda de mayor amplitud para el Escenario 2. Dado que los tiempos de llegada son muy parecidos para los tres escenarios sólo se presentan las gráficas del Escenario 2 con un impacto (aunque alto) intermedio entre los tres escenarios considerados.

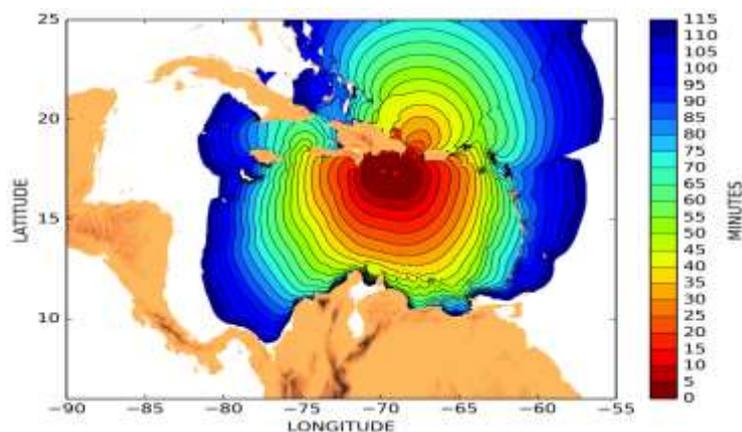


Figura 23. Tiempos de viaje para la onda de amplitud máxima (Escenario 2).

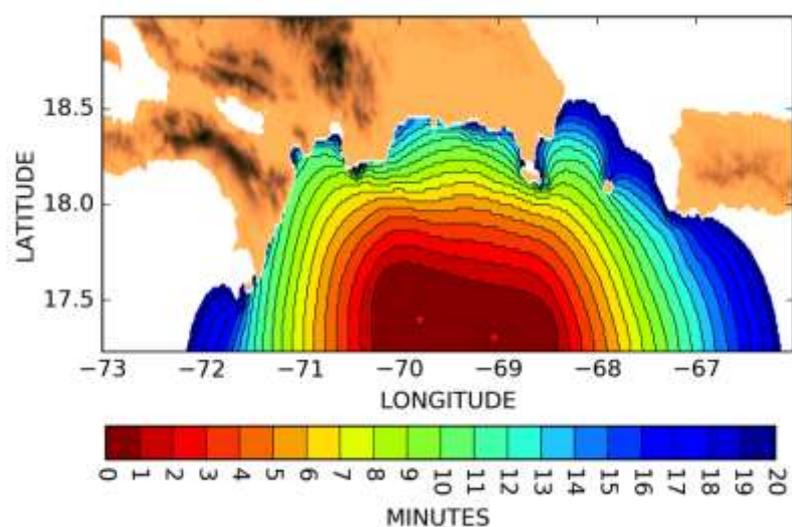


Figura 24. Detalle de tiempos de llegada a la costa de la onda de amplitud máxima para el Escenario 2.

Máxima amplitud de onda

Escenario 1. Amplitudes Máximas

La Figura 25 presenta las amplitudes máximas simuladas en todo el dominio de cálculo en el caso del Escenario 1. La Figura 26 muestra, en mayor detalle, estas amplitudes máximas en la zona costera del sur de la República Dominicana. Se observa que el impacto de olas está por encima de los 4 metros en la mayor parte de la franja costera. De la Figura 27 a la Figura 30 se muestran los resultados de los escenarios 2 y 3 modelizados.

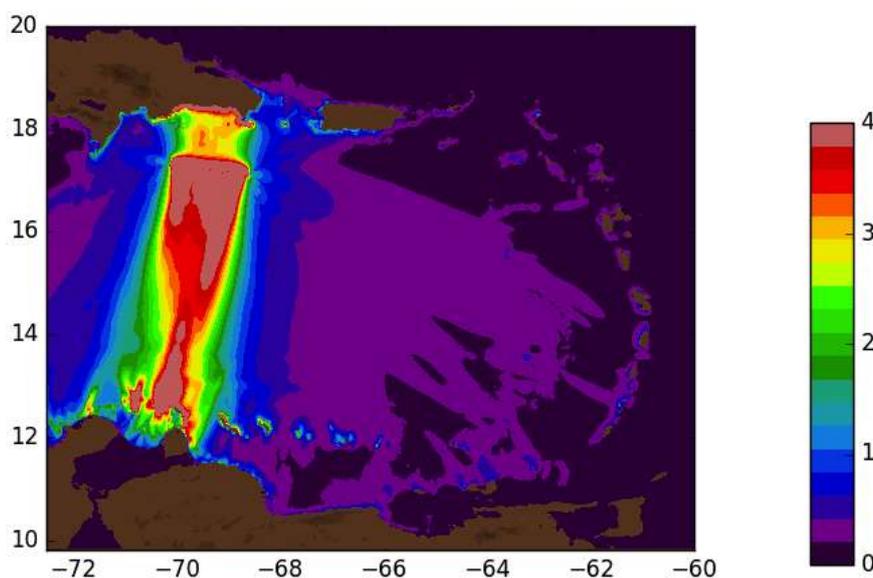


Figura 25. Amplitud máxima de la onda generada para la fuente del Escenario 1. Unidades en metros.

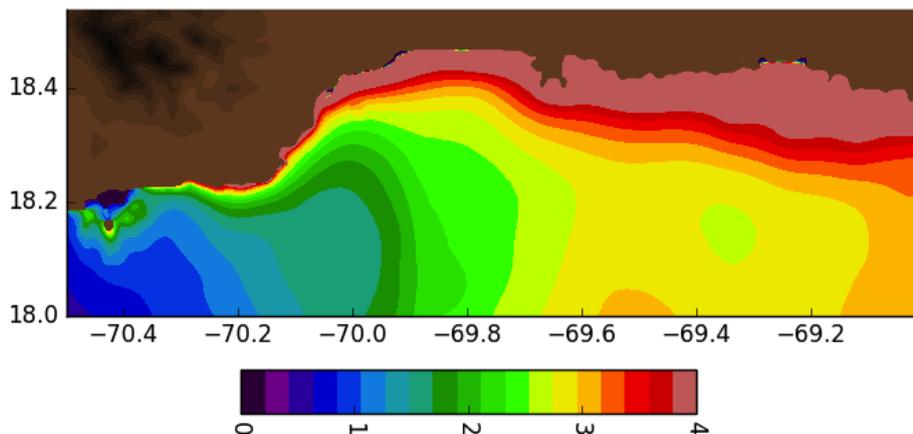


Figura 26. Detalle de la costa sur de República Dominicana mostrando la amplitud máxima de la onda para el Escenario 1. Unidades en metros.

Escenario 2. Amplitudes Máximas

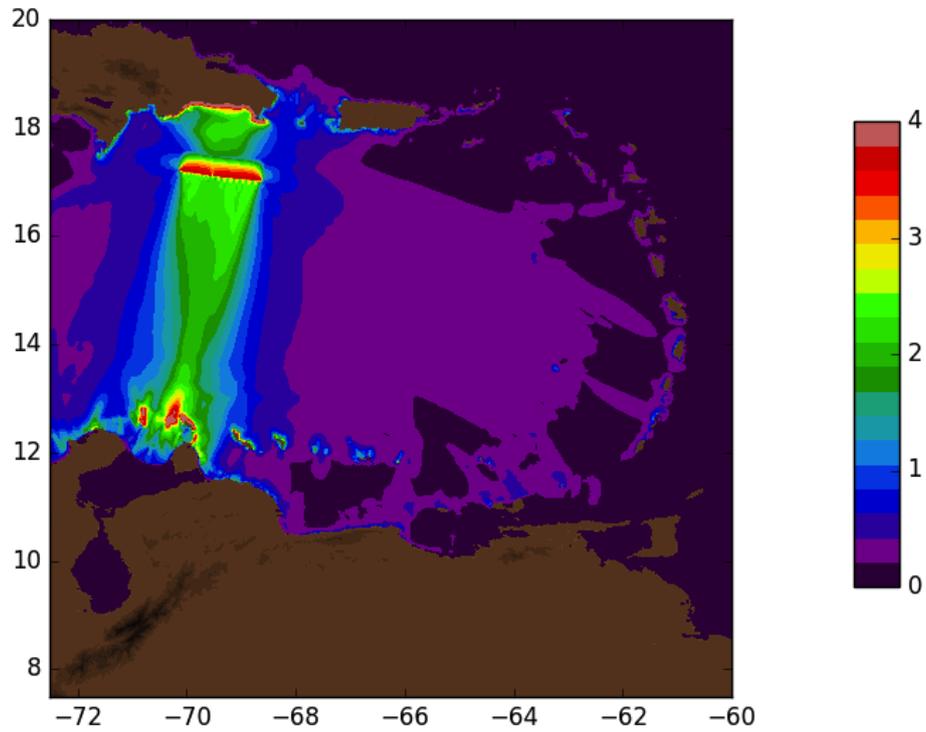


Figura 27. Amplitud máxima de la onda generada para la fuente del Escenario 2. Unidades en metros.

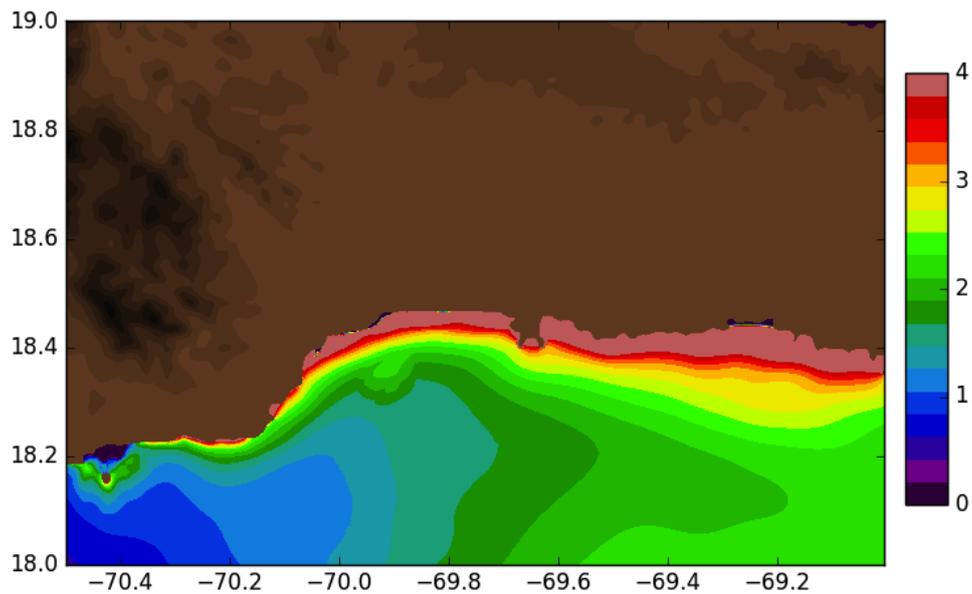


Figura 28. Detalle de la costa sur de República Dominicana mostrando la amplitud máxima de la onda para el Escenario 2. Unidades en metros.

Escenario 3. Amplitudes Máximas

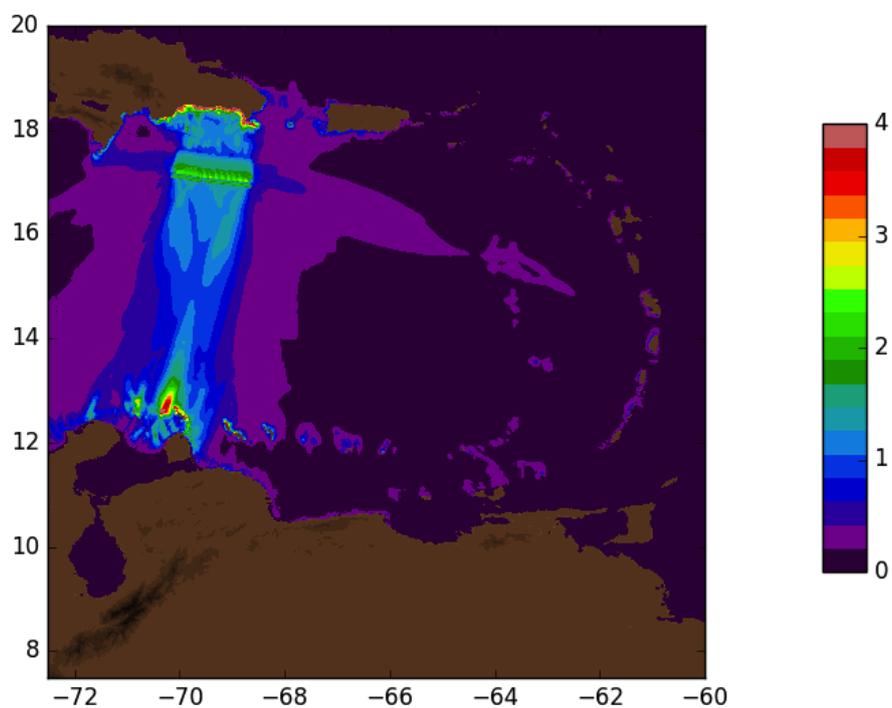


Figura 29. Amplitud máxima de la onda generada para la fuente del Escenario 3. Unidades en metros.

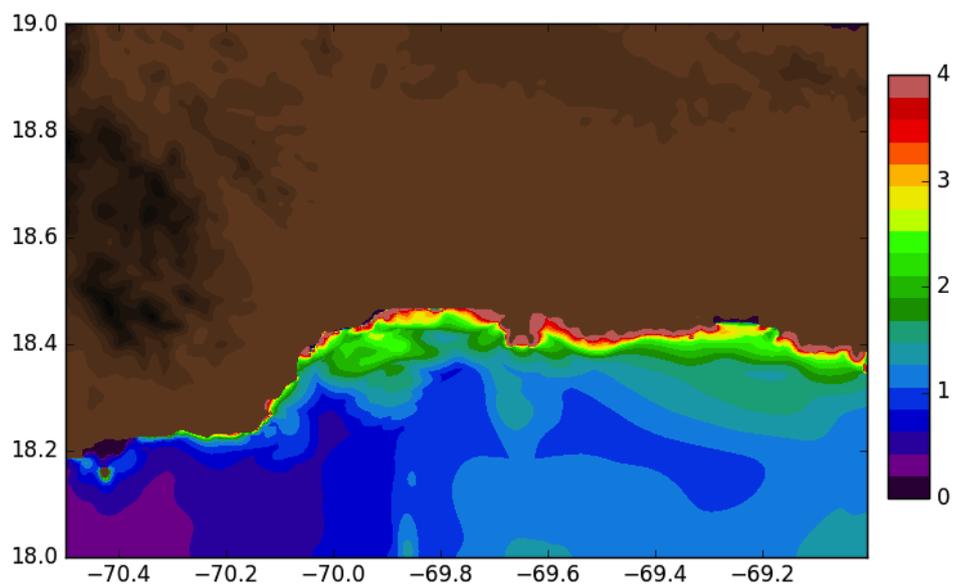


Figura 30. Detalle de la costa sur de República Dominicana mostrando la amplitud máxima de la onda para el Escenario 3. Unidades en metros.

Calado máximo en la zona inundada

Esta sección muestra los resultados del modelo numérico para la inundación de la franja costera estudiada, dividida en ventanas (Figura 31) de oeste (Figura 32) a este (Figura 36). Entre la ventana 2 y la 3 de la 49 no se ha representado ninguna figura porque la costa es muy escarpada, dando lugar a una mancha de inundación no representable en la cartografía o no significativa.

Dado que es frecuente utilizar los calados máximos como referencia para distinto tipo de actuaciones, se ha representado el mapa en modo formal, sin tomar la salida del modelo “tal cual” para facilitar la lectura e interpretación de los resultados. Además, en estas figuras se ha incorporado el “perímetro de seguridad”, que corresponde con una isolínea de elevación obtenida por medio de un procedimiento que se explica más adelante. Los resultados se muestran para el Escenario 2, que se comparan después de esta sección con los otros dos escenarios en las zonas de mayor impacto.

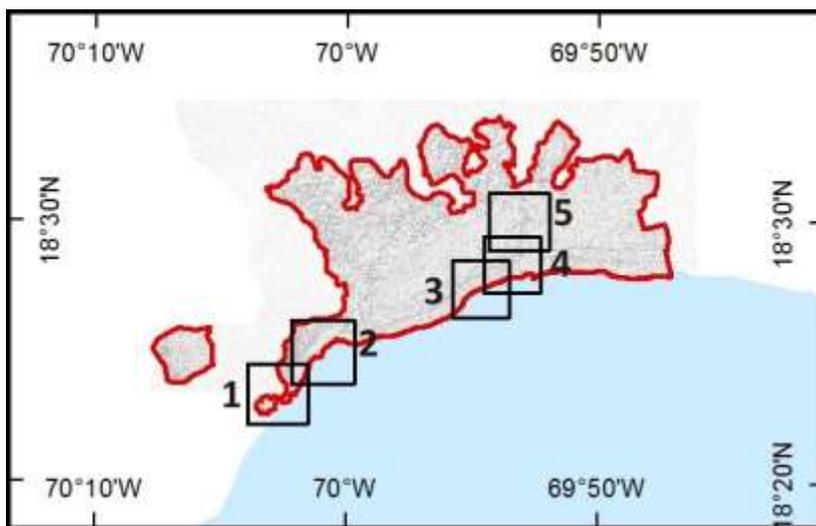


Figura 31. Zonas ampliadas en las cinco figuras siguientes.

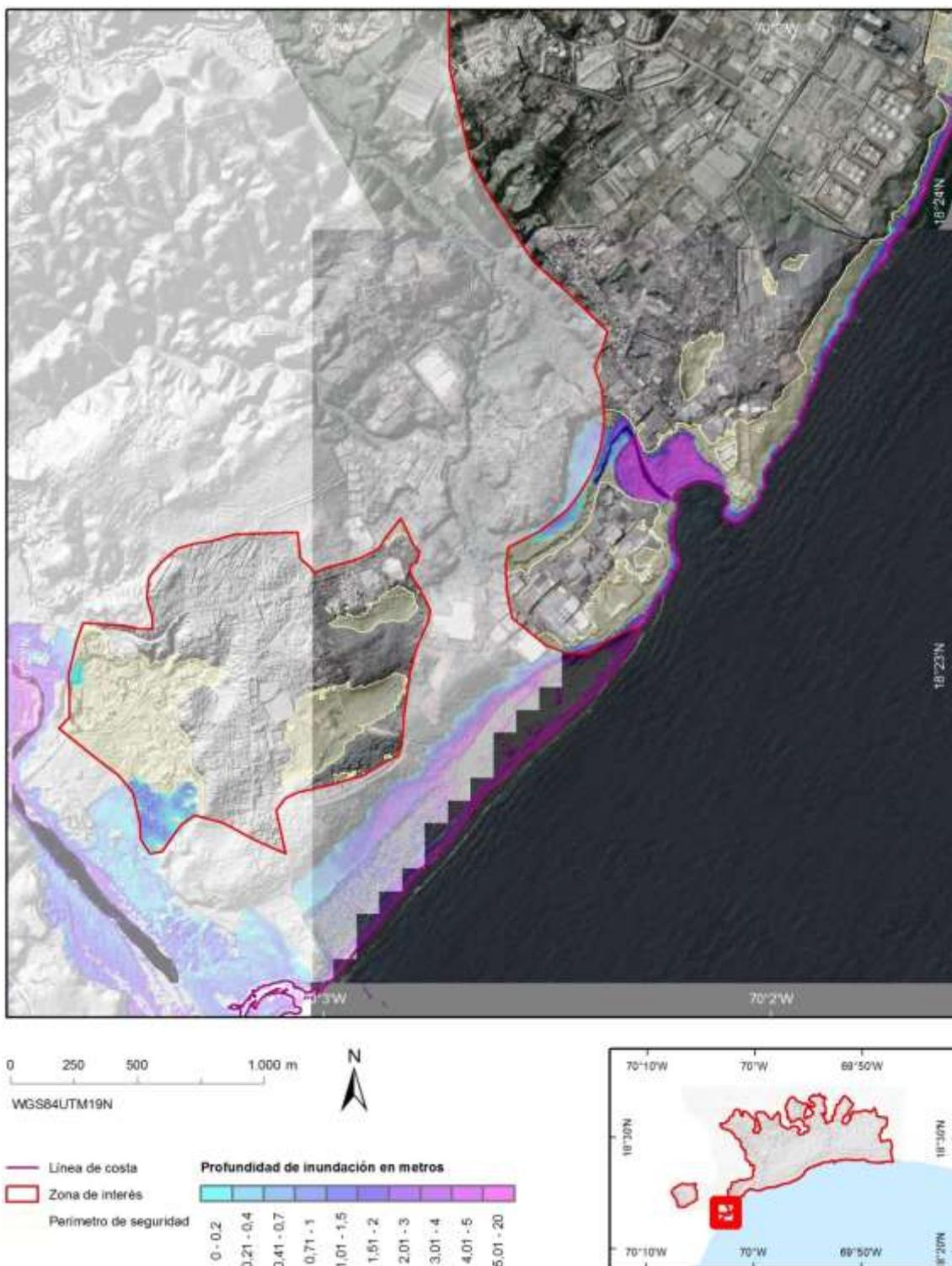


Figura 32. Superficie inundada, en San Gregorio de Nigua (Escenario 2). El ruido en la figura representa los efectos de la disminución de la resolución en el dominio de cálculo.

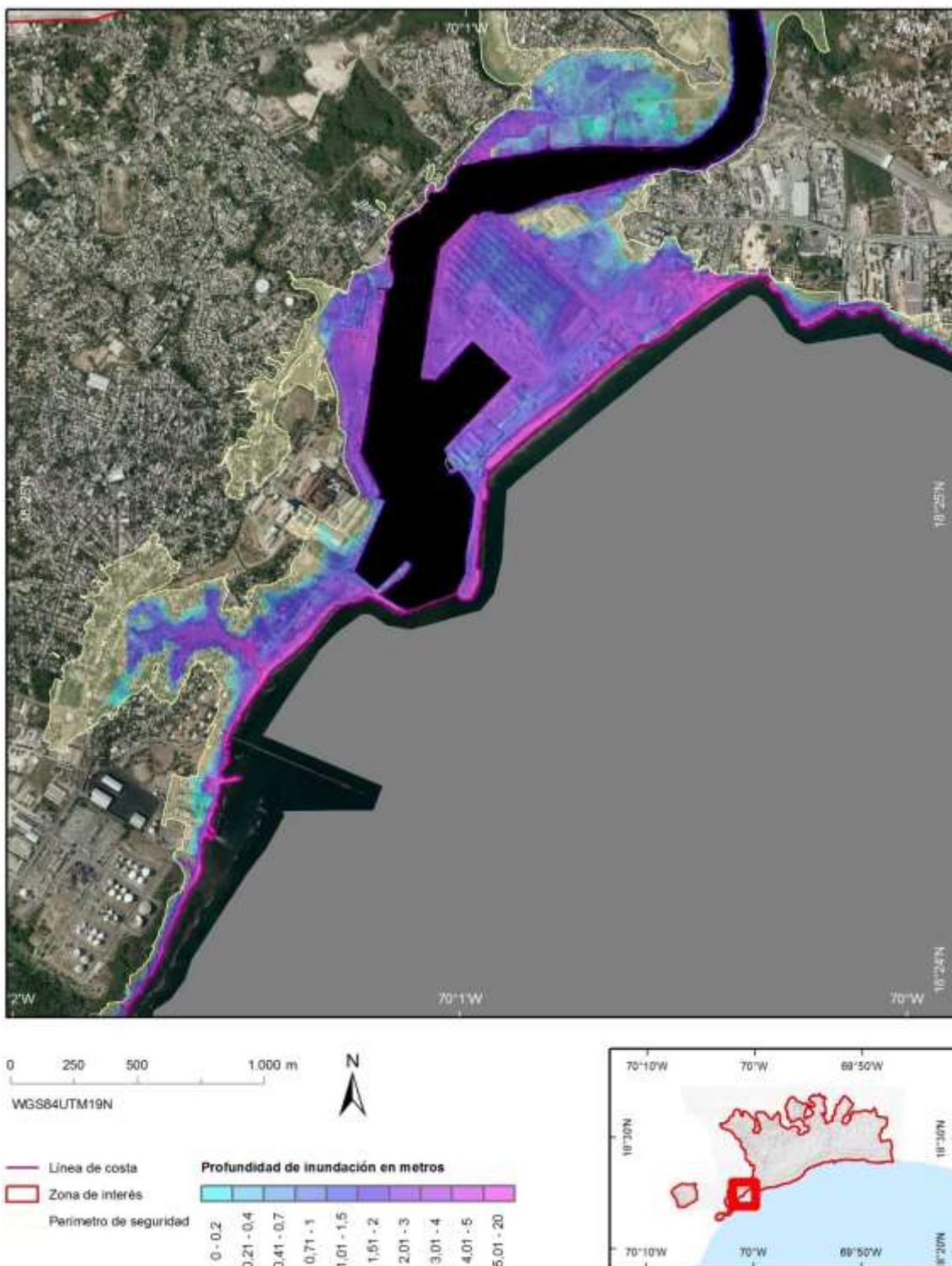


Figura 33. Superficie inundada, junto a espesor máximo de agua en escala de colores, en la zona de Los Bajos de Haina (Escenario 2).

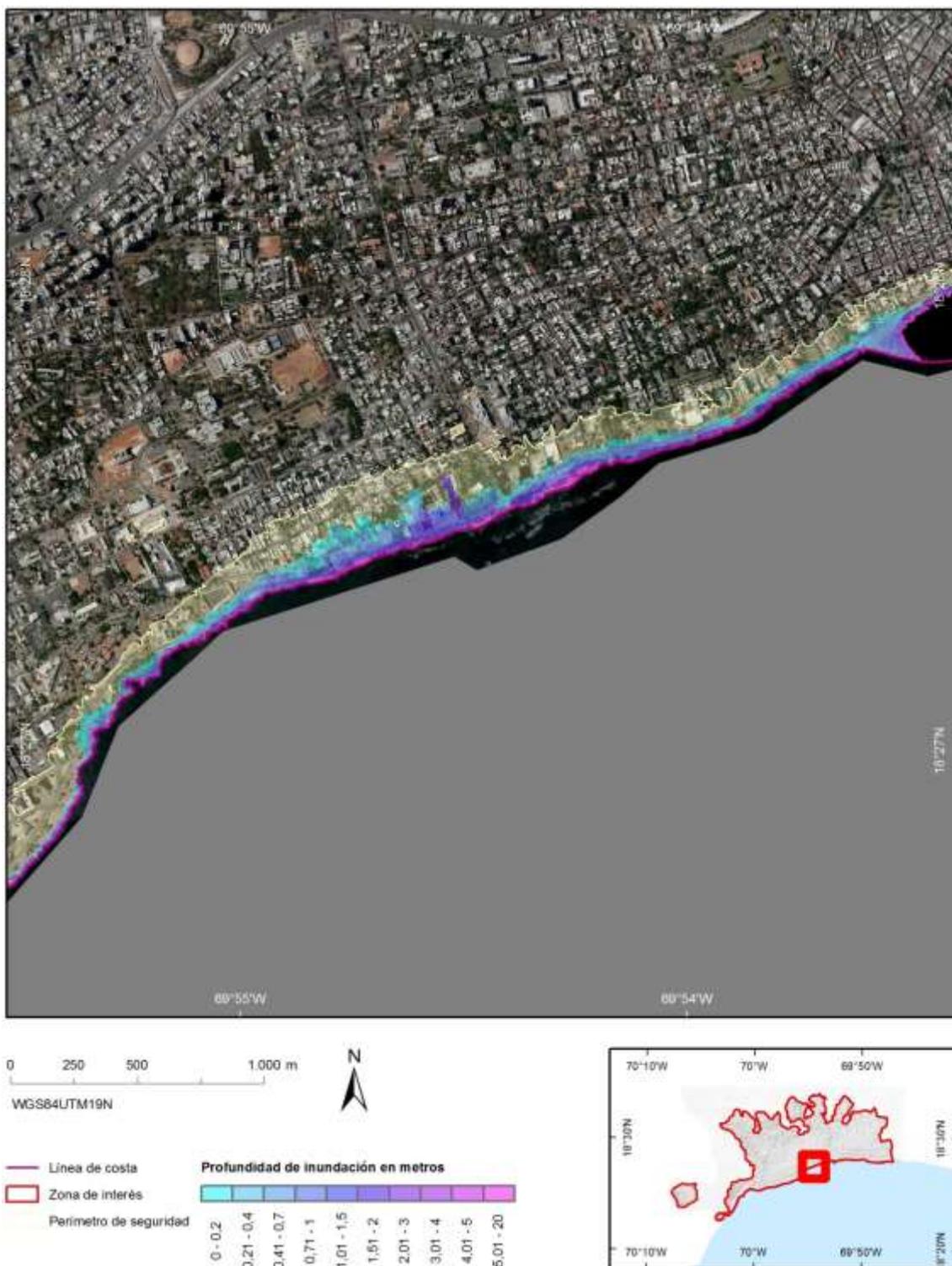


Figura 34. Superficie inundada, en la zona próxima a la Avda. Independencia con Avda. Máximo Gómez (Escenario 2).

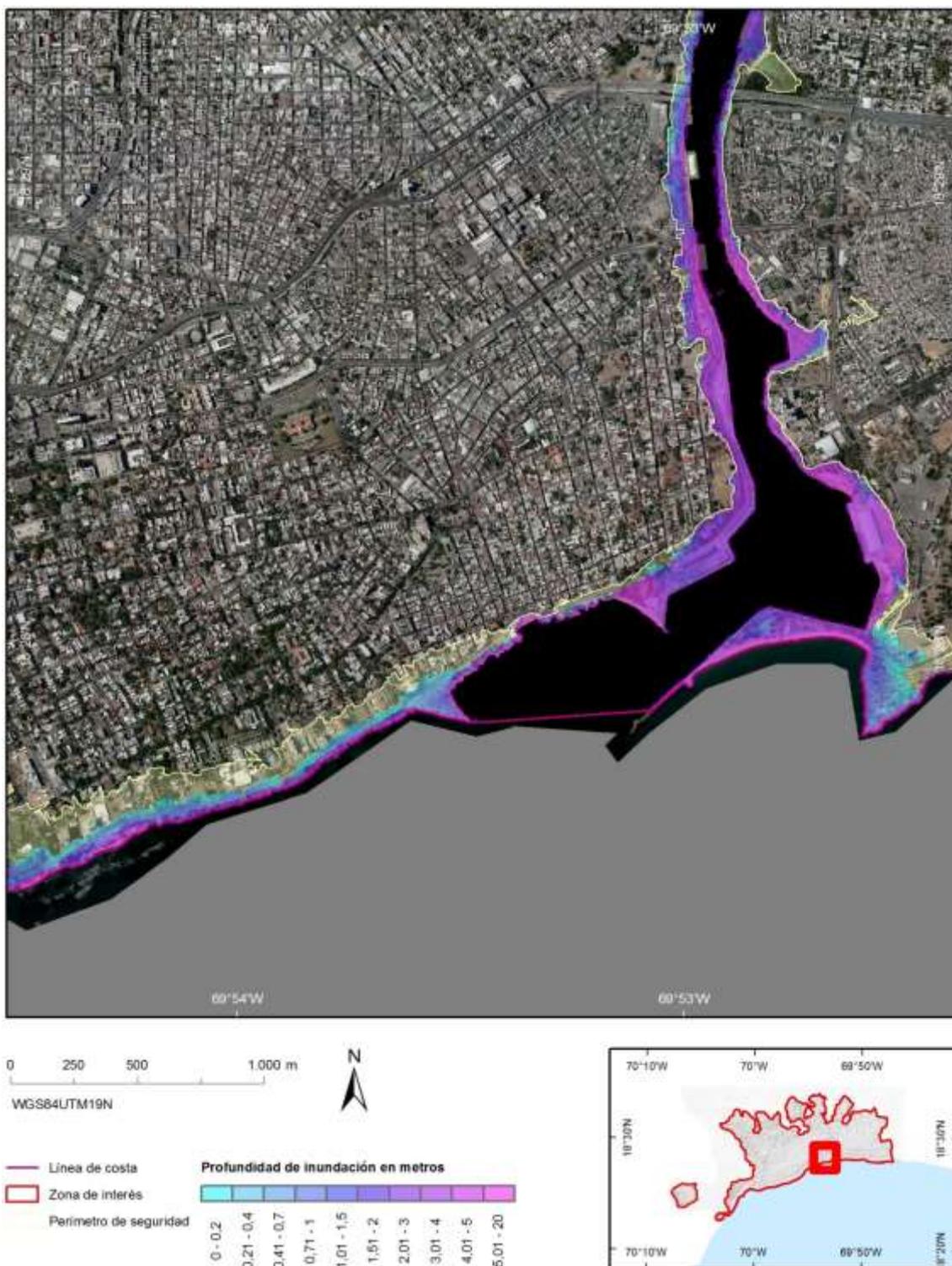


Figura 35. Superficie inundada en la zona de la desembocadura del río Ozama (Escenario 2).

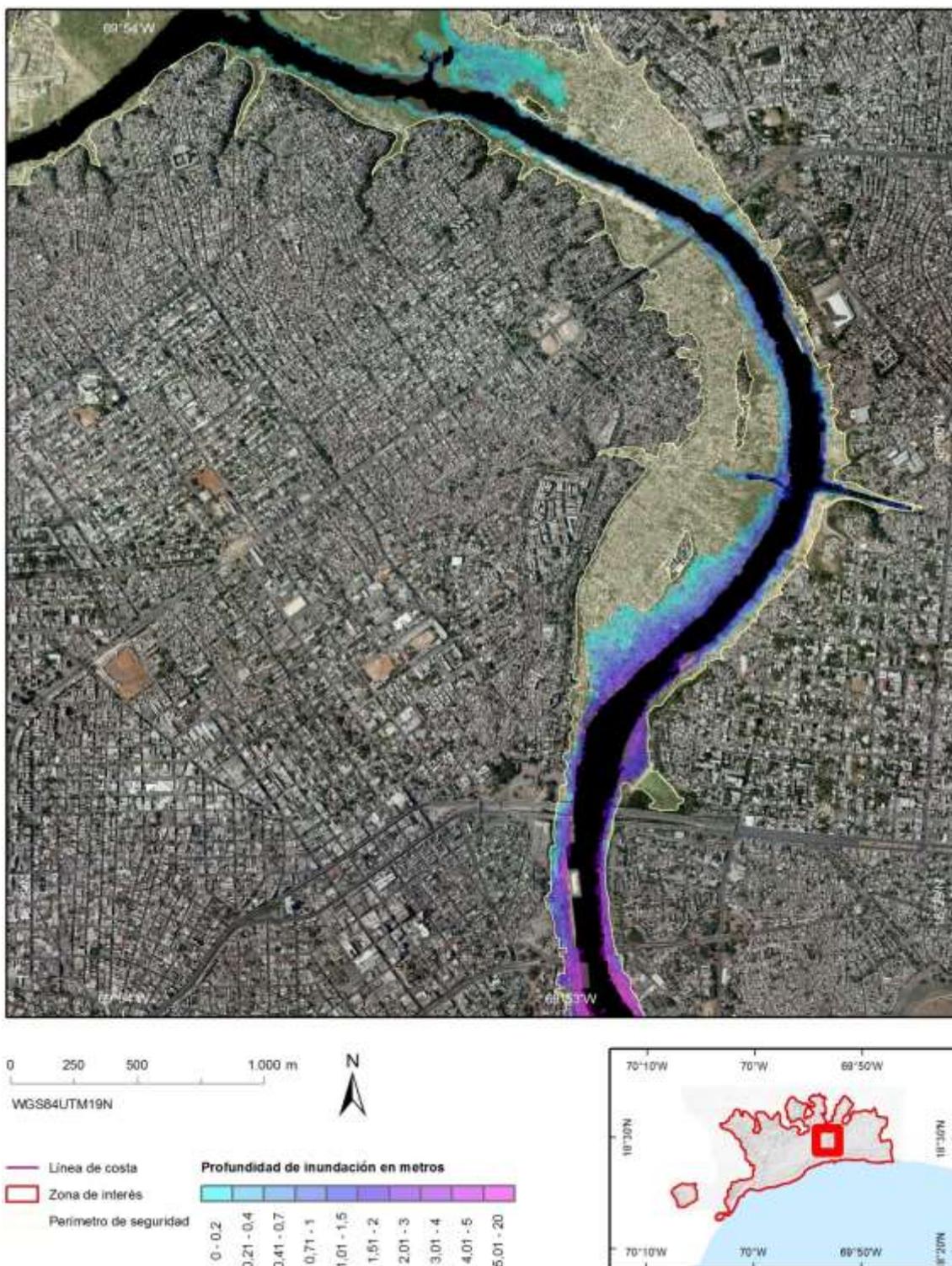


Figura 36. Inundación tipo bore, aguas arriba del río Ozama (Escenario 2).

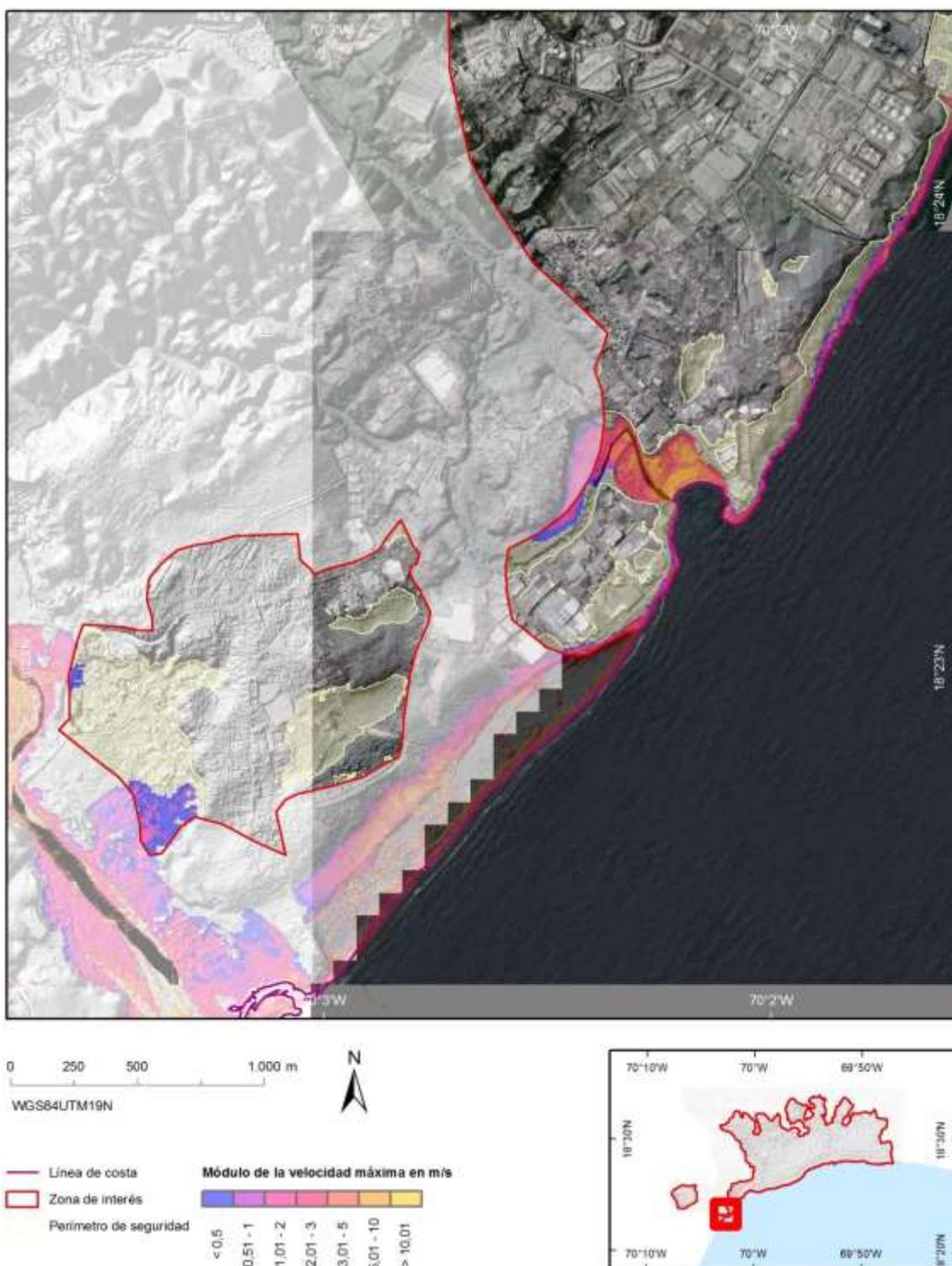


Figura 39. Módulo de la velocidad máxima en la zona de San Gregorio de Nigua (Escenario 2).

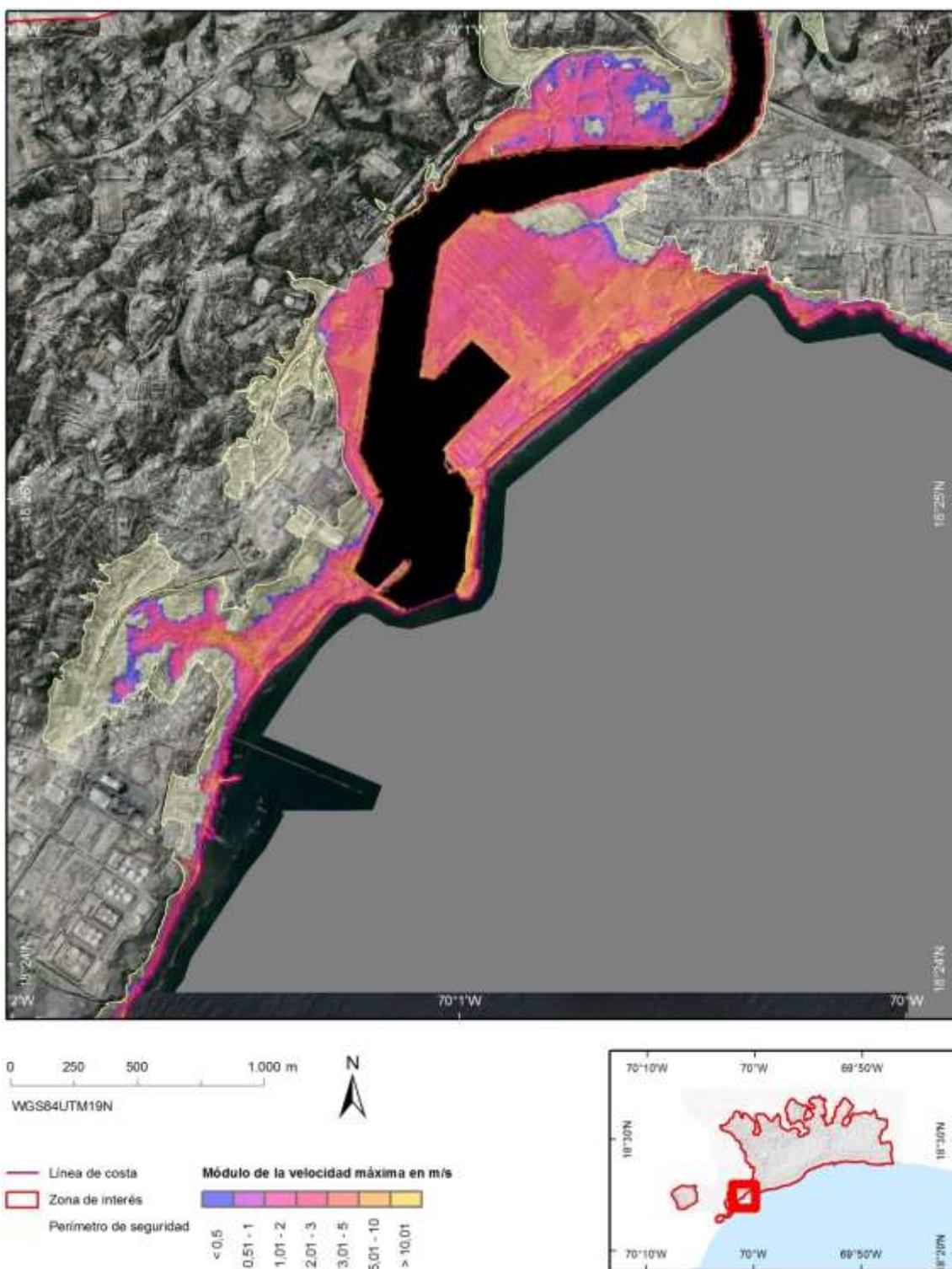


Figura 40. Módulo de la velocidad máxima en la zona de Los Bajos de Haina (Escenario 2).

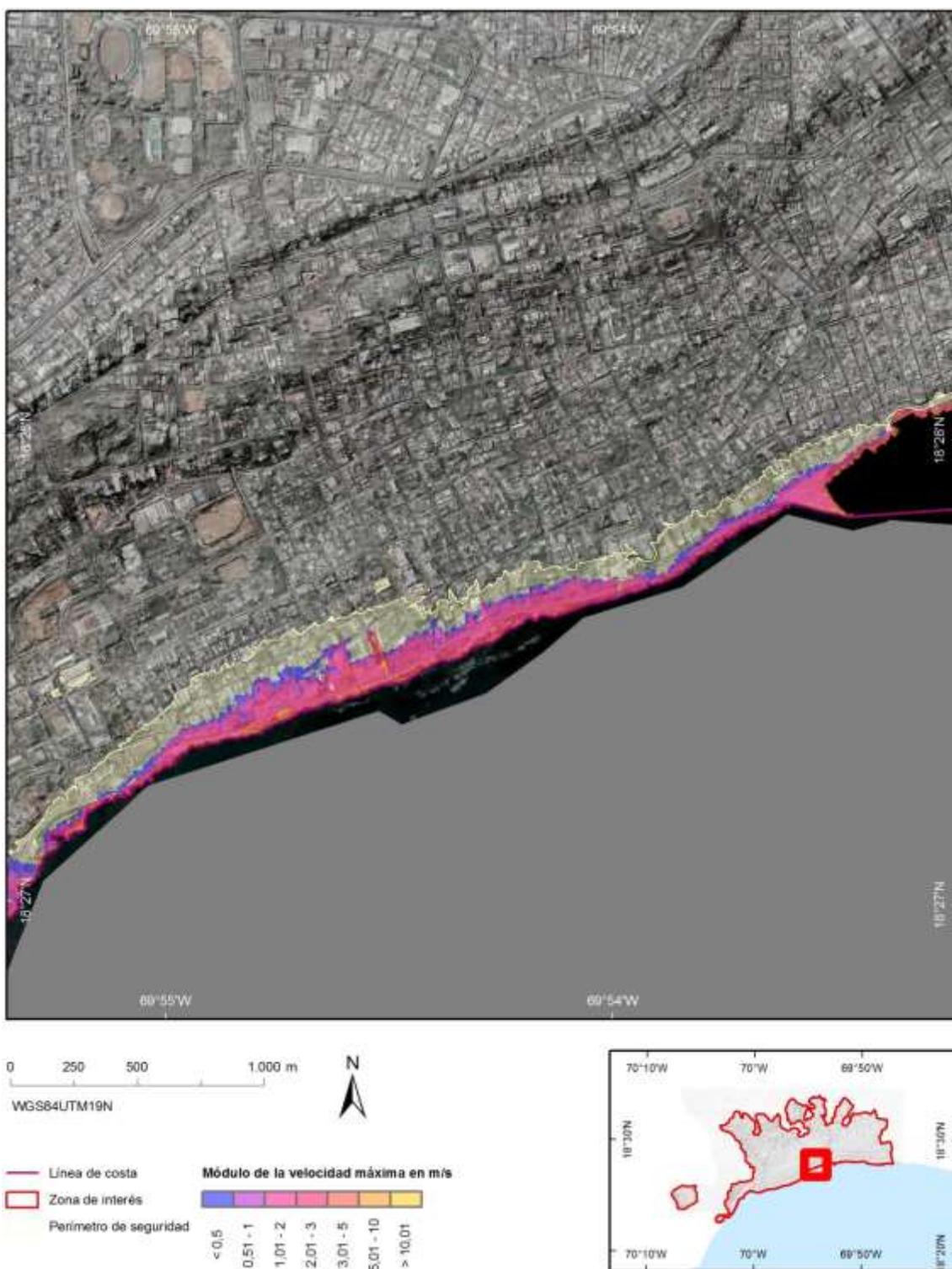


Figura 41. Módulo de la velocidad máxima en la zona próxima a la Avda. Independencia con Avda. Máximo Gómez (Escenario 2).

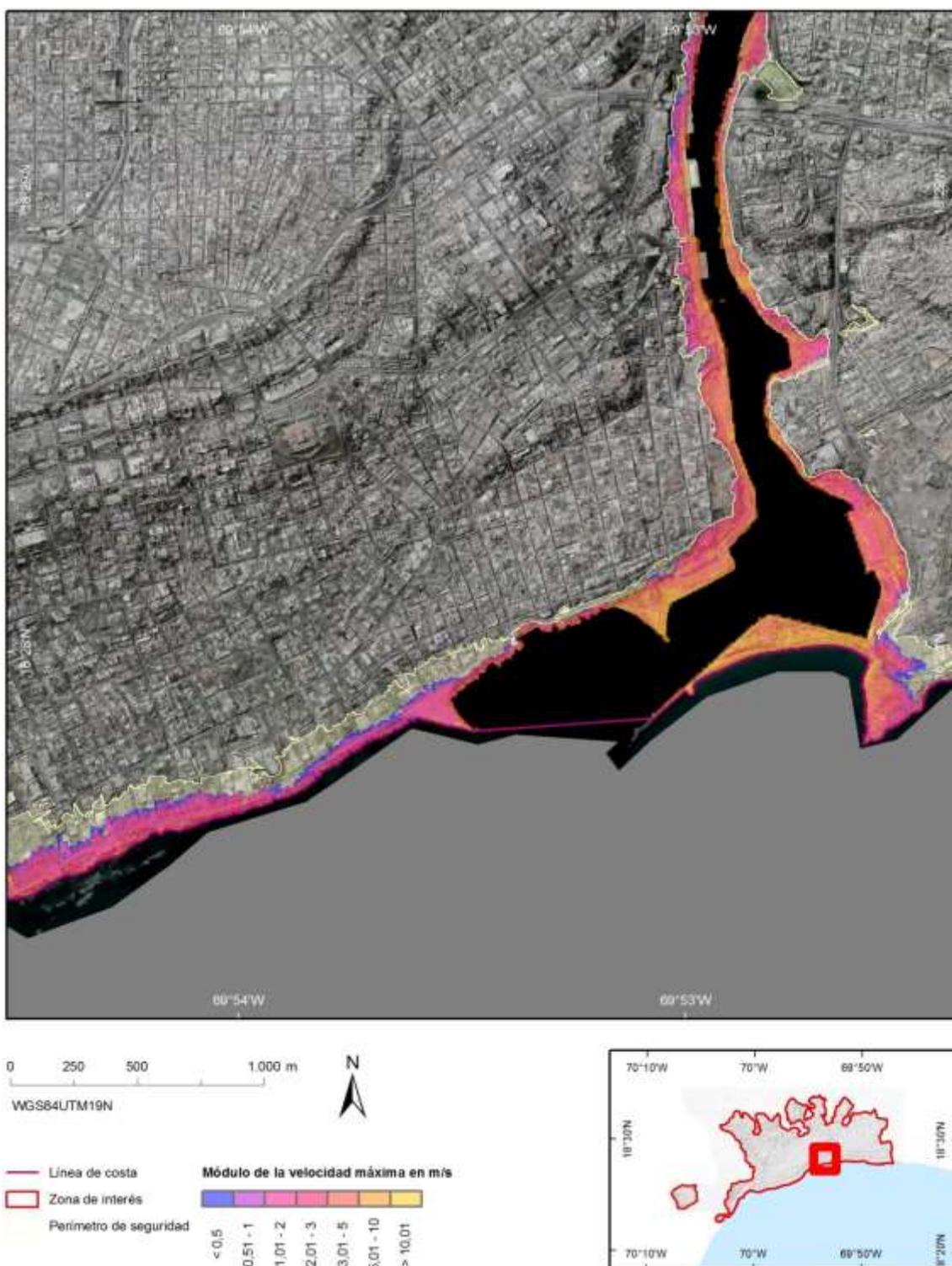


Figura 42. Módulo de la velocidad máxima en la zona de la desembocadura del río Ozama (Escenario 2).

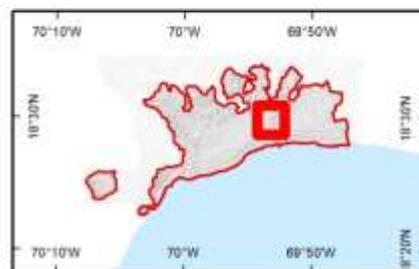
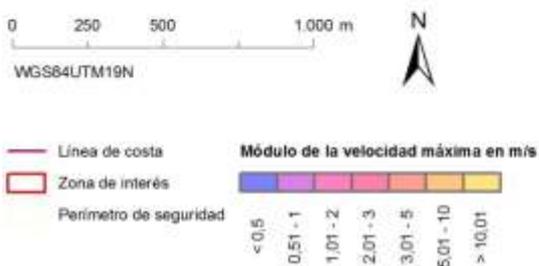
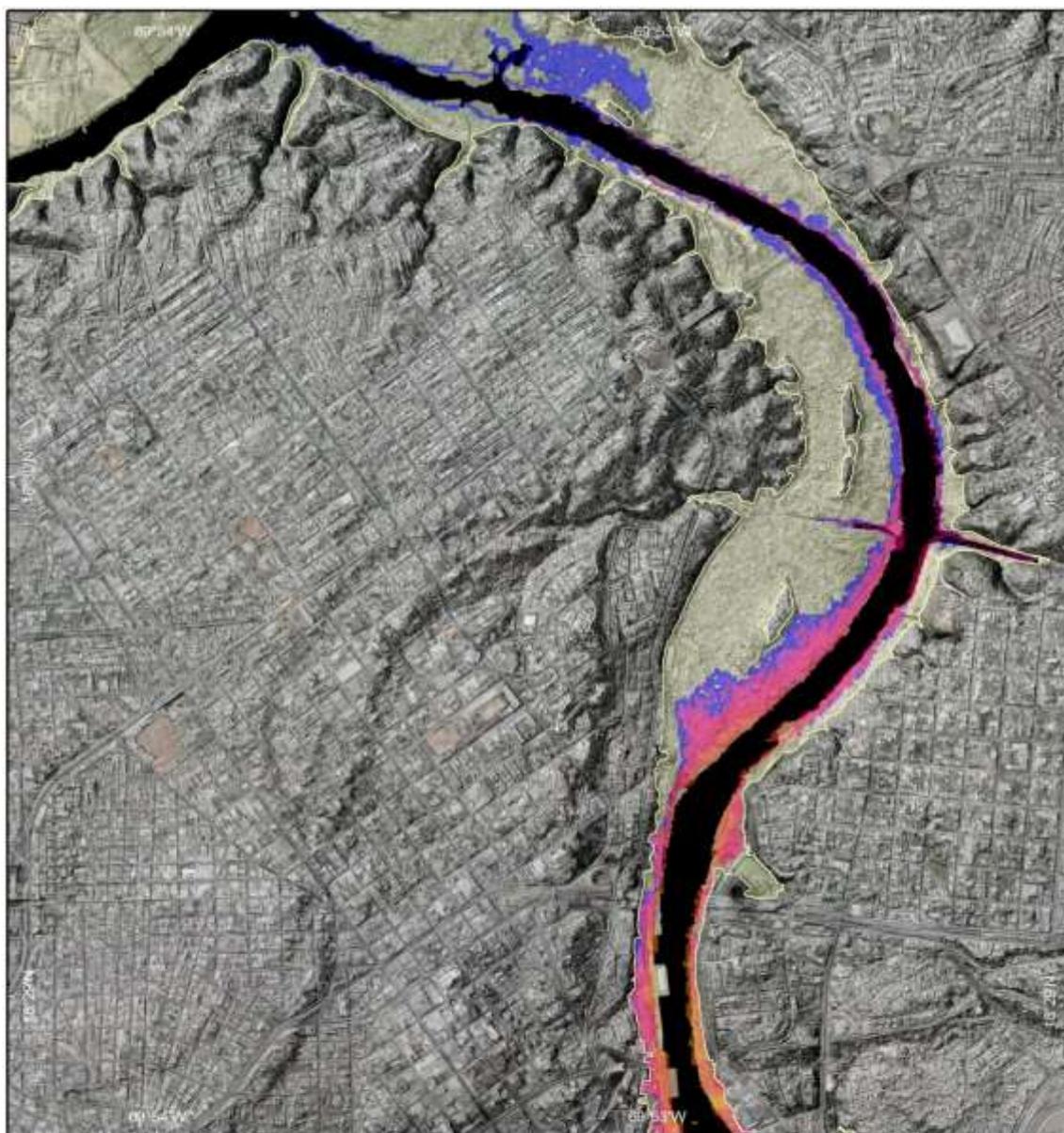


Figura 43. Módulo de la velocidad máxima en la zona aguas arriba del río Ozama (Escenario 2).

Comparación de escenarios

La Figura 44 y la Figura 45 muestran una comparación de escenarios en tres zonas representativas del impacto de tsunamis en las dos zonas más afectadas.

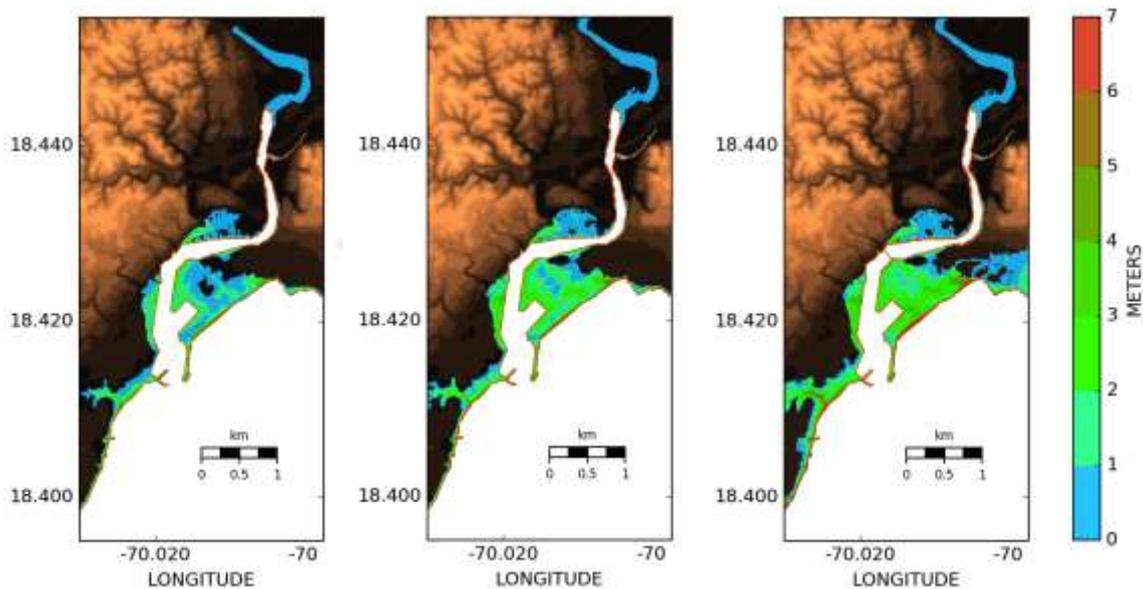


Figura 44. Comparación de la superficie inundada y espesor máximo de agua en escala de colores, en la zona de los Bajos de Haina para los tres escenarios considerados ordenados de menor a mayor impacto (de izquierda a derecha Escenario 3, 2 y 1).

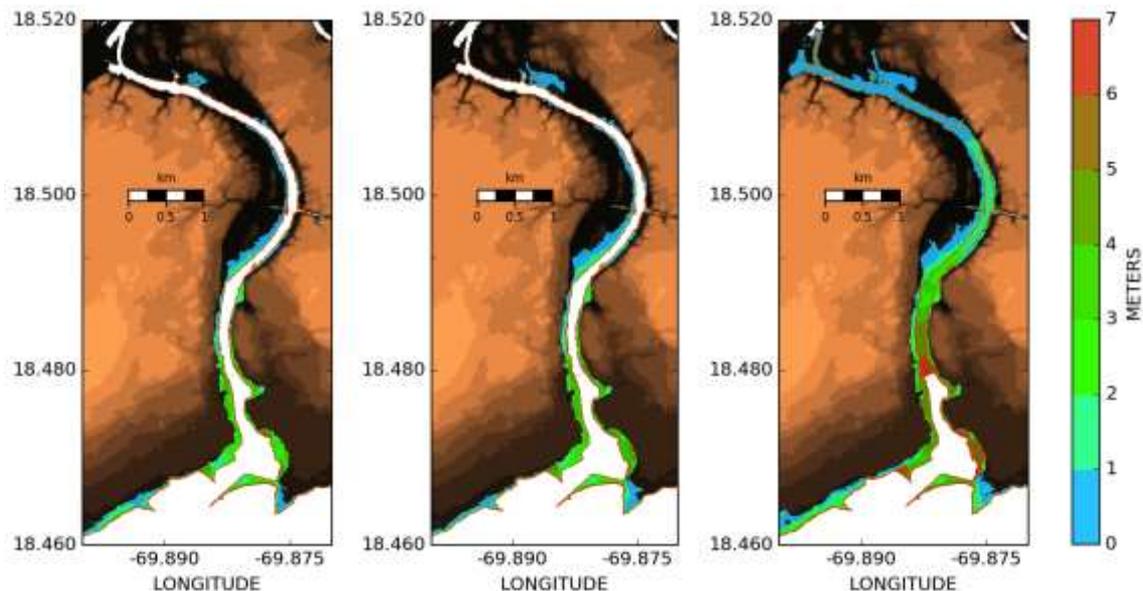


Figura 45. Comparación de la superficie inundada y espesor máximo de agua en escala de colores, en la zona de la desembocadura del Río Ozama para los tres escenarios considerados ordenados de menor a mayor impacto (de izquierda a derecha Escenario 3, 2 y 1).

Flujo máximo en la zona inundada

Desde la Figura 46 hasta la Figura 50 se muestra el flujo máximo de la zona inundada del mismo modo que los calados y el módulo de la velocidad.

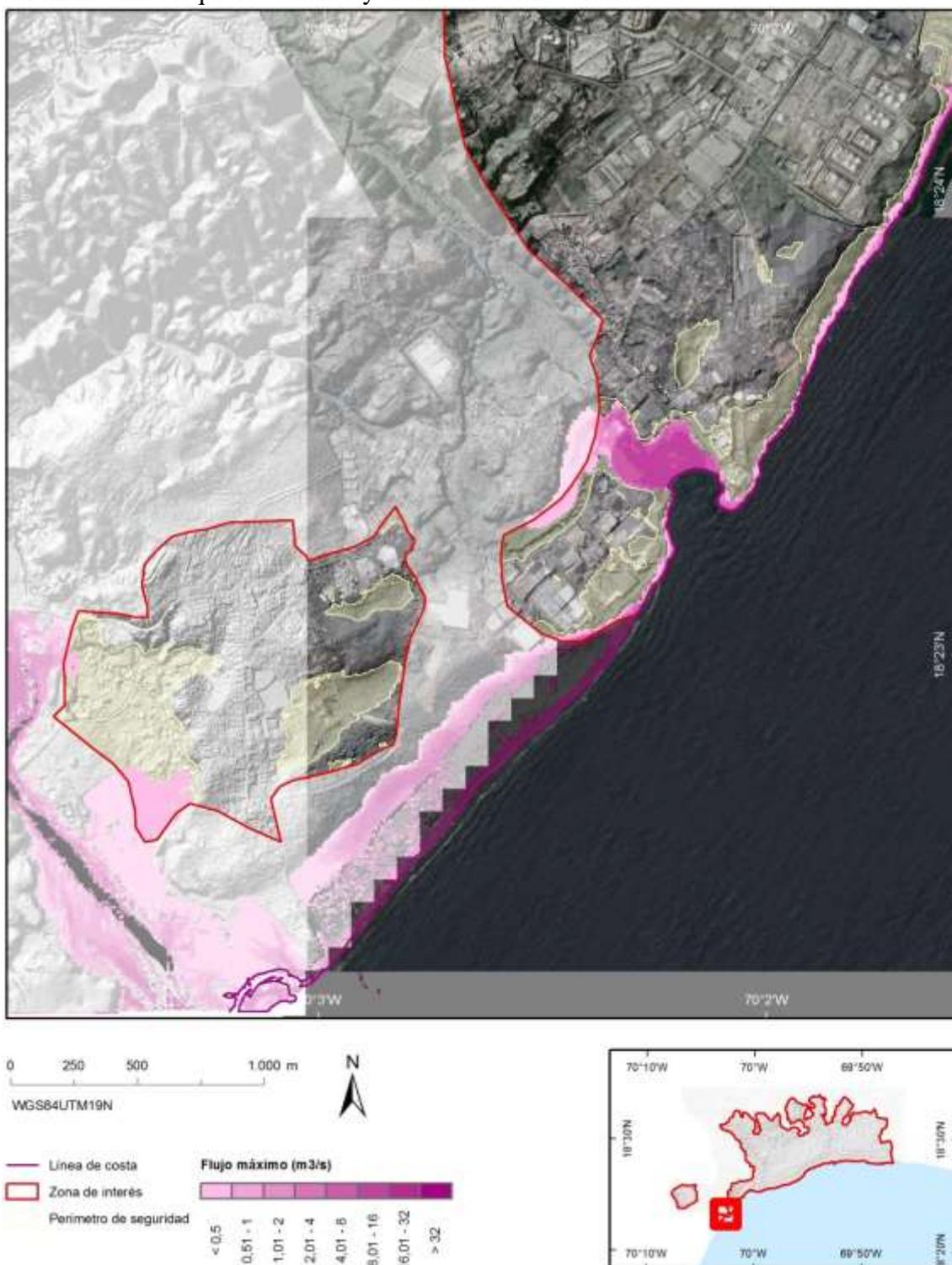


Figura 46. Flujo máximo para el Escenario 2 en San Gregorio de Nigua.

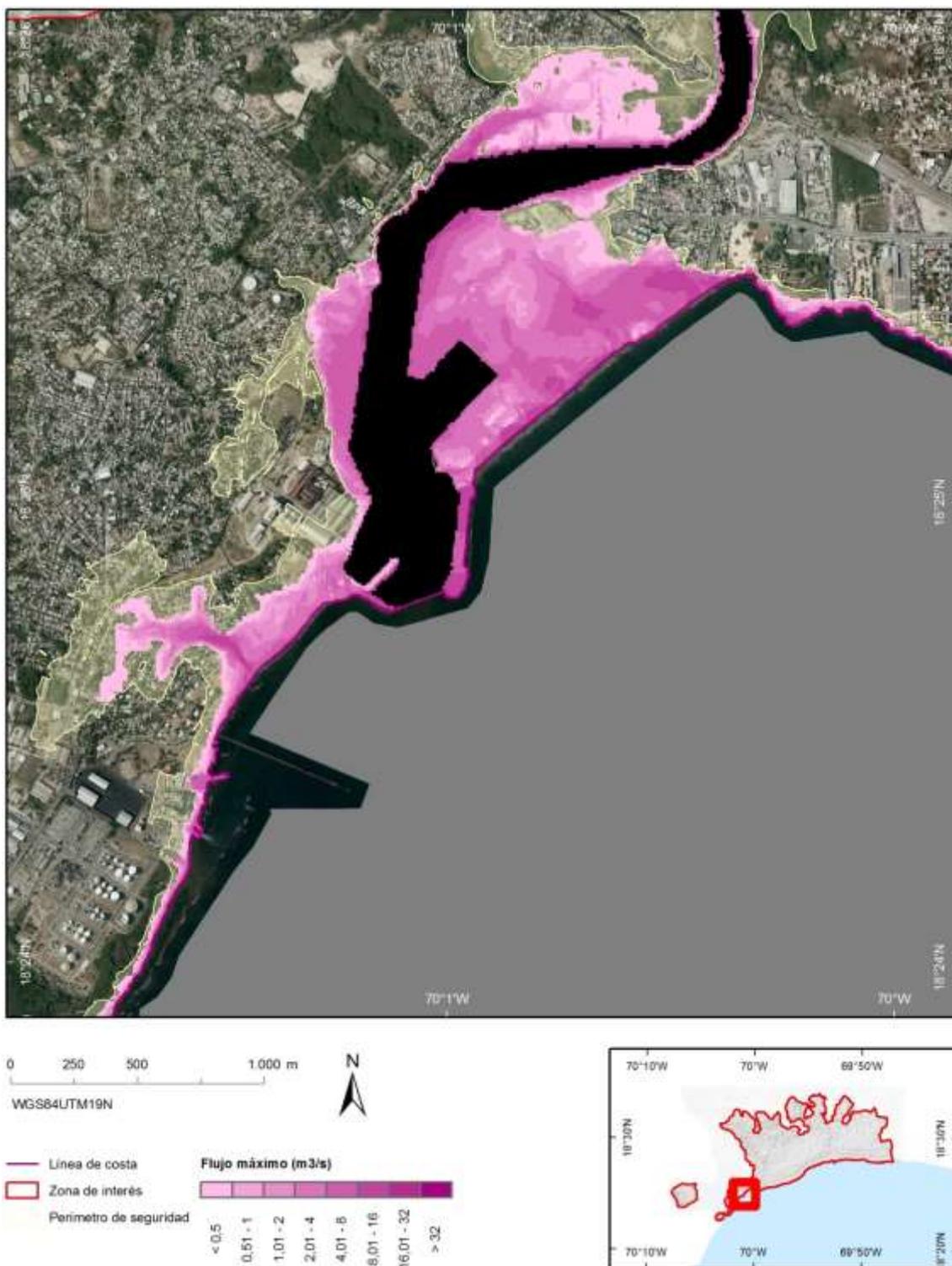


Figura 47. Flujo máximo para el Escenario 2 en los Bajos de Haina.



Figura 48. Flujo máximo para la zona próxima a la Avda. Independencia con Avda. Máximo Gómez (Escenario 2).

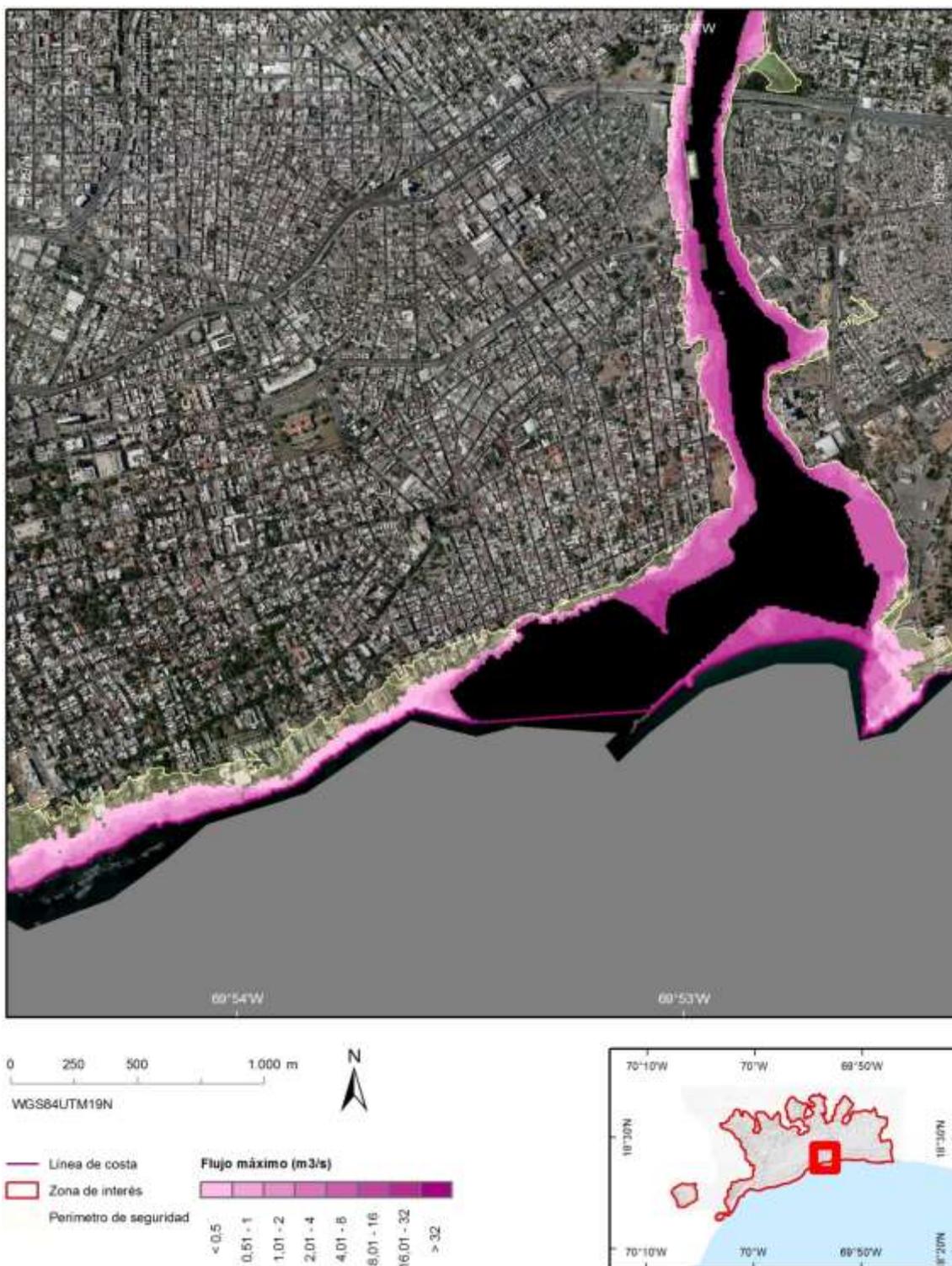


Figura 49. Flujo máximo en la desembocadura del río Ozama.

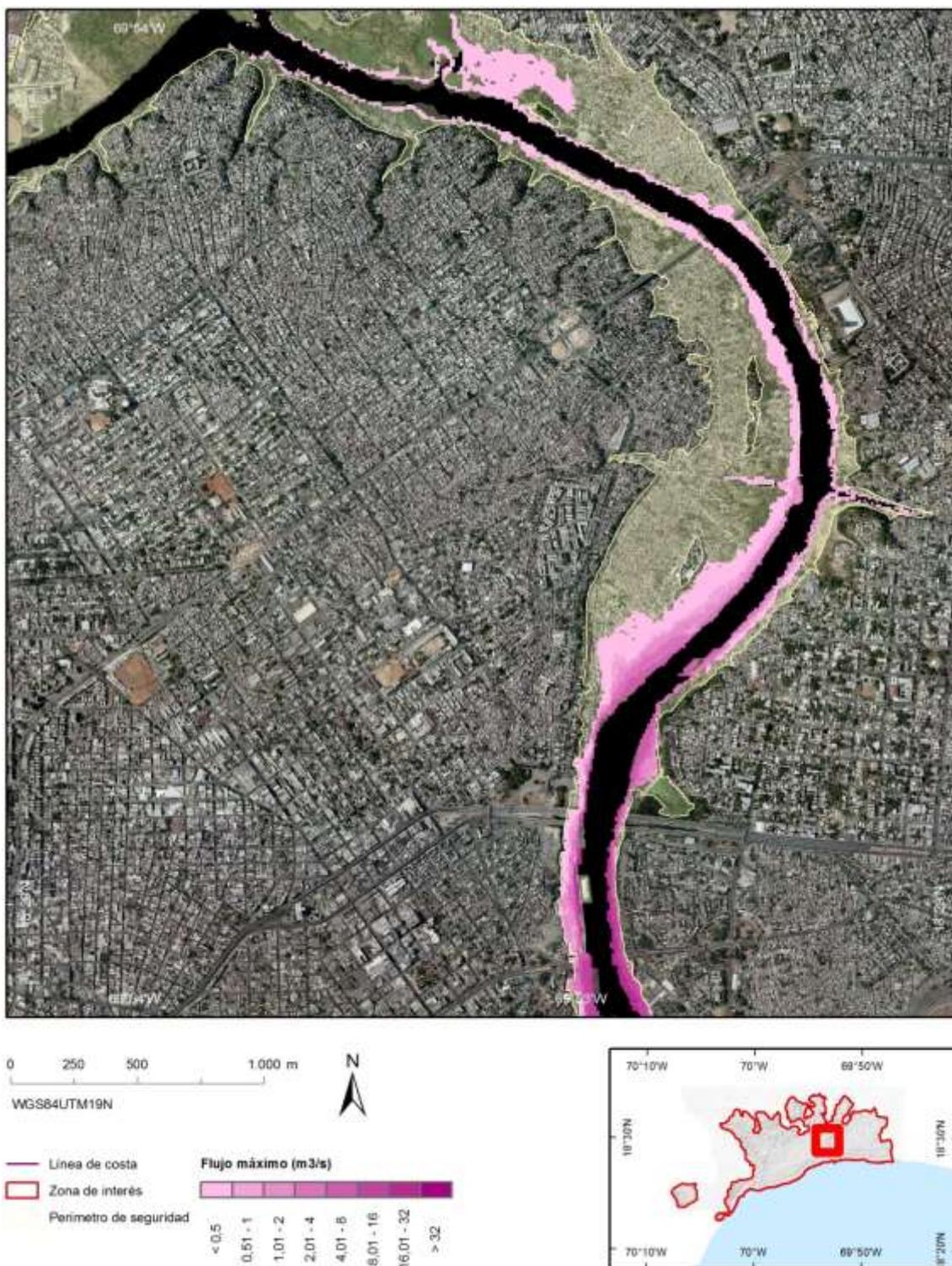


Figura 50. Flujo aguas arriba de la desembocadura del río Ozama.

Flujos de ascenso y descenso en la zona inundada

En la Figura 51 y en la Figura 52 se muestran los flujos en ascenso y descenso respectivamente para tres zonas seleccionadas. Se puede observar una importante dispersión de los vectores fruto de la turbulencia del flujo.

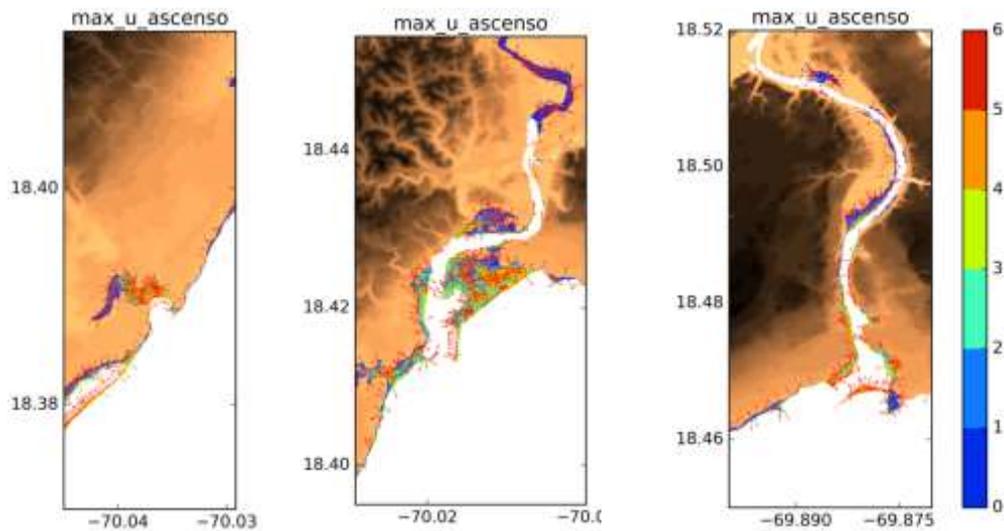


Figura 51. Gráfico con las direcciones del flujo de ascenso en el momento de máxima velocidad y módulo de la velocidad máxima en gama de colores. San Gregorio de Nigua.

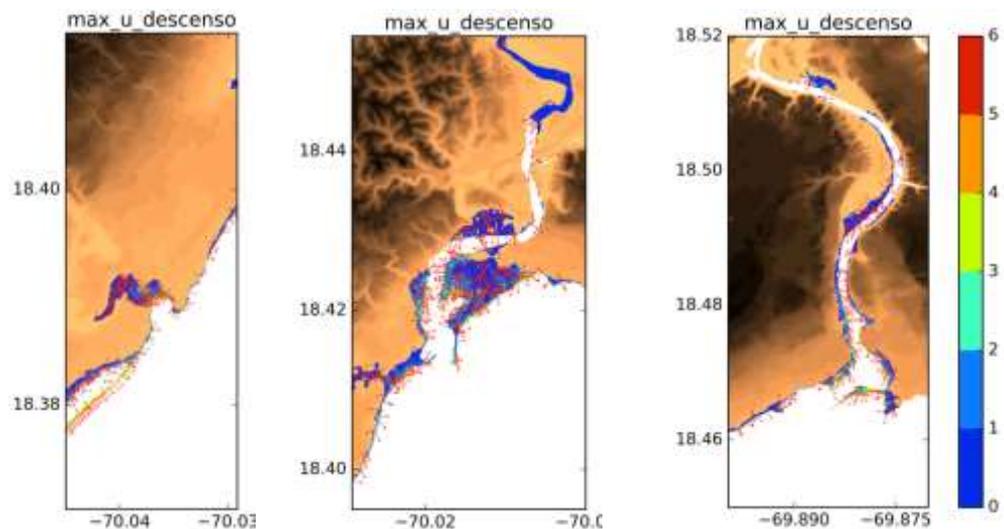


Figura 52. Gráfico con las direcciones del flujo de descenso en el momento de máxima velocidad y módulo de la velocidad máxima en gama de colores. San Gregorio de Nigua.

Remonte del tsunami (*runup*)

El *runup* o remonte del tsunami es la cota máxima sobre el nivel del mar que alcanza en costa la onda del tsunami. Es por tanto la cota más alta inundada y, en general, se suele medir como la cota en el punto de alcance máximo del tsunami (Figura 53). La representación gráfica del *runup* en un trozo de la costa afectada por un tsunami se suele hacer mediante una línea de referencia que sigue la línea de costa y sobre la que se proyectan los valores del *runup* medido o calculado numéricamente. Debido a esta forma de representar el remonte, para el caso de los resultados de un modelo numérico, se observa una importante dispersión en las zonas de las desembocaduras, que al estar bastante encajadas, dan lugar a un cierto “ruido”, al igual que en aquellas franjas escarpadas de la costa.

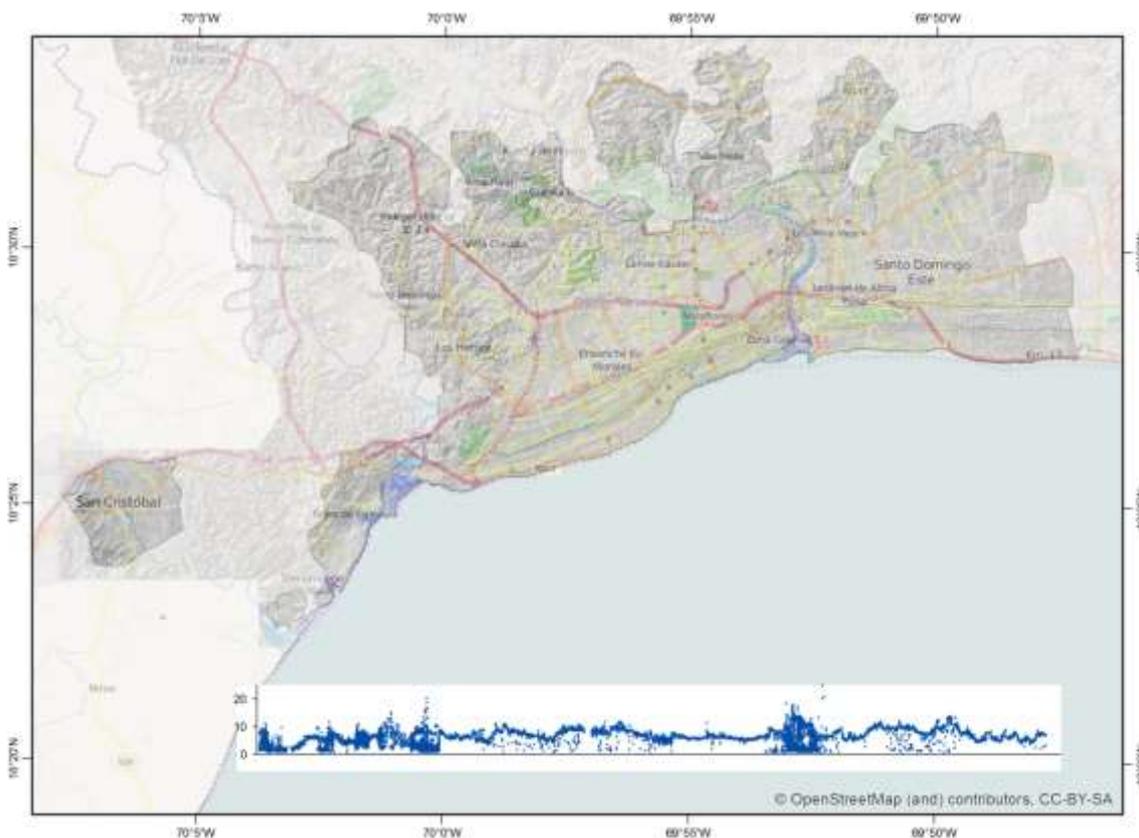


Figura 53. La gráfica inferior muestra la cota máxima que alcanza el tsunami proyectada sobre una línea horizontal que abarca la costa modelizada.



Series temporales

En esta sección se presentan series temporales del nivel del mar en las desembocaduras de los ríos Nigua, Bajos de Haina y Ozama, considerado cuatro boyas virtuales en las siguientes coordenadas:

1. (18.3885,-70.0355) – Desembocadura río Nigua.
2. (18.417, -70.0175) – Desembocadura del río Haina.
3. (18.4655,-69.8805) – Ozama (exterior).
4. (18.4695,-69.8805) – Ozama (interior).

La Figura 54 muestra la localización de las dos primeras boyas virtuales en las desembocaduras de los ríos Nigua y Bajos de Haina y en la Figura 55 las series temporales correspondientes a la evolución de la superficie del mar por efecto del tsunami para el Escenario 2. En la Figura 56 se muestran las dos boyas virtuales localizadas en Ozama y en la Figura 57 se muestran las series temporales correspondientes. En la Figura 58 se muestran las series temporales del Escenario 1 y en la Figura 59 las series temporales del escenario 3.

En las series temporales del Escenario 2 (Figura 55 y Figura 57) se observa una elevación de la superficie libre máxima de unos 4 metros en los dos primeros casos (y que corresponde a la primera ola, de 4,65 y 4,12 metros, respectivamente) y por encima de los 5 metros para la desembocadura del Río Ozama (5,53 m exterior/5,38 m interior).

Para el evento extremo, al que corresponde el Escenario 1 (Figura 58), se observan unas amplitudes de onda mayores de alrededor de 5 metros para La Playita (4,84 m) y la boya situada en los Bajos de Haina (5,13 m) y de casi 7,6 metros para la boya situada en la desembocadura del Río Ozama (exterior) y 6,75 m para la interior.

Para el Escenario 2 (Figura 59), se observan unas amplitudes de onda parecidas a las del escenario de referencia aunque algo menores, ligeramente por encima de los 4 metros para La Playita (4,27 m) y por debajo de los 3 metros y medio para la boya situada en los Bajos de Haina (3,32 m) y de alrededor de los 5 metros para las boyas situadas en la desembocadura del Río Ozama (5,45 m exterior/5,03 m interior).

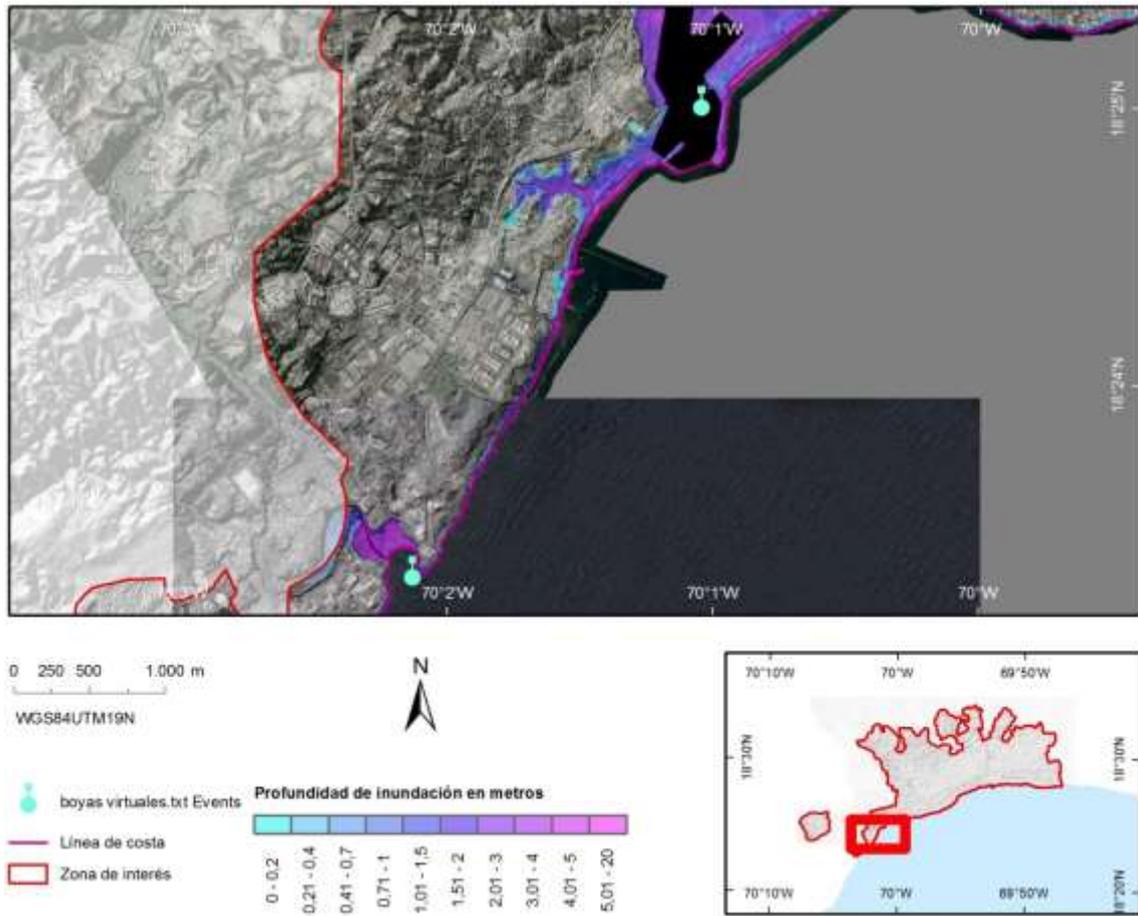


Figura 54. Localización de las boyas virtuales en las desembocaduras de los ríos Nigua y Bajos de Haina.

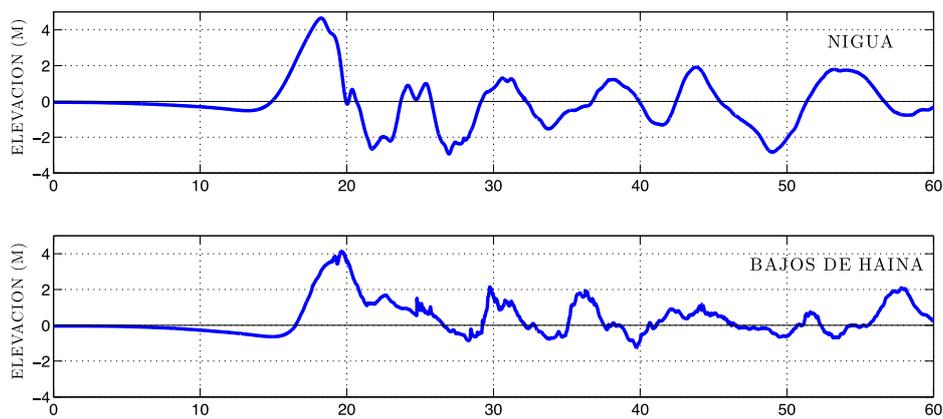


Figura 55. Series temporales para las boyas virtuales de Nigua y Bajos de Haina.

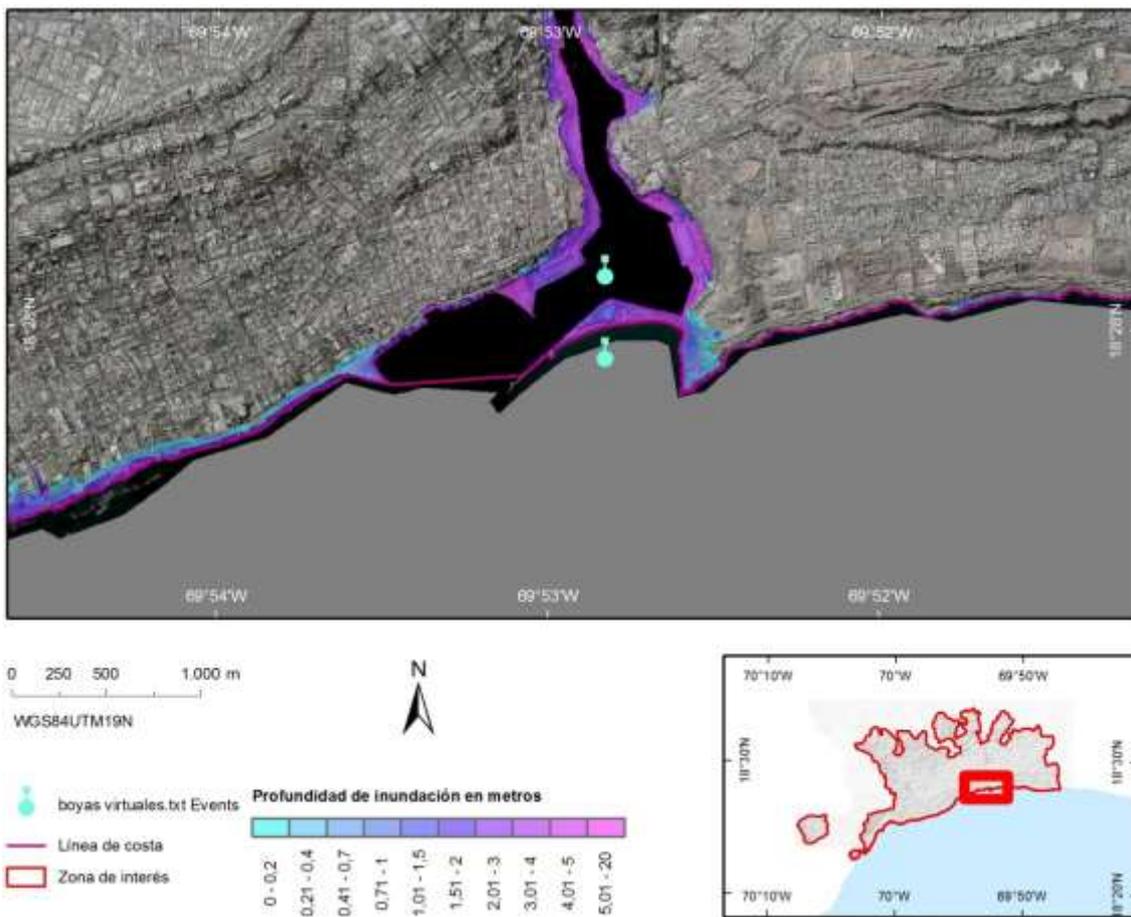


Figura 56. Localización de las boyas virtuales en la desembocadura del río Ozama.

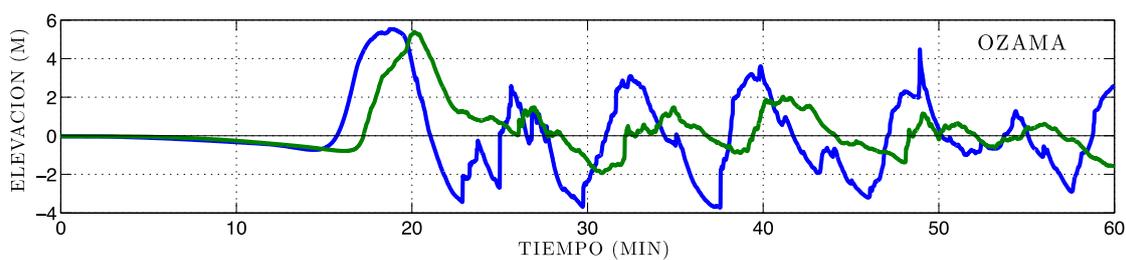


Figura 57. Series temporales en las 4 boyas virtuales que hemos considerado, midiendo la evolución temporal de la altura de la ola para el Escenario 2.

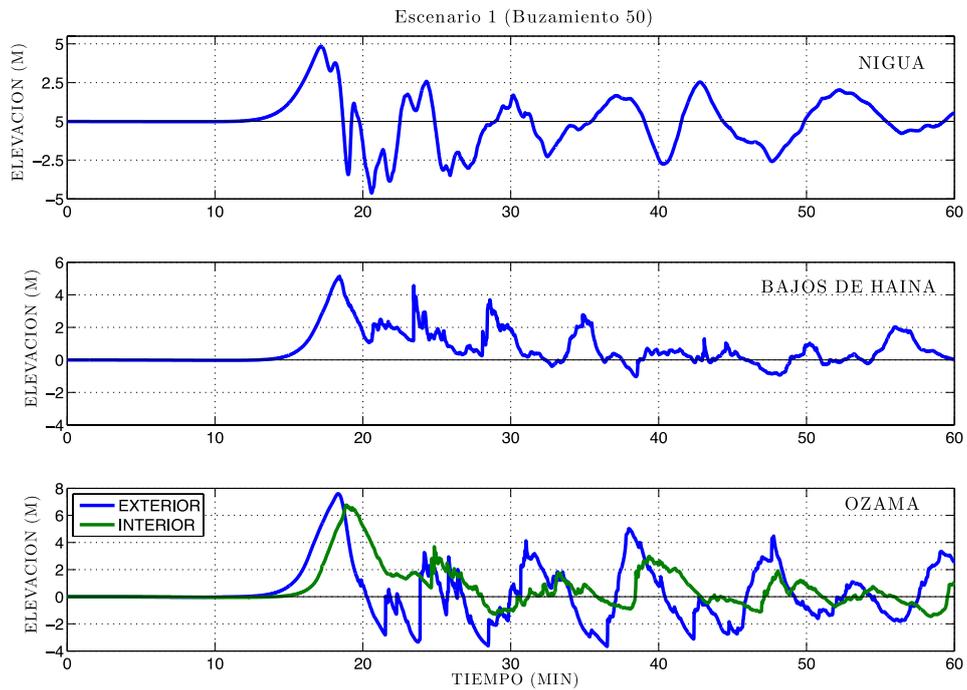


Figura 58. Series temporales en las 4 boyas virtuales que hemos considerado, midiendo la evolución temporal de la altura de la ola para el Escenario 1.

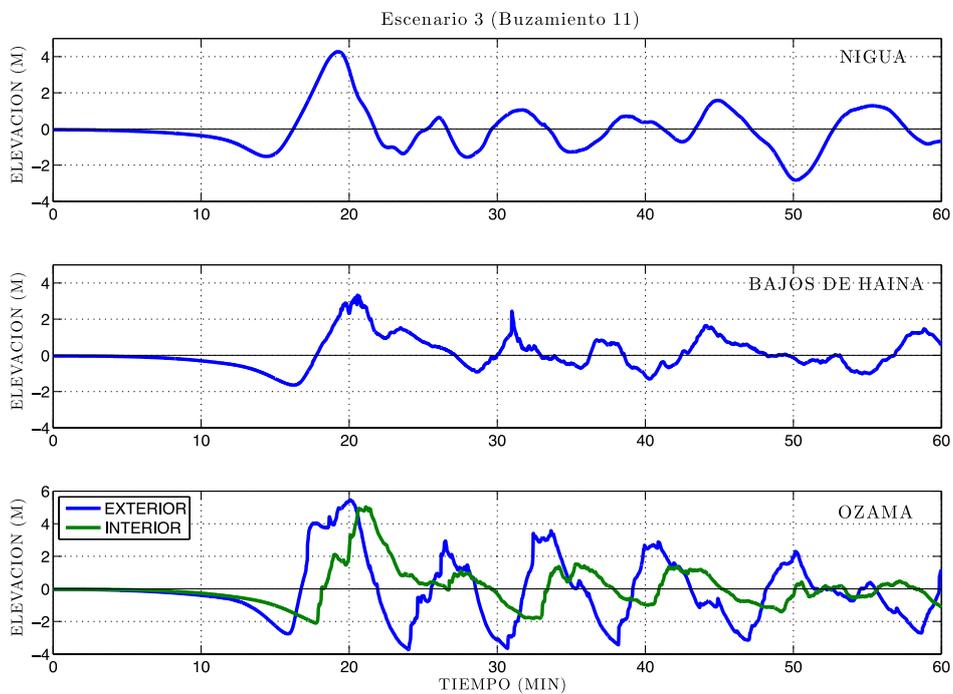


Figura 59. Series temporales en las 4 boyas virtuales que hemos considerado, midiendo la evolución temporal de la altura de la ola para el Escenario 3.

Perímetro de seguridad

Debido a que el límite del modelo topobatimétrico conjunto no tiene la suficiente extensión para garantizar una estabilidad completa del modelo, se ha complementado la simulación numérica con un contorno derivado del análisis de los resultados del modelo para extrapolar un contorno denominado “perímetro de seguridad” que refleja desde un punto de vista estadístico un límite a partir del cual la probabilidad de inundación es mínima.

Este contorno se basa en el análisis de correlación de calados máximos respecto a la cota alcanzada en cada punto, cuya representación normalizada se muestra en la Figura 60. El mapa resultante se puede ver en el anexo correspondiente y su miniatura en la Figura 61.

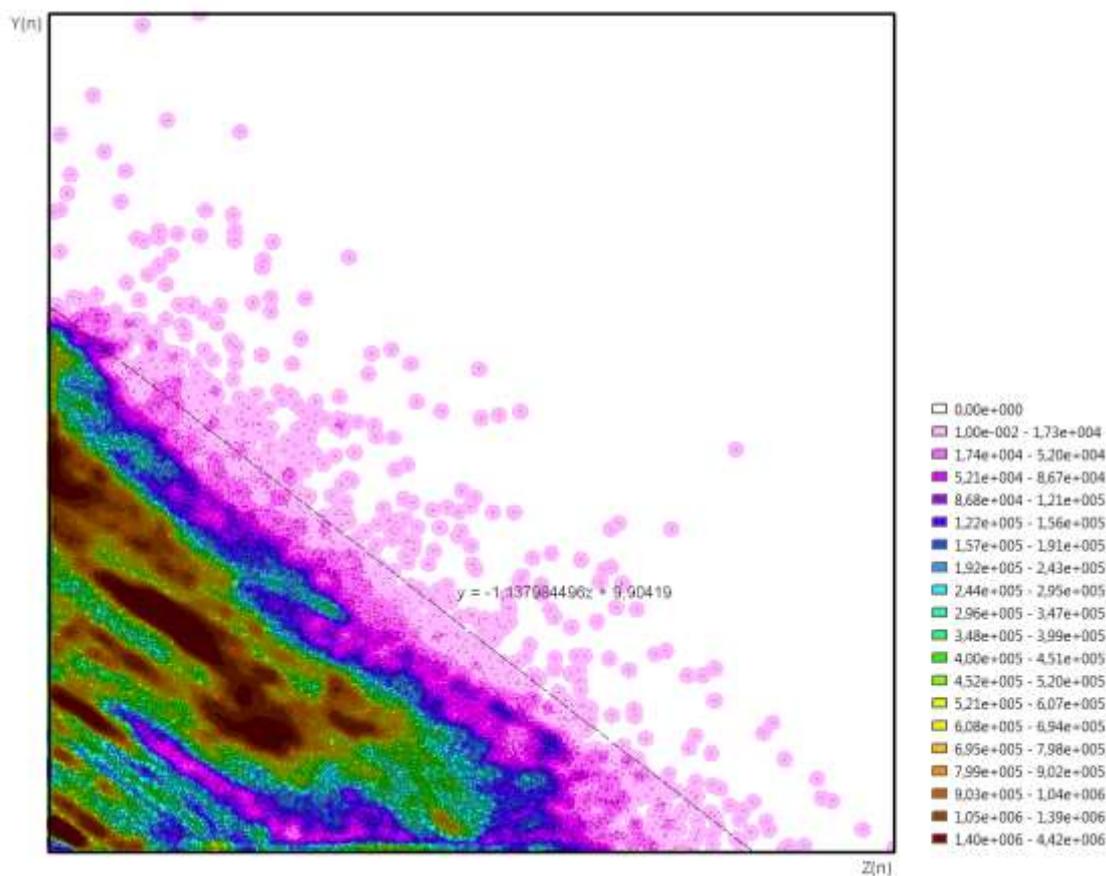


Figura 60. Densidad de puntos calado vs cota normalizados y función de ajuste gráfico, representando que el 99.85% de los resultados están bajo la línea. Obsérvese la no correlación entre calado y cota al mismo tiempo que la tendencia negativa lógica de calado vs cota.



Figura 61. Mapa de susceptibilidad a los tsunamis obtenido en el presente estudio.

Otras simulaciones

Fuentes suministradas por la Red Sísmica de Puerto Rico

En primer lugar se presentan brevemente los resultados numéricos obtenidos para tres fuentes suministradas por el Dr. Víctor Huérfano (Red Sísmica de Puerto Rico). Estas tres fuentes están definidas por los mismos parámetros de Okada (salvo una pequeña variación en el strike), diferenciándose en la localización del epicentro. Los valores máximo y mínimo para la deformación del fondo y, por tanto, para la elevación inicial de la superficie libre del mar que se generan son de 0,886 y -0,711 metros en los tres casos.

Fuente 1 (A. Mercado)

Esta fuente está definida por los siguientes parámetros:

Localización del epicentro: Lat: 18,05°; Lon: -69,37°

Strike: 282°; Dip: 11°; Rake: 90°; Longitud: 150 km; Anchura: 75 km; Slip: 3,5 m; Profundidad: 4 km.

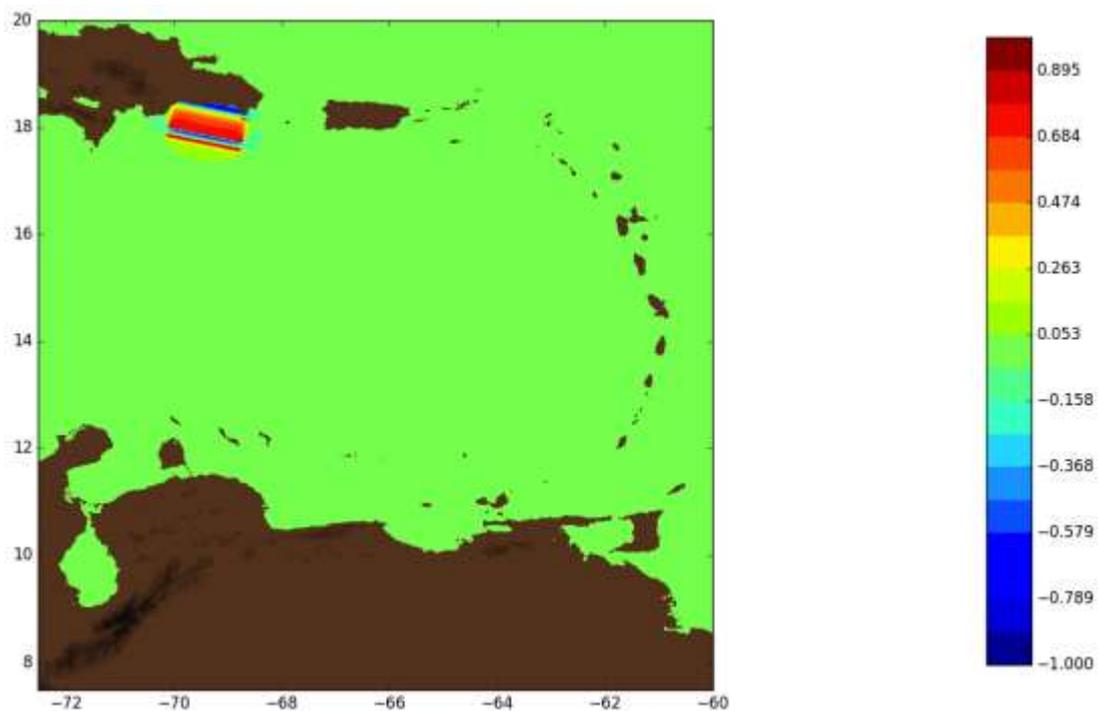


Figura 62. Condición inicial para la fuente local 1 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

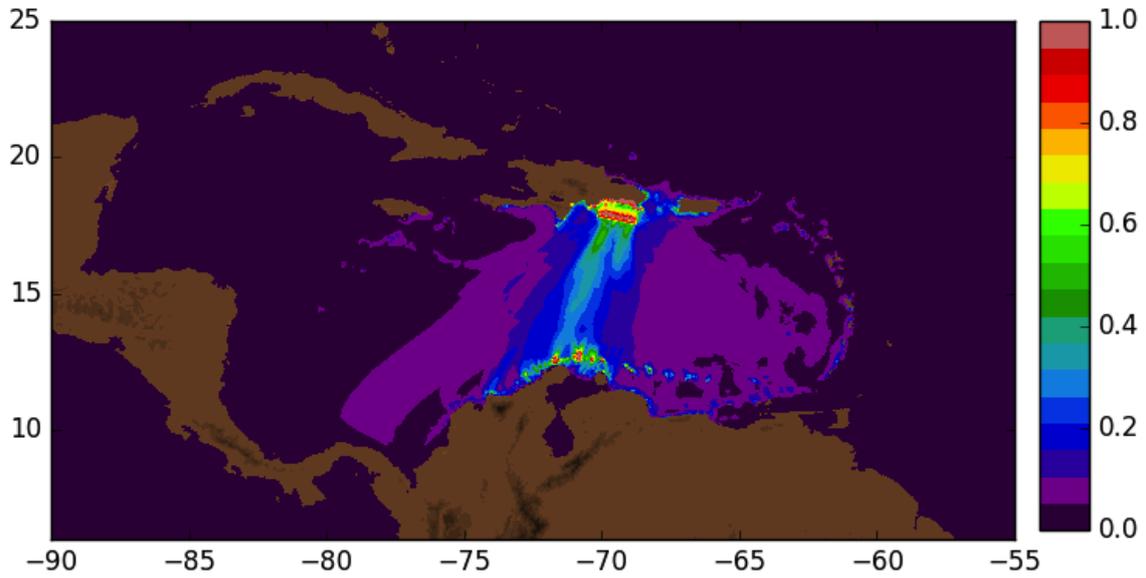


Figura 63. Elevación máxima de la superficie para la fuente local 1 proporcionada por el Dr. V. Huérfano.

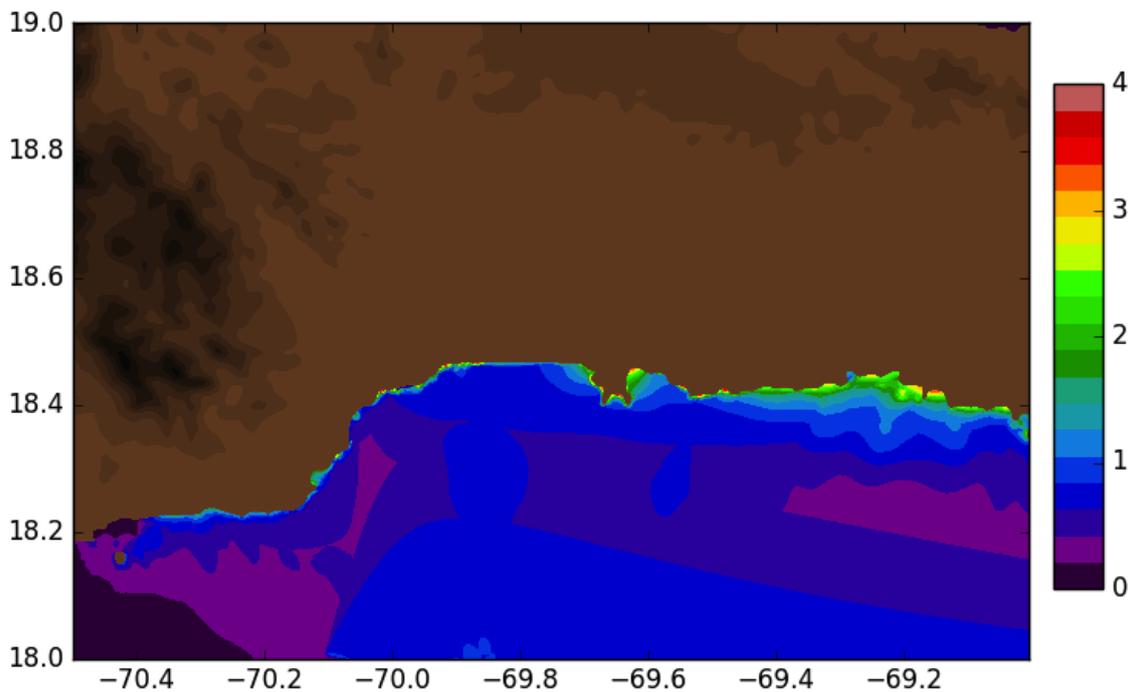


Figura 64. Elevación máxima de la superficie del mar en la franja costera del Gran Santo Domingo para la fuente local 1 proporcionada por el Dr. V. Huérfano.

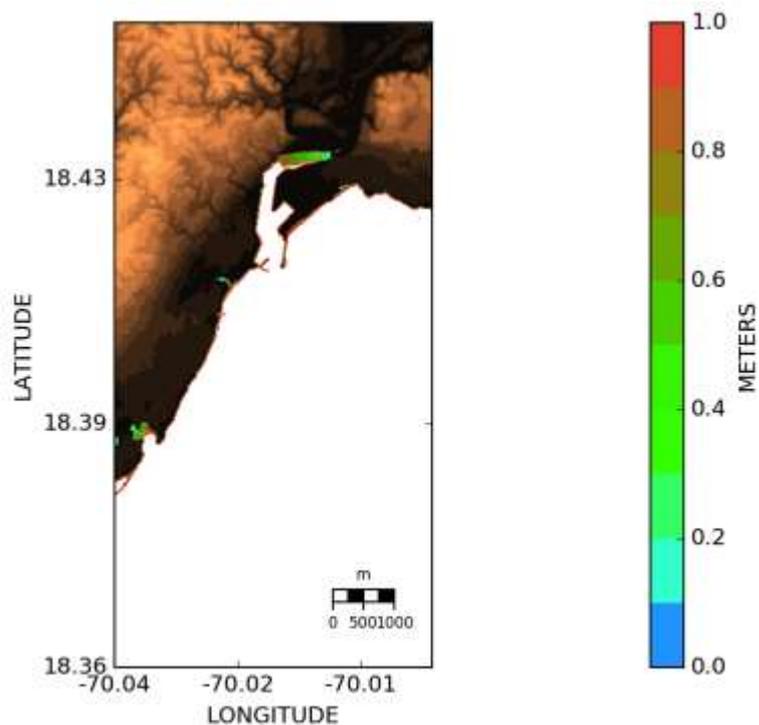


Figura 65. Área inundada y altura máxima de agua en la zona de San Gregorio de Nigua y Bajos de Haina para la fuente proporcionada por el Dr. V. Huérfano.

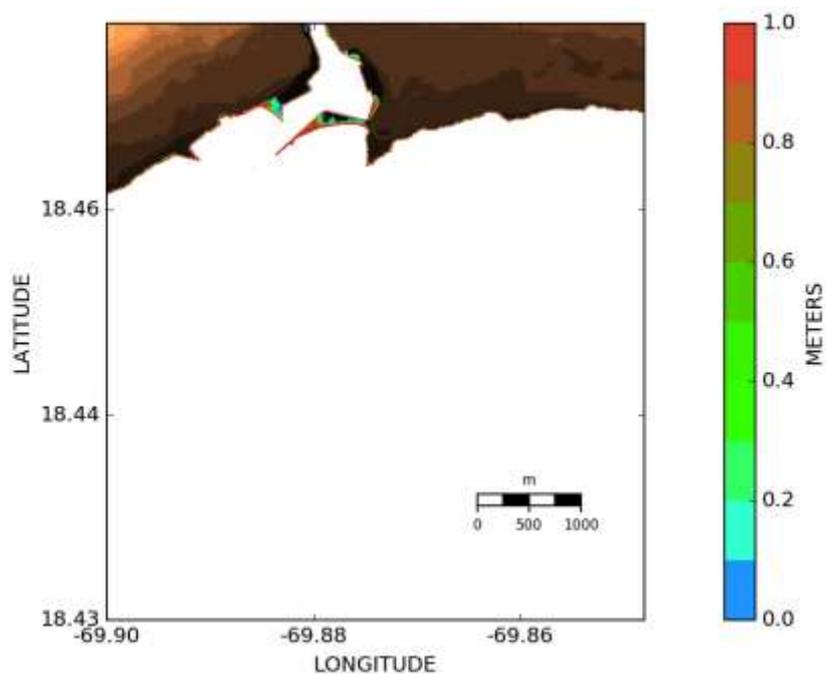


Figura 66. Área inundada y altura máxima de agua en la zona de la desembocadura del río Ozama para la fuente proporcionada por el Dr. V. Huérfano.

Fuente 2. (Manaken et al.)

Esta fuente está definida por los siguientes parámetros:

Localización del epicentro: Lat: 17,4075°; Lon: -69,1713° .

Strike: 282°; Dip: 11°; Rake: 90°; Longitud: 150 km; Anchura: 75 km; Slip: 3.5 m;
Profundidad: 5 km.

En este caso, los resultados numéricos obtenidos son muy parecidos a los mostrados para el escenario anterior, por lo que no se han generado figuras.

Fuente 3. Modelo Híbrido

Esta fuente está definida por los siguientes parámetros:

Localización del epicentro: Lat: 17,6735°; Lon: -69,6613°

Strike: 290°; Dip: 11°; Rake: 90°; Longitud: 150 km; Anchura: 75 km; Slip: 3.5 m;
Profundidad: 5 km.

Los resultados se pueden observar desde la Figura 67 hasta la Figura 71.

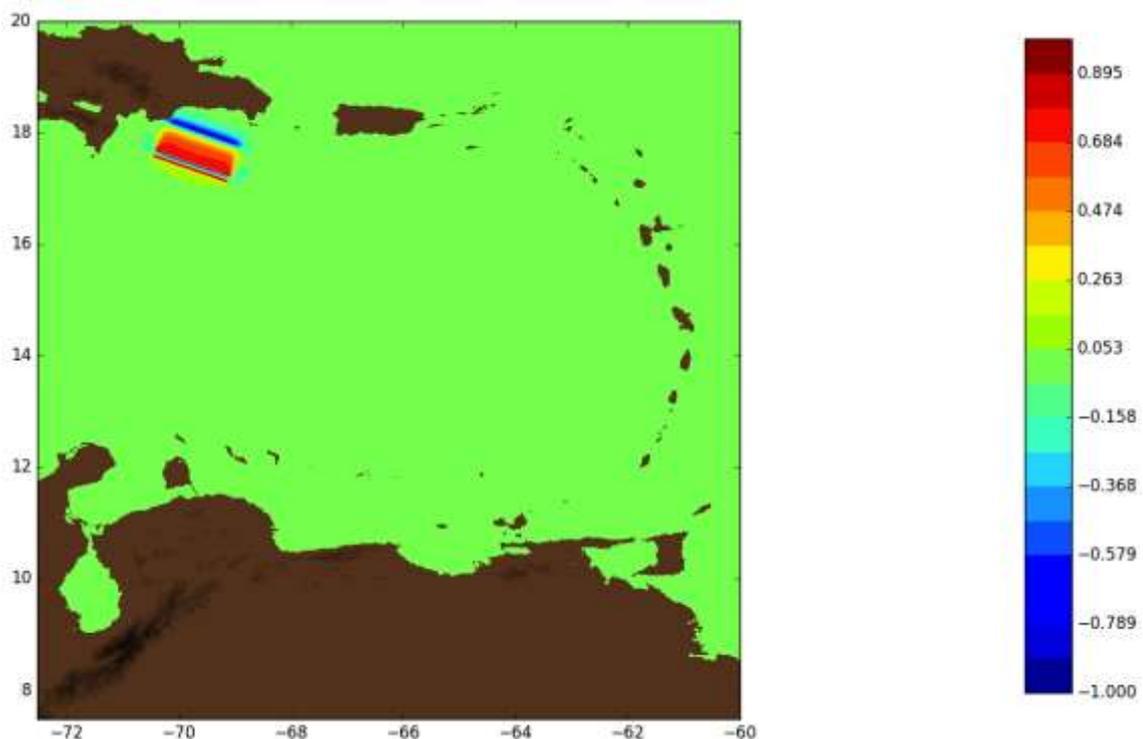


Figura 67. Condición inicial para la fuente local 3 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

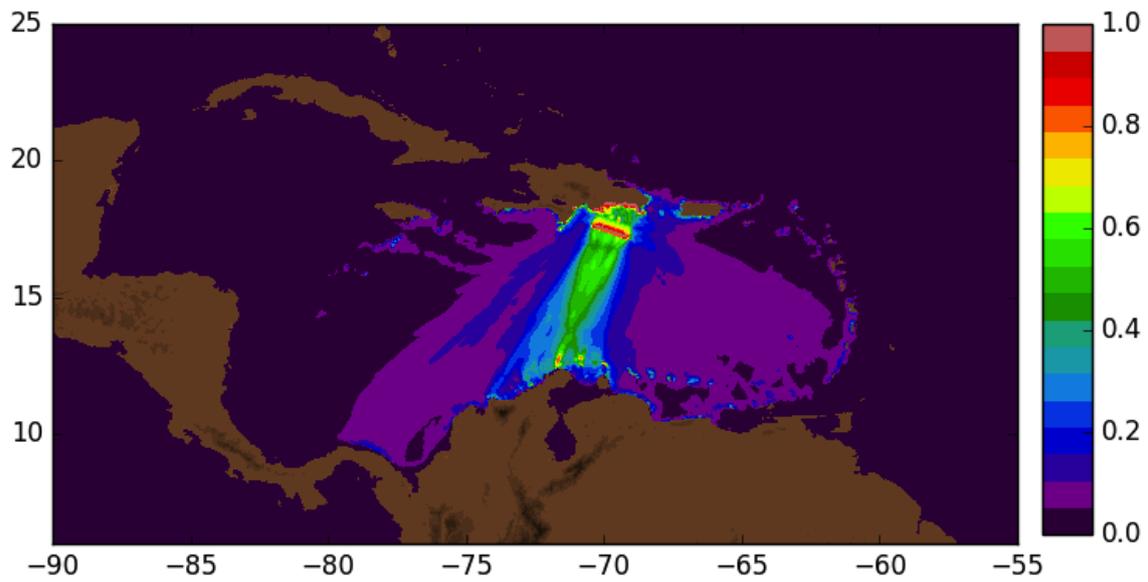


Figura 68. Máxima altura de ola a lo largo de la simulación para la fuente local 3 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

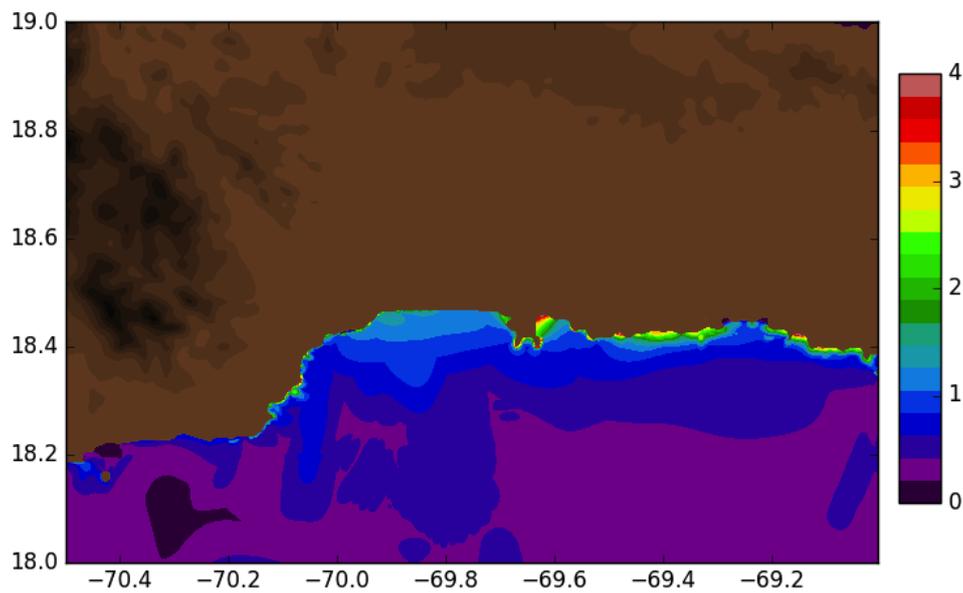


Figura 69. Amplitudes máximas en costa para la fuente local 3 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

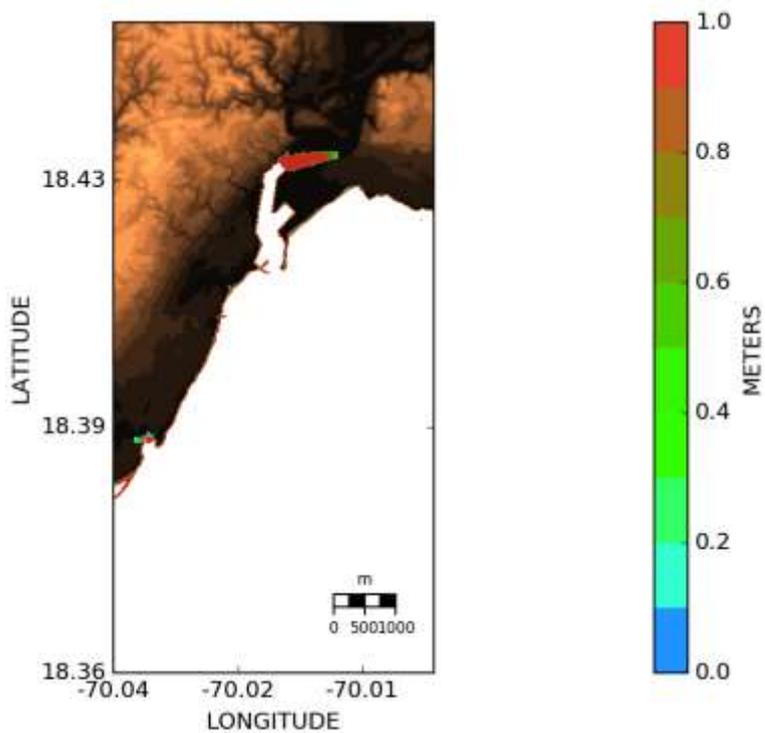


Figura 70. Inundación en la zona de San Gregorio de Nigua y Bajos de Haina para la fuente local 3 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

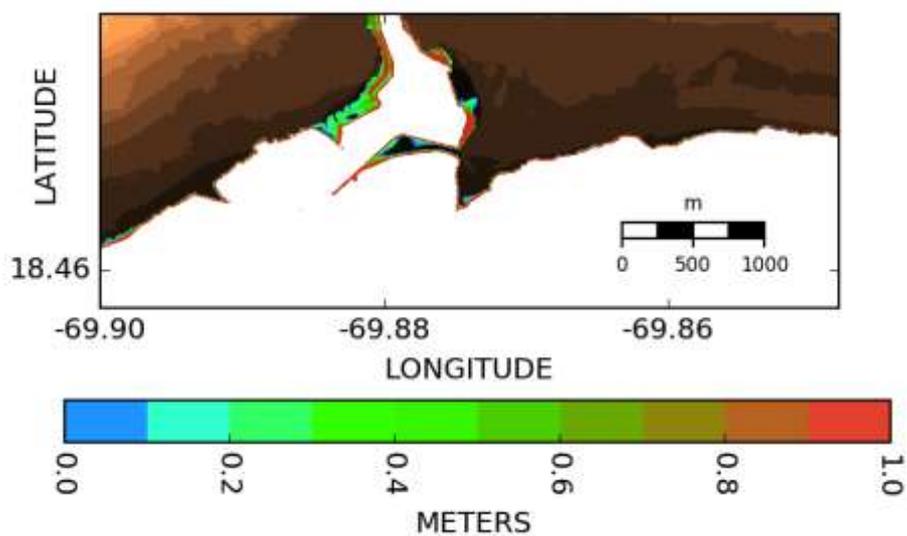


Figura 71. Inundación en la desembocadura del Río Ozama para la fuente local 3 proporcionada por el Dr. Víctor Huérfano.

Escenario regional (Venezuela, LANTEX 2016)

Este escenario es una de las fuentes que se propone en el ejercicio LANTEX 2016. Consiste en la ruptura de dos segmentos de falla en el Caribe suroriental con su epicentro localizado a 15 km de profundidad y una magnitud de 8,4 Mw. Los parámetros de Okada que definen la deformación para cada uno de estos dos segmentos se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de Okada para cada uno de los segmentos que componen la falla de la fuente regional (escenario de Venezuela, LANTEX 2016). El dato de longitud original y el aquí mostrado es incorrecto, pero se ha mantenido así para la simulación.

	Latitud	Longitud	Prof (km)	Strike	Dip	Rake	Slip (m)	Long (km)	Anchura (km)
1	10°39'21"''	65°16'14"''	15	97°	50°	90°	8	20	60
2	10°45'34"''	66°42'14"''	15	90°	50°	90°	8	20	60

En la Figura 72 y en la Figura 73 se muestra la perturbación inicial que produce la deformación del fondo, de forma instantánea, en la superficie del mar al producirse la ruptura de la falla para este escenario. La Figura 74 presenta las elevaciones máximas de la onda que se simula y en la Figura 75 se muestran los tiempos de llegada de esa onda de máxima amplitud.

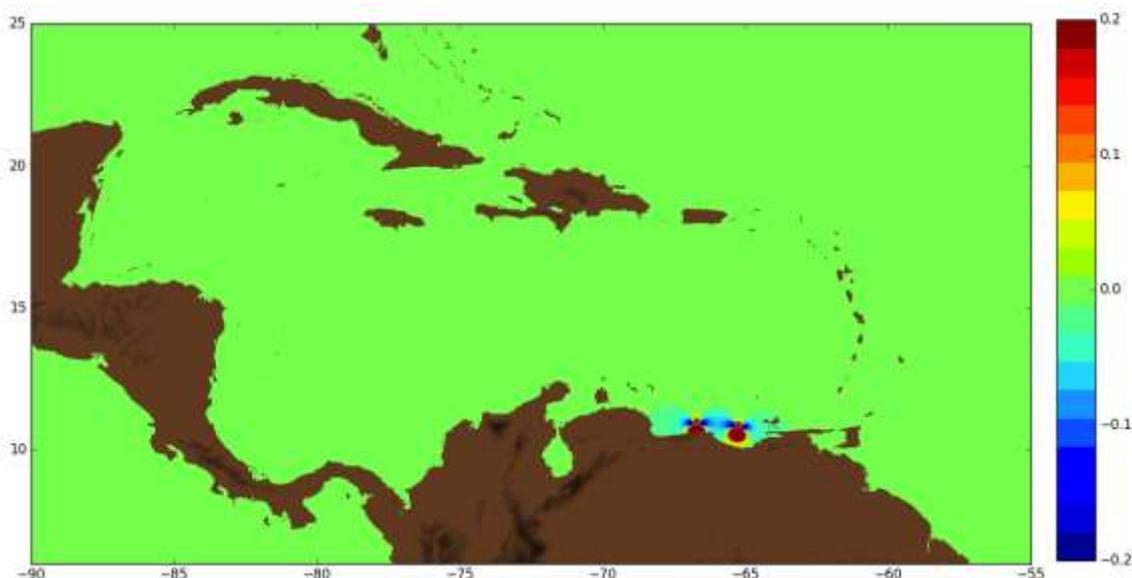


Figura 72. Perturbación inicial de la superficie de la mar producida por la deformación del fondo (escenario de Venezuela, LANTEX 2016).

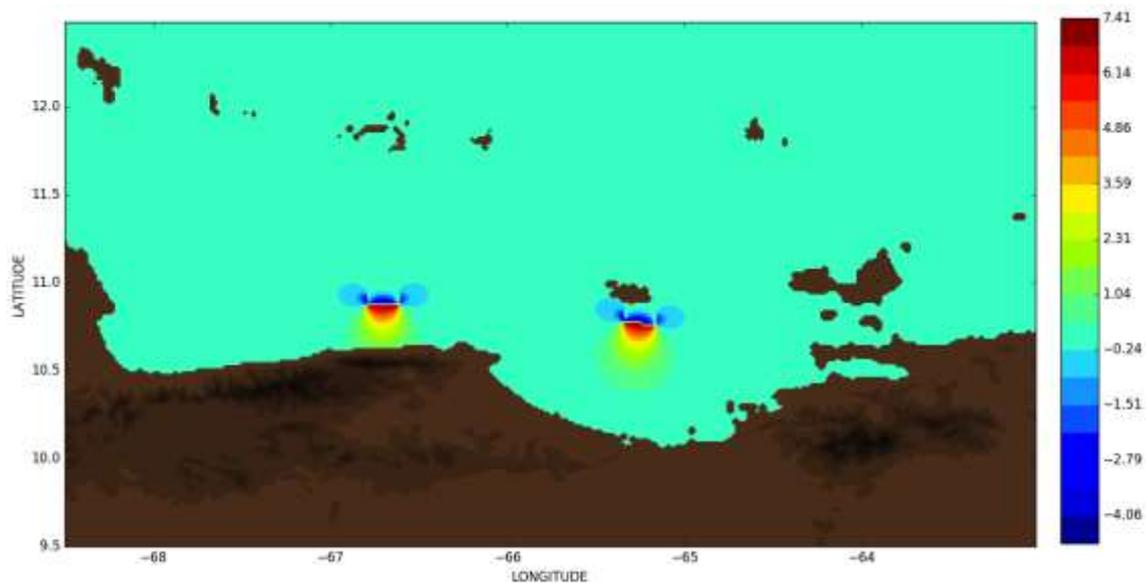


Figura 73. Imagen ampliada de la deformación inicial en el área de más próxima al foco. Elevación máxima: +7,415 m, mínima: -4,965 m.

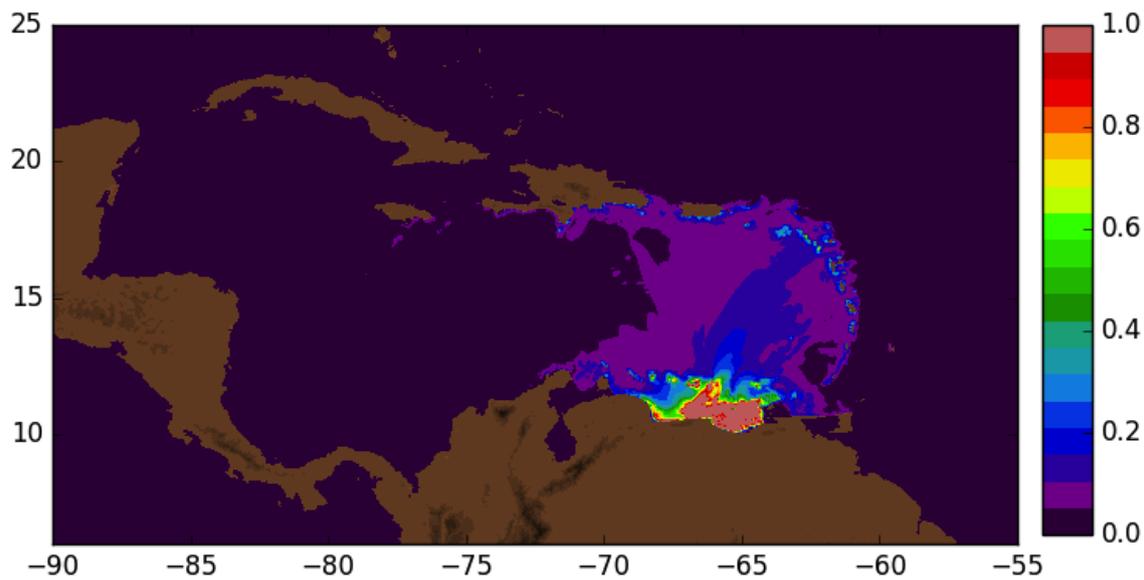


Figura 74. Elevaciones máximas para el escenario de Venezuela (LANTEX 2016).

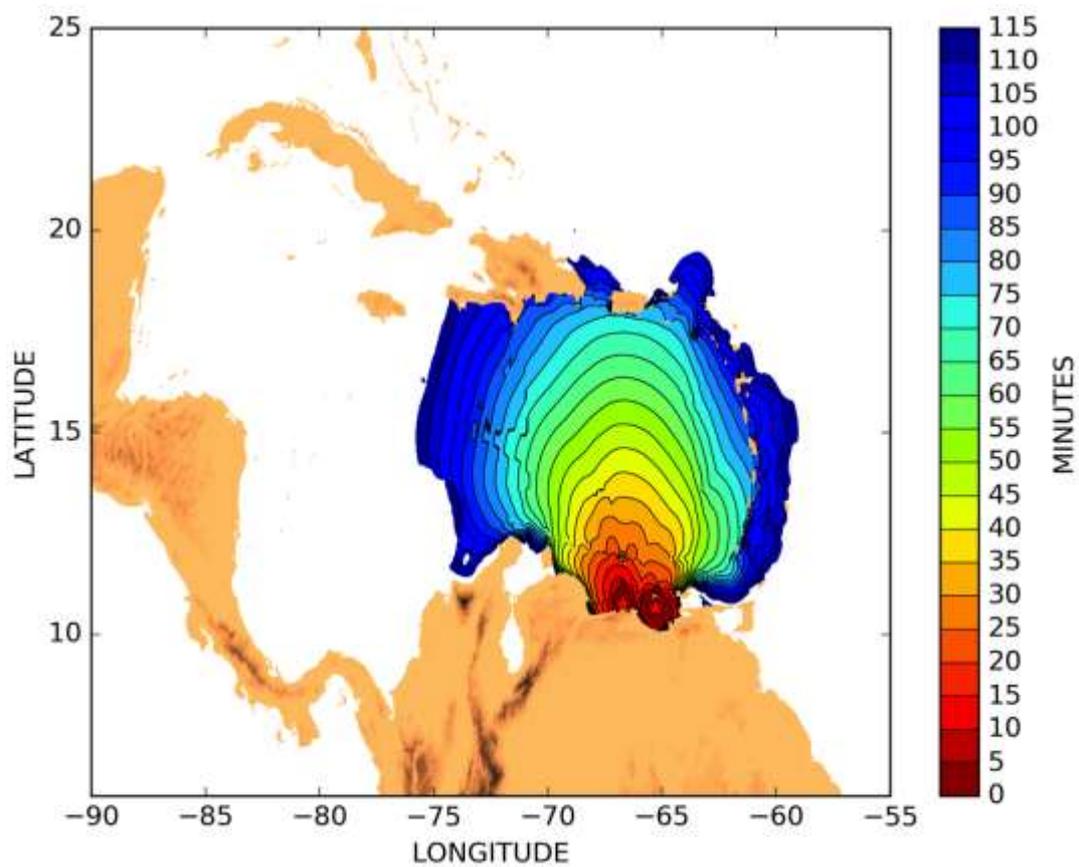


Figura 75. Tiempos de llegada de la onda de amplitud máxima para el escenario de Venezuela (LANTEX 2016).



Referencias

- Asunción, M.; Mantas, J.M.; Castro, M.J. (2011): Simulation of one-layer shallow water systems on multicore and CUDA architectures. *J. Supercomput.*, 58:206-214.
- Ayala, F. J. (1987): Introducción a los riesgos geológicos. En Ayala, F.J. (ed.): *Riesgos Geológicos*. IGME, Serie Geología Ambiental. Madrid, España, pp. 3–19.
- Bertil, D.; Belvaux, M.; Bretaudeau, F. y Bautista, J. (2015): Análisis de las fuentes sísmicas y evaluación de la amenaza sísmica regional del gran Santo Domingo. Informe del BRGM inédito.
- Bertil, D.; Lemoine, A.; Winter, T.; Belvaux, M. (2010): Microzonificación sísmica de Santiago - República Dominicana Amenaza regional. Informe final. BRGM/RC-59107-FR, 100 p.
- Castro M.J.; Fernández-Nieto E.D.; Ferreiro A.M.; García Rodríguez J.A.; Parés C. (2009): High order extensions of Roe schemes for two-dimensional non-conservative hyperbolic systems. *J. Sci. Comput.*, 39(1):67-114.
- Castro, M.; González, J.M.; Parés, C. (2006): Numerical treatment of wet/dry fronts in shallow flows with a modified Roe scheme. *Math. Mod. Meth. App. Sci.*, 16(6):897-931.
- Castro, M.J., de la Asunción, M.; Macías, J.; Parés, C.; Fernández-Nieto, E.D.; González-Vida, J.M.; Morales, T. (2012): IFCP Riemann solver: Application to tsunami modelling using GPUs. In E. Vázquez, A. Hidalgo, P. García, L. Cea eds. CRC Press. Chapter 5, 237-244.
- Castro, M.J.; Chacón, T.; Fernández-Nieto, E.D.; González-Vida, J.M.; Parés, C. (2008): Well-balanced finite volume schemes for 2D non-homogeneous hyperbolic systems. Applications to the dam break of Aznalcóllar. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 197(45):3932-3950.
- Castro, M.J.; Fernández-Nieto; E. D. (2012): A class of computationally fast first order finite volume solvers: PVM methods. *SIAM J. Sci. Comput.*, 34:A2173-2196.
- Castro, M.J.; Ferreiro, A.; García, J.A.; González, J.M.; Macías, J.; Parés, C.; Vázquez, M.E. (2005): On the numerical treatment of wet/dry fronts in shallow flows: Applications to one-layer and two-layer systems. *Math. Comp. Model.* 42 (3-4): 419-439.
- Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; Macías, J. (2014a): Numerical schemes for SW equations aimed for tsunami simulations in the perspective of TEWS. Poster presented at TsuMaMoS 2013 conference. April 2013, Málaga, Spain. https://www.researchgate.net/publication/261696609_Numerical_schemes_for_SW_equations_aimed_for_tsunami_simulations_in_the_perspective_of_TEWS
- Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; Macías, J.; de la Asunción, M.; Molinari, I.; Melini, D.; Romano, F.; Tonini, R.; Lorito, S.; Piatanesi, A. (2014b): HySEA-tsunami model: A GPU implementation for the Italian TEWS. In *Proceedings of Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics*. Rome (Italy), 15-17 September 2014.
- Castro, M.J.; Ortega, S.; Asunción, M.; Mantas, J.M.; Gallardo, J.M. (2011): GPU computing for shallow water flow simulation based on finite volume schemes. *Comptes Rendus Mécanique*, 339:165-184.
- Corominas J. (2004): Tipos de rotura en laderas y taludes. En López-Jimeno, C. (Ed): *Ingeniería del terreno (Ingeo Terr 4)*. ETSI Minas – Universidad Politécnica de Madrid. 447 pp.



- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996): Landslide Types and Processes, Special Report , Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75
- De la Asunción, M.; Castro, M.J.; Fernández-Nieto, E.D.; Mantas, J.M.; Ortega, S.; González-Vida, J. M. (2013): Efficient GPU implementation of a two waves TVD-WAF method for the two-dimensional one layer shallow water system on structured meshes. *Computers & Fluids*, 80:441-452.
- De la Asunción, M.; Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; Macías, J.; Ortega-Acosta, S.; Sánchez-Linares, C. (2013); “East Coast Non-Seismic Tsunamis: A first landslide approach”. The memorandum can be downloaded at: https://www.researchgate.net/publication/265250441_East_Coast_Non-Seismic_Tsunamis_A_first_landslide_approach?ev=prf_pub
- DeGraff, J.V. (1978): Regional Landslide Evaluation: Two Utah Examples. En: *Environmental Geology*, vol. 2, pp. 203-214.
- DeMets, C.; Jansma, P.; Mattioli, G.; Dixon, T.; Farina, F.; Bilham, R.; Calais, E.; Mann, P. (2000): GPS geodetic constraints on the Caribbean-North America plate motion. *Geophysical Research Letters*, 27, pp. 437-440.
- Díaz de Neira, J.A. y Hernaiz Huerta, P.P. (2004): Mapa Geológico de la Hoja a E. 1:50.000 n° 6272-I (Antón Sánchez) y Memoria correspondiente. Proyecto de Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Programa SYSMIN, Proyecto L. Dirección General de Minería, Santo Domingo.
- EDANYA Group (2015): Validation and verification of HySEA tsunami model. In progress.
- FAO (2016): Información climática de la República Dominicana (fecha de última visita: 2016). URL: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/dom/printesp1.stm.
- Fernández, E.D.; Bouchut, F.; Bresh, D.; Castro, M.J.; Mangeney, A. (2008): A new Savage-Hutter type model for submarine avalanches and generated tsunami. *J. Comp. Phys.*, 227: 7720-7754.
- Fernández, T.; Irigaray, C.; El Hamdouni, R. y Chacón, J. (2003): Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesas Area (Granada, Spain). *Natural Hazards* 30: 297–308, 2003. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Fernández, T.; Jiménez, J.; Delgado, J.; Cardenal, J.; Pérez, J.L.; El Hamdouni, R.; Irigaray, C y Chacón, J. (2013): Methodology for Landslide Susceptibility and Hazard Mapping Using GIS and SDI. En Zlatanova S. et al. (eds.): *Intelligent Systems for Crisis Management, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, DOI: 10.1007/978-3-642-33218-0_14. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Fritz, H.M.; Hager, W.H.; Minor, H.-E. (2001): Lituya Bay case: Rockslide impact and wave run-up. *Science of Tsunami Hazards*, 19(1):3-22.
- Gallardo, J.M.; Ortega, S.; de la Asunción, M.; Mantas, J.M. (2011): Two-dimensional compact third-order polynomial reconstructions. Solving non-conservative hyperbolic systems using GPUs. *J. Sci. Comput.*, 48:141-163.



- Gallardo, J.M.; Parés, C.; Castro, M. (2007): On a well-balanced high-order finite volume scheme for shallow water equations with topography and dry areas. *J. Comp. Phys.*, 227:574-601.
- García-Yagüe, A. y García-Álvarez, J. (1988): Grandes deslizamientos españoles. II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables. Andorra la Vella. pp 599-612.
- González Vallejo, L. (2005): Ingeniería Geológica. Ed. Pearson. 744pp. ISBN: 9788420531045.
- González-Vida, J.M.; de la Asunción, M.; Castro, M.J.; Macías, J.; Ortega, S.; Sánchez-Linares, C.; Arcas, D.; Titov, V. (2013): HySEA-Landslide GPU-based model: Validation to the 1958 Lituya Bay mega-tsunami. International Tsunami Symposium (ITS2013). Göcek (Turkey) 25-28 September 2013.
- González-Vida, J.M.; Macías, J.; Castro, M.J.; Sánchez-Linares, C.; de la Asunción, M.; Ortega, S.; (2015a): The Lituya Bay landslide-generated mega-tsunami. Numerical simulation and sensitivity analysis. In progress. A preliminary version of this work can be found at: https://www.researchgate.net/publication/265250059_The_Lituya_Bay_landslide-generated_mega-tsunami_Numerical_simulation_and_sensitivity_analysis#share
- González-Vida, J.M.; Macías, J.; Ortega, S.; Castro, M.J. (2015b): Modelling propagation and inundation of the March 2011 Tohoku tsunami with the tsunami-HySEA model. In progress.
- Gottlieb S.; Shu C.W. (1998): Total variation diminishing Runge-Kutta schemes. *Math. Comp.*, 67: 73-85.
- Griffiths J.S. (2002): Mapping in Engineering Geology. Geological Society of London. 287 páginas. ISBN: 1-86239-101-7.
- Harder, L.F., Jr. (1988): Use of penetration tests to determine the liquefaction potential of soils during earthquake shaking. Tesis Doctoral, University of California, Berkeley.
- Harder, L.F., Jr. (1988): *Use of penetration tests to determine the liquefaction potential of soils during earthquake shaking*. Tesis Doctoral, University of California, Berkeley.
- Heller, V. y Hager, W.H. (2011): Waves types of landslide generated impulse waves. *Ocean Eng.*, 38(4):630-640.
- Hoek, E. y Bray, J. (1974): Rock slope engineering. Institution of Mining and Metallurgy, 309 pp.
- Hungr, O.; Evans, S.G.; Bovis, M.; y Hutchinson, J.N. (2001): Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, v. VII, p. 221-238.
- Hutchinson, J.N. (1988): General report, morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En Bonnard, C. (ed): *Proceedings, 5th Int. Symp. on Landsl.* AA Balkema, Rotterdam, Vol 1, pp. 3-36
- Hutchinson, J.N. (1988): General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proc 5th Int. Symp. Landslides (Lausanne)*, 1: 353-358.



- Iglesias, O.; Lastras, G.; Macías, J.; González-Vida, J.M.; Casamor, J.L.; Costa, S.; Canals, M. (2015): Analysis of the tsunamigenic potential of four submarine landslides located on the Ibiza Channel, Western Mediterranean Sea. In progress.
- Kazolea, M.; Delis, A.I.; Synolakis, C.E. (2014): Numerical treatment of wave breaking on unstructured finite volume approximations for extended Boussinesq-type equations. *J. Comp. Phys.*, 271:281-305.
- Keaton J.R. y DeGraff J.V. (1996): Surface observations and geologic mapping. En Turner A.K. y Schuster, R. L. (Eds): *Landslides, investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247, 178-230. National Academy Press. Washington DC.
- Llorente, M. (2016a): Memoria de los trabajos geotécnicos del proyecto “estudio de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad física del Gran Santo Domingo”. Informe inédito. 1.382 pp.
- Llorente, M. (2016b): Memoria de los trabajos geológicos del proyecto “estudio de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad física del Gran Santo Domingo”. Informe inédito. 348 pp.
- Lopera, E. (Dir. 2011): Mapa de Peligrosidad Sísmica de Santiago de los Caballeros, República Dominicana. Comisión Europea, DIGECOOM, IGME, BRGM, INYPSA.
- Macías, J. (2014): Tsunami Numerical Simulations: HySEA model. A GPU approach to tsunami modeling and case studies. Experts Meeting Workshop on Tsunami Modeling and Mitigation. Cartagena de Indias (Colombia), 1-3 December, 2014. https://www.researchgate.net/publication/269991081_Tsunami_Numerical_Simulations_HySEA_model_A_GPU_approach_to_tsunami_modeling_and_case_studies
- Macías, J.; Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; de la Asunción, M.; Ortega, S. (2014). HySEA: An operational GPU-based model for Tsunami Early Warning Systems. EGU 2014.
- Macías, J.; Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; Ortega, S. (2013a): Non-linear Shallow Water Models for coastal run-up simulations. EGU 2013.
- Macías, J.; Castro, M.J.; González-Vida, J.M.; Ortega, S.; de la Asunción, M. (2013b): HySEA-Tsunami GPU-based model. Application to FTRT simulations. International Tsunami Symposium (ITS2013). Göcek (Turkey). 25-28 September 2013.
- Macías, J.; González-Vida, J.M.; Mercado, A.; Ortega, S.; Castro, M.J. (2015): Comparison and computational performance of Tsunami-HySEA and MOST models for LANTEX 2013 scenario. Impact assessment in Puerto Rico Coasts
- Macías, J.; Vázquez, J.T.; Fernández-Salas, L.M.; González-Vida, J.M.; Bárcenas, P.; Castro, M.J.; Díaz-del-Río, V.; Alonso, B. (2015): The Al-Boraní submarine landslide and associated tsunamis. A modelling approach. *Marine Geology*, 361:79-95. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.12.006.
- Madsen P.A.; Sorensen O.R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowing varying bathymetry. *Coast. Eng.*, 18: 183-204.
- Manaker, D.M.; Calais, E.; Freed, A.M.; Ali, S.T.; Przybylski, P.; Mattioli, G.; Jansma, P.; Prépétit an De Chaballier, J.B. (2008): Interseismic plate coupling and strain partitioning in the Northeastern Caribbean. *Geophys J. Int.*, 174, pp. 889-903.



- Mann, P.; Burke, K.; Matumoto, T. (1984): Neotectonics of Hispaniola: plate motion, sedimentation, and seismicity at a restraining bed. *Earth and Planetary Science Letters*, 70, pp. 311-324.
- Marquina A. (1994): Local piecewise hyperbolic reconstructions for nonlinear scalar conservation laws, *SIAM J. Sci. Comput.*, 15:892-915.
- Millán, A. (2014): Estudio y validación de un modelo de volúmenes finitos TVD-WAF 2D de aguas someras para la simulación de tsunamis. Universidad de Málaga. 101 pp.
- National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7. <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=7&d=7>
- Okada Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 75(4):1135-1154.
- Olcina J. y Ayala, F.J. (2002): Riesgos Naturales. Grupo Planeta (GBS), 2002 - 1512 páginas. ISBN: 9788434480346.
- Ryan, W.B.F.; Carbotte, S.M.; Coplan, J.O.; O'Hara, S.; Melkonian, A.; Arko, R.; Weissel, R.A.; Ferrini, V.; Goodwillie, A.; Nitsche, F.; Bonczkowski, J. y Zensky R. (2009): Global Multi-Resolution Topography synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332. Disponible desde la URL <http://nctr.pmel.noaa.gov/model.html>.
- Sánchez-Linares, C. (2011): Simulación numérica de tsunamis generados por avalanchas submarinas: aplicación al caso de Lituya-Bay. Master report, 87 pages. <http://hdl.handle.net/10630/7702>
- Seed, H.B. e Idriss I.M. (1971): Simplified procedures for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 97, n° SM9, pp 1249-1273.
- Sharpe (1938): Landslides and related phenomena. *Am J Sci June 1, 1938 Series 5 Vol. 35:455-457*; doi:10.2475/ajs.s5-35.210.455.
- Shi, F.; Kirby, J.T.; Harris, J.C.; Geiman, J.D.; Grilli, S.T. (2012): A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation, *Ocean Model.*, 43-44:36-51.
- Skempton, A.W y Hutchinson, J. N. (1969): State of the Art Report. Stability of natural slopes and embankment foundations. *Proc. 7th Int. Conf. Mech. & Found. Engrg. Mexico*. pp. 291-340.
- SODOSISMICA (2010): Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras. Versión final, 2010.
- Soeters, R. y van Westen, C.J. (1996): Slope instability recognition, analysis, and zonation. In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds), *Landslides—Investigation and Mitigation*: 129-177. Washington, D.C.: National Academy Press. National Research Council. Transportation Research Board Special Report 247.
- Synolakis, C.E.; Bernard, E.N.; Titov, V.V.; Kánoğlu, U.; González, F. I. (2008): Validation and verification of tsunami numerical models, *Pure Appl. Geophys.*, 165(11–12):2197–2228.



- TC4-ISSMGE (1999): Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard. Revised edition, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Japón.
- Tonelli, M.; Petti, M. (2009): Hybrid finite-volume finite-difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations, *Coast. Eng.*, 56:609-620.
- Tuttle, M.P.; Prentice, C.S.; Dyer-Williams, K; Pefra, L.R. y Burr G. (2003): Late Holocene Liquefaction Features in the Dominican Republic: A Powerful Tool for Earthquake Hazard Assessment in the Northeastern Caribbean. *Bulletin of the seismological Society of America*, Vol. 93, No. I, pp.27-46.
- Van Leer, B. (1979): Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method. *Com. Phys.*, 32:101-136.
- Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslides—Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176*, p. 11–33.
- Wakamatsu, K. (1992): Evaluation of Liquefaction Susceptibility based on Detailed Geomorphological Classification. *Proceedings, Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Vol.B, pp.1443-1444, 1992.
- WP/WLI (1993): *Multilingual Landslide Glossary*. International Geotechnical Societies; UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. BiTech Publishers Ltd.
- Youd, T.L. e Idriss, I.M. (Eds) (1997): *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. Salt Lake City, UT, January 5-6, 1996, NCEER Technical Report NCEER-97-0022, Buffalo, N.Y.
- Youd, T.L. y Perkins, D.M. (1978): Mapping of Liquefaction Induced Ground Failure Potential. *J. GED, ASCE*, Vol.104, No.4, pp.433-446.



ANEXO I – Mapa de susceptibilidad a tsunamis