

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Geología

**Caracterización geológica de sitios susceptibles ante erosión costera en el tramo
Carrillo-Ostional de la Ruta Nacional No. 160**

Realizado por:

Erick Aragón Valle

Febrero 2019

Proyecto de graduación sometido a revisión y aceptado por el Tribunal del Trabajo

Final de Graduación como requisito para optar por el grado académico de

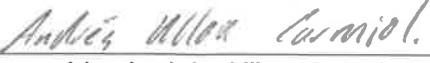
Licenciatura en Geología.


Dr. Mauricio Mora Fernández
Presidente del Tribunal


PhD. Paulo Ruiz Cubillo
Director de Tesis


PhD. Guaria Cárdenes Sandí
Co-directora


Msc. Ronald Naranjo Ureña
Co-director


Lic. Andrés Ulloa Carniol
Miembro del Tribunal


Erick Aragón Valle
Candidato

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y amigos por siempre brindarme buenos momentos, creer en mis sueños y apoyarme de todas las maneras posibles.

Agradecimientos

Este trabajo es la materialización del esfuerzo de muchas personas que me acompañaron durante su elaboración.

En primera instancia quiero agradecer al director de este proyecto de graduación Paulo Ruiz Cubillo y a los codirectores Guaria Cárdenes Sandí y Ronald Naranjo Ureña, por el tiempo y dedicación brindados para discutir, corregir y darle sentido a este trabajo; además por su valiosa ayuda en el trabajo de campo, motivación a lo largo del proceso y en general por todo el apoyo brindado.

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos estructurales por el tema de trabajo y por la facilidad en el uso de sus laboratorios e instalaciones para llevar a cabo este proyecto.

A mi familia, que siempre ha creído en mis sueños y ha sido una sólida base en mi formación como profesional y como persona, en especial a mi madre que siempre ha confiado en mí y me ha apoyado en todo.

A mis amigos que siempre se han encargado de brindarme buenos momentos.

A Lucynia Moscoso, quien siempre me ha motivado a salir adelante mediante el estudio y desinteresadamente ha abierto las puertas de su casa para mí en todo momento.

Agradecimiento especial a Safari Surf School por ser mi sustento económico durante la elaboración de este trabajo y por brindarme experiencias muy importantes para mi vida.

Agradezco a todos los profesores, personal y compañeros de la Escuela Centroamericana de Geología por todo el conocimiento, sugerencias y ayuda brindados durante toda la carrera.

Muchas gracias a mi prima Kimberly Baltodano y los colegas de topografía Randall Poveda y Ronald Víquez por la colaboración brindada para la elaboración de los escenarios de elevación del nivel del mar.

En fin, a cada una de las personas de una u otra manera aportaron para que este proyecto fuese una realidad.

Índice de contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Abreviaturas.....	x
CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Alcances y limitantes	6
1.4 Importancia de este estudio	8
1.5 Objetivos	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos	11
1.6 Ubicación de la zona de estudio	11
1.7 Definición de zona de estudio y sitios de interés	13
CAPÍTULO II.....	15
2. Marco teórico.....	15
2.1 Elevación del nivel del mar y naturaleza de la erosión costera	15
2.2 Geología del área de estudio	24
2.3 Información acerca de la RN-160	34
CAPÍTULO III.....	37
3. Geomorfología.....	37
3.1 Relevancia de la geomorfología para el estudio	37
3.2 Uso de datos cartográficos y LiDAR	38
3.3 Aspectos generales de la geomorfología en la zona de estudio	40
3.4 Clima	40
3.5 Hidrografía	42
3.6 Unidades geomorfológicas	43
3.7 Mapas geomorfológicos	55
CAPÍTULO IV.....	56
4. Metodología para la determinación de los procesos de erosión costera.....	56
4.1 Diagnóstico de la erosión utilizando el Índice de Erosión-Sedimentación Costera	57
4.1.1 Aplicación del IE-SC	59
4.1.2 Criterios para la definición de niveles	60

4.2 Susceptibilidad de zonas costeras ante la erosión	62
4.2.1 Antecedentes.....	62
4.2.2 Procedimiento para crear los mapas de susceptibilidad	63
4.2.3 Fuentes de los datos de entrada	70
4.2.4 Matriz de clasificación de la susceptibilidad ante erosión costera	71
4.2.5 Parámetros	72
4.2.6 Parámetro de geología: Utilización de la Máquina Los Ángeles y Ensayos de Granulometría	78
4.2.7 Ponderación de los parámetros	94
4.3 Escenarios ante elevación del nivel del mar.....	95
4.3.1 Medición del nivel medio del mar <i>in situ</i> :.....	96
4.3.2 Simulación del ascenso del nivel del mar mediante <i>software</i> :.....	98
4.3.3 Escenarios analizados.....	99
CAPÍTULO V.....	102
5. Resultados	102
5.1 Resultados del diagnóstico utilizando el IE-SC.....	102
5.1.1 Mapas IE-SC	116
5.1.2 Estado de los puentes de playa Carrillo.....	117
5.2 Resultados de Susceptibilidad ante la erosión costera	120
5.2.1 Resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio:	120
5.2.2 Comparación de métodos de ponderación.....	125
5.2.3 Mapas de susceptibilidad ante erosión costera.....	127
5.2.4 Conteo estadístico de segmentos de carretera	128
5.3 Resultados de los escenarios ante elevación del nivel del mar	130
5.3.1 Descripción de los sitios inundados	131
CAPÍTULO VI.....	135
6.1 Discusión de resultados	135
6.1.1 Índice de erosión-sedimentación costera.....	135
6.1.2 Susceptibilidad ante erosión costera	138
6.1.3 Escenarios ante elevación del nivel del mar.....	144
6.2 Conclusiones	150
6.3 Recomendaciones	159
CAPÍTULO VII.....	162
7.1 Referencias	162
7.2 Anexos	177

Índice de Figuras

Figura 1. Fotografía aérea donde se muestra la cercanía de la RN-160 a la línea de costa.	4
Figura 2. RN-160 en la parte Norte de Ostional.	5
Figura 3. Afectación por fuerte oleaje durante marea alta.	10
Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	13
Figura 5. Aportes al aumento del nivel del mar.	15
Figura 6. Deshielo en los glaciares en Colombia.	17
Figura 7. Comportamiento normal de la playa y del oleaje.	18
Figura 8. Impacto del mar a la infraestructura costera debido a inundación de tierras bajas	19
Figura 9. Esquema del proceso de erosión costera.	21
Figura 10. Dinámica costera común y modificación de patrones debido a una obra de infraestructura.	22
Figura 11. Imagen ilustrativa para rocas cohesivas y no cohesivas	23
Figura 12. Vista en planta de líneas de costa con sustrato blando y sustrato rocoso	23
Figura 13. Imágenes ilustrativas de costas con sustrato blando	24
Figura 14. Mapa geológico regional	25
Figura 15. Segmentos definidos de la RN-160.	35
Figura 16. Precipitación mensual en mm para el área de estudio.	41
Figura 17. Hidrografía de la región.	42
Figura 18. Ejemplo de geoforma cerros de pendiente moderada a baja y cerros relictos	45
Figura 19. Ejemplo de geoforma planicies aluviales.	46
Figura 20. Ejemplo de geoforma manglar	48
Figura 21. Ejemplo de geoforma playas	49
Figura 22. Ejemplo de geoforma acantilados.	50
Figura 23. Ejemplo de geoforma plataforma de abrasión	51
Figura 24. Vista de las carreteras en el MED <i>LiDAR</i> .	53
Figura 25. Vista de un tajo en el MED <i>LiDAR</i>	53
Figura 26. Vista del MED <i>LiDAR</i> de un asentamiento humano. MED del poblado de Sámara.	54
Figura 27. Vista de una pista de aterrizaje en el MED <i>LiDAR</i> .	54
Figura 28. Procedimiento para la obtención de los mapas de susceptibilidad.	64
Figura 29. Ilustración del proceso de rasterización.	66
Figura 30. Mapas de entrada en formato ráster correspondientes a cada uno de los parámetros utilizados para generar el mapa final de susceptibilidad ante erosión	68
Figura 31. Mapa de susceptibilidad ante erosión producto de la combinación de los mapas ráster correspondientes a cada parámetro	69
Figura 32. Localización de las formaciones rocosas y las inconsolidadas	79
Figura 33. Sitios de muestreo para prueba con Máquina Los Ángeles.	81
Figura 34. Mapa de los sitios de donde se obtuvieron las muestras para el Análisis Granulométrico.	83
Figura 35. Obtención de la muestra para análisis granulométrico	84
Figura 36. Máquina para el ensayo de abrasión Los Ángeles	88
Figura 37. Equipo utilizado en el análisis granulométrico.	90
Figura 38. Materiales utilizados para el Ensayo Los Ángeles.	94
Figura 39. Vista de las predicciones de mareas mostradas por el WXTide32.	97

Figura 40. Nivel de erosión 1, en playa Buena Vista	103
Figura 41. Signos de erosión costera en playa Ostional	104
Figura 42. Vista del tipo de erosión presente en playa Pelada.....	104
Figura 43. Rasgos de erosión en playa Guiones.	105
Figura 44. Niveles 2 y 3 en Garza y Barco Quebrado.	106
Figura 45. Erosión costera en playa Sámara	108
Figura 46. Palmeras basculadas y con raíces expuestas en playa Carrillo.....	109
Figura 47. Ejemplo de sitios con nivel 4 y 5.	110
Figura 48. Sector en playa Garza con evidencias de erosión costera considerables	111
Figura 49. Daños con nivel 4 y 5 en Sámara y Barco Quebrado.....	113
Figura 50. Daños en algunos puentes de playa Carrillo.....	114
Figura 51. Daños en algunos sitios de Carrillo.....	115
Figura 52. Mapa de ubicación de los puentes analizados en playa Carrillo.	117
Figura 53. Daños en los puentes de playa Carrillo	119
Figura 54. Mapa del grado de susceptibilidad según el parámetro de geología.	124
Figura 55. Comparación de diferentes métodos de ponderación.....	127
Figura 56. Longitud acumulada de segmentos según los niveles del IESC.....	135
Figura 57. Longitud acumulada de segmentos por cada playa.	136
Figura 58. Aumento de nivel del IE-SC.....	137
Figura 59: Porcentajes de la RN-160 según su grado de susceptibilidad ante erosión costera.....	140
Figura 60. Longitudes de segmentos de la RN-160 susceptibles ante erosión costera por cada frente de costa.....	140
Figura 61. Vista tridimensional del mapa de susceptibilidad superpuesto a la topografía	143
Figura 62. Ejemplo de escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global.	145
Figura 63. Ejemplo del ingreso del agua del mar a través de un río. En la imagen se muestra el caso del río Malanoche.....	146
Figura 64. Ejemplo del ingreso del mar a través de una quebrada para el escenario de 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global.	147
Figura 65. Ejemplo de inundación para el escenario de 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima.....	149

Índice de tablas

Tabla 1. Niveles definidos para la aplicación del IE-SC.....	61
Tabla 2. Referencias de los datos de entrada utilizados para los mapas de susceptibilidad	70
Tabla 3. Matriz de clasificación de la susceptibilidad ante erosión costera.....	72
Tabla 4. Sitios de muestreo para la prueba con la máquina de Los Ángeles.....	80
Tabla 5. Información acerca de las muestras obtenidas para el Análisis Granulométrico.....	82
Tabla 6. Numeración y abertura de tamices.....	85
Tabla 7. Tabla de gradación según el número de esferas y la carga de la masa de muestra.....	87
Tabla 8. Gradación según tamaño de granulometría de las muestras.....	87

Tabla 9. Cantidad mínima por ensayar según tamaño de partículas.....	90
Tabla 10. Pesos utilizados en la ponderación de los parámetros.....	95
Tabla 11. Predicciones de marea utilizadas en la medición de campo.....	97
Tabla 12. Coordenadas de las mediciones de la altura de la marea.....	98
Tabla 13. Coordenadas de los puntos de referencia ajustados al nivel medio del mar.....	98
Tabla 14. Predicciones para el aumento del nivel del mar debido al cambio climático.....	100
Tabla 15. Resumen de los sitios donde se presenta cada nivel del IE-SC y su longitud en la línea de costa.....	116
Tabla 16. Clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	120
Tabla 17. Muestras del ensayo de granulometría clasificadas según el SUCS.....	121
Tabla 18. Pesos finales y coeficientes de Los Ángeles para las muestras de roca.....	123
Tabla 19. Relación Coeficiente Los Ángeles-Grado de susceptibilidad ante erosión costera para las formaciones del área de estudio.....	124
Tabla 20. Conteo de segmentos de la carretera sobre los mapas de susceptibilidad ante erosión costera.....	129

Índice de mapas

Mapa 1. Geomorfología A.....	55
Mapa 2. Geomorfología B.....	55
Mapa 3. Geomorfología C.....	55
Mapa 4. Geomorfología D.....	55
Mapa 5. Índice de erosión-Sedimentación costera A.....	116
Mapa 6. Índice de erosión-Sedimentación costera B.....	116
Mapa 7. Índice de erosión-Sedimentación costera C.....	116
Mapa 8. Índice de erosión-Sedimentación costera D.....	116
Mapa 9. Susceptibilidad ante erosión costera A.....	127
Mapa 10. Susceptibilidad ante erosión costera B.....	127
Mapa 11. Susceptibilidad ante erosión costera C.....	127
Mapa 12. Susceptibilidad ante erosión costera D.....	127
Mapa 13. Escenario de elevación del nivel del mar de 1m (CG) A.....	130
Mapa 14. Escenario de elevación del nivel del mar de 1m (CG) B.....	130
Mapa 15. Escenario de elevación del nivel del mar de 1m (CG) C.....	130
Mapa 16. Escenario de elevación del nivel del mar de 1m (CG) D.....	130
Mapa 17. Escenario de elevación del nivel del mar de 4,6m (CG+ENOS+MM) A.....	130
Mapa 18. Escenario de elevación del nivel del mar de 4,6m (CG+ENOS+MM) B.....	130
Mapa 19. Escenario de elevación del nivel del mar de 4,6m (CG+ENOS+MM) C.....	130
Mapa 20. Escenario de elevación del nivel del mar de 4,6m (CG+ENOS+MM) D.....	130
Mapa 21. Escenario de elevación del nivel del mar de 2m (CG) A.....	130
Mapa 22. Escenario de elevación del nivel del mar de 2m (CG) B.....	130
Mapa 23. Escenario de elevación del nivel del mar de 2m (CG) C.....	130
Mapa 24. Escenario de elevación del nivel del mar de 2m (CG) D.....	130
Mapa 25. Escenario de elevación del nivel del mar de 5,6m (CG+ENOS+MM) A.....	130
Mapa 26. Escenario de elevación del nivel del mar de 5,6m (CG+ENOS+MM) B.....	130
Mapa 27. Escenario de elevación del nivel del mar de 5,6m (CG+ENOS+MM) C.....	130
Mapa 28. Escenario de elevación del nivel del mar de 5,6m (CG+ENOS+MM) D.....	130

Abreviaturas

ASTM: American Society for Testing and Materials

CNE: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias

CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad

IE-SC: Índice de Erosión-Sedimentación Costera

IGN: Instituto Geográfico Nacional

Lanamme UCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

LiDAR: Laser Imaging Detection and Ranging

Ma: Millones de años

MED: Modelo de Elevación Digital

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes

RN-160: Ruta Nacional No. 160

RNVSO: Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial

UCR: Universidad de Costa Rica

UGERVN: Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

Resumen

Las playas del Pacífico de Costa Rica experimentan constantemente procesos de erosión costera, estos aumentan durante eventos como mareas altas extremas y huracanes. Estudios previos comprobaron que el impacto de estos procesos en Costa Rica incrementó durante las últimas décadas como consecuencia del ascenso del nivel del mar, producto del calentamiento global. Algunas comunidades costeras han resultado impactadas, por ejemplo, la franja litoral entre playa Carrillo y Ostional, particularmente, obras de infraestructura importantes para el transporte y la economía de estas comunidades, como la Ruta Nacional 160 (RN-160), están expuestas y han sufrido daños recientemente. Esta situación sería peor en el futuro debido al ascenso del nivel del mar, por este motivo, una caracterización detallada de este proceso en la zona es necesaria.

Esta es la primera investigación que analiza integralmente el impacto de la erosión costera sobre una obra de infraestructura vial en el país. Para esto se desarrolló una metodología que combina diferentes análisis para conocer los procesos de erosión costera actuales e identificar lugares donde estos procesos se podrían dar en un futuro. La metodología utiliza una base topográfica *LiDAR*. Se aplica el Índice de Erosión-Sedimentación Costera (IE-SC), que clasifica información de campo acerca de los procesos de erosión-sedimentación que ocurren, se basa en observaciones y evidencias físicas del medio geológico donde se aplica. Posteriormente, se analiza la susceptibilidad ante erosión costera al realizar una sumatoria de parámetros intrínsecos al terreno con un respectivo peso según su importancia, enfatizando así en la variable de geología, donde se utilizan los ensayos geotécnicos de Análisis Granulométrico y la Prueba de Abrasión Los Ángeles para caracterizar las rocas y sedimentos del área. Por último, mediante un Sistema de Información Geográfica se modela la elevación del nivel del mar a diferentes alturas a partir de un modelo de elevación digital ajustado al nivel medio del mar.

Los resultados de la evaluación se presentan en mapas que despliegan el nivel de intensidad, de los procesos erosivos para cada segmento de línea de costa. También se obtienen mapas que muestran el grado de susceptibilidad ante erosión costera según una matriz de susceptibilidades elaborada para el presente estudio. Además, se modelan posibles escenarios de elevación del nivel del mar que muestran la inundación en las áreas aledañas al litoral.

Al comparar la posición de la RN-160 con los mapas, se identificaron los tramos de la ruta que peligran ser impactados por la erosión costera. Se estableció que los segmentos de la carretera frente a las playas Carrillo, Garza y Ostional son los que han presentado daños recientemente y también los que presentan mayor susceptibilidad ante erosión costera.

Se comprueba que existe erosión costera en el área estudiada, que esta ocasiona daños en la RN-160, que hay tramos que son susceptibles ante dicha amenaza y que habrá tramos impactados si el nivel del mar asciende; por lo tanto, este trabajo representa un insumo para que las autoridades encargadas de la RN-160 distribuyan mejor sus recursos en cuanto a reparos o prevención de la erosión costera en el tramo estudiado.

Palabras clave: erosión costera, ascenso del nivel del mar, Ruta Nacional 160, susceptibilidad, *LiDAR*, parámetro, modelo de elevación digital.

CAPÍTULO I

1. Introducción

El presente proyecto de graduación se presenta para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica. Este se realizó con el apoyo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme UCR), y que se especializa en materiales, estructuras e infraestructura del transporte y para quién este trabajo resulta de interés académico.

La ley N°8114 de la república de Costa Rica en sus artículos 5 y 6, encomienda al Lanamme UCR una serie de funciones en materia de evaluación, fiscalización, asesoría y capacitación, entre otras; para garantizar la máxima eficiencia de la inversión pública en la reconstrucción y conservación de la Red Vial costarricense. Dentro de las funciones de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) de Lanamme UCR está la identificación y caracterización de procesos geológicos que generen o puedan generar un impacto negativo en las rutas nacionales. Particularmente, los resultados de esta investigación serán un insumo importante para proyectos de igual o mayor magnitud donde se pretende determinar la vulnerabilidad de rutas nacionales ubicadas cerca de costas con problemas de erosión.

El estudio de los procesos físicos-geológicos que modifican el entorno y que pueden llegar a impactar negativamente la infraestructura civil de transporte, como: carreteras, pistas de aterrizaje y puertos; es una labor en la que los profesionales en geología deben participar activamente. La comprensión de estos procesos y la caracterización geológica puede orientar a las autoridades competentes en el planteamiento de medidas preventivas o correctivas para resolver o al menos minimizar el impacto negativo que tienen los procesos naturales.

El fenómeno de ascenso del nivel del mar puede ocasionar o incrementar impactos físicos en las costas como: erosión, transgresión, retroceso de la línea de costa, migración tierra adentro de terrenos sujetos a inundación (como marismas), pérdida de hábitats costeros, salinización de acuíferos, entre otros. Uno de estos procesos naturales es la erosión costera, que se ha visto acelerada en las últimas décadas por el ascenso del nivel del mar debido al calentamiento global (Lizano, 2014).

El efecto de la exacerbación de la erosión en las costas modifica, daña o destruye los alrededores de la zona litoral. Existen zonas donde se han dado casos extremos, como por ejemplo la desaparición de cinco islas en el Sur del Océano Pacífico, que eran parte de las Islas Salomón, estas se encuentran bajo el agua debido a razones como: mala gestión de respuesta a procesos erosivos, actividad tectónica, tormentas y el ascenso en el nivel del mar (BBC Mundo, 2016). Este proceso también se manifiesta en el territorio costarricense, por ejemplo, en playa Esterillos, en la provincia de Puntarenas, donde recientemente se han presentado problemas de erosión costera, la cual amenaza numerosas viviendas, la escuela e incluso un hotel. Según expertos de la Universidad de Costa Rica (UCR), dicha erosión es producto de factores tectónicos, antrópicos (alcantarillado en mal estado), además de ascenso del nivel del mar (La Nación, 2016a).

En Costa Rica previamente se han hecho estudios generales de temáticas relacionadas a la dinámica de las costas del país, como por ejemplo el de BIOMARCC-SINAC-GIZ (2013), que muestra la vulnerabilidad de diferentes regiones del país ante el cambio climático; Mora (2014) quién propone políticas de adaptación al cambio climático en zonas costeras; otros estudios más específicos como el de Malavasi (2008) quién analiza cambios geomorfológicos en varios litorales de Costa Rica. Hay algunos pocos estudios que se enfocan específicamente en el fenómeno de erosión costera, como Lizano (2013), en ese documento se hacen algunas descripciones de este fenómeno en playas que se encuentran dentro del área que cubre este trabajo. No se tiene registro de la utilización de la metodología implementada en este proyecto en algún otro sitio de

Costa Rica, tampoco de estudios acerca de erosión costera y su afectación en carreteras.

En este trabajo, se identificaron y caracterizaron los sitios específicos de la Ruta Nacional 160 (RN-160) en el tramo frente al litoral entre Carrillo y Ostional, donde actualmente se puedan reconocer procesos de erosión costera causado por el impacto recurrente y continuo de las mareas y oleaje sobre el sustrato (rocoso o arenoso). De esta forma se podría proyectar que tipo de comportamiento presentarían sitios costeros similares que aún no son impactadas por este proceso, pero que en el futuro sí lo serán debido al ascenso del nivel mar producto del calentamiento global.

1.1 Problema

Hay tramos de la Ruta Nacional N°160 (RN-160) que se están viendo afectados o corren el riesgo de ser dañados por erosión costera ante el ascenso del nivel del mar en el tramo entre Carrillo y Ostional.

1.2 Justificación

El conocimiento de las características y los procesos costeros, para la toma de decisiones en lo que respecta a la gestión integrada de las regiones costeras y la zona marítimo terrestre, en ocasiones es insuficiente. Aunque existe un volumen cada día más considerable de datos, se ha identificado que todavía existen importantes vacíos de información (EUROSION, 2005). Debido a que no se puede evitar que sucedan eventos como la erosión costera, tenemos que aprender a adaptarnos a los mismos; para ello es necesario conocer sus características, comportamiento y probabilidad de ocurrencia. Una ruta para seguir es evaluar supuestos, hipótesis y escenarios que nos indican la manera en que una amenaza natural podría impactar a la población, a partir de ello se pueden tomar decisiones

para corregir los modelos de desarrollo, y orientar a las autoridades y tomadores de decisiones a accionar de manera adecuada en materia de gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

Costa Rica no escapa ante la situación de aumento del nivel de los océanos, el hecho de ubicarse en un istmo y tener costas en las vertientes Pacífica y Caribe, la hace vulnerable ante dichos procesos (Lizano, 1997). Particularmente, en el área de estudio se pueden observar efectos producidos por el aumento del nivel del mar. Lizano (2013) indica que el proceso más evidente de erosión costera en el Pacífico Norte se experimenta en Punta Guiones, que se ubica dentro del área de estudio, dónde se presenta impacto en viviendas que ya han sido abandonadas; además de Punta Guiones, otros sitios que experimentan procesos de erosión costera son: playa Carrillo, playa Sámara, playa Nosara, playa Ostional.

En varios tramos entre el sector de Carrillo a Ostional, la RN-160 se ubica paralela y a poca distancia de la costa, en muchas ocasiones es la única vía de comunicación, o al menos la principal para los pobladores y turistas de esta región. La realidad requiere atención, ya que en ciertos tramos la carretera se encuentra a tan solo unos metros de distancia de la línea de costa (Figura 1).



Figura 1. Fotografía aérea donde se muestra la cercanía de la RN-160 a la línea de costa. La línea verde corresponde con el tramo de la carretera que atraviesa Playa Garza.

Según observaciones sobre el tramo de la ruta estudiado, hay tramos de la carretera que ya se han visto afectados por el oleaje y las mareas; donde algunos de los efectos más notorios en la zona se dan, por ejemplo, con la línea de palmeras de mayor altura y el corte o borde en playa Carrillo, donde se observa el evidente impacto del oleaje y la remoción de material de la playa. Además, la RN-160, que comunica playa Ostional con la comunidad de San Juanillo en el extremo Norte de Ostional, se encuentra a escasos metros del mar y se nota un franco proceso de erosión, en este sitio la carretera se encuentra prácticamente sobre la playa y no existe una barrera adecuada para la protección (Figura 2). Para realizar un reordenamiento de vías impactadas por la erosión costera, es imperativo la presencia de insumos que caractericen la geomorfología, geología y los materiales de la zona, así se podrán tomar decisiones con base en información técnica detallada.



Figura 2. RN-160 en la parte Norte de Ostional. Tomada de Google Earth® (Panoramio).

El presente estudio adquiere mayor relevancia si se considera que dentro del área de estudio se incluye la única carretera de acceso al Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional (RNVSO); un eventual daño en la RN-160 complicaría las actividades económicas de la zona, las cuales están principalmente ligadas al

turismo de playa y naturaleza. Si la erosión costera llegase a dañar algún tramo de la RN-160 dentro del área de estudio, particularmente los segmentos ubicados a menos de 1 km del litoral, las comunidades costeras se verían severamente afectadas, de manera que habría un incremento en los tiempos de viaje o se presentaría cierre total. Lo anterior repercute en el tiempo de llegada de las personas a sus trabajos, el traslado de productos originarios del área o el ingreso de alimentos y abastecimiento de materiales. Además, la RN-160, a pesar de no estar asfaltada en muchos tramos, corresponde con la principal o única vía de acceso a varios poblados. Por ejemplo, si se dañara el tramo entre Ostional y Nosara, cuya distancia es aproximadamente de 10 km, sería necesario tomar una ruta alterna que implicaría un viaje de 130 km para llegar al mismo punto.

Este trabajo pretende evaluar el estado de la RN-160 con respecto a la erosión costera y determinar los sitios donde la misma es susceptible a sufrir impacto por dicho proceso. Lo anterior se lleva a cabo al identificar los segmentos que presentan erosión actualmente, desarrollando y aplicando una metodología que cuantifica la susceptibilidad a erosionarse de los sitios en el área, utilizando diferentes parámetros con un respectivo peso y realizando una clasificación del grado de susceptibilidad; y por último modelando escenarios de ascenso del mar a diferentes niveles.

1.3 Alcances y limitantes

Alcances

- Se identifican los lugares que actualmente están siendo afectados por erosión costera, se aportan datos cuantitativos y cualitativos de estas zonas y se despliegan los resultados en mapas que incluyan los sitios susceptibles a este proceso.
- Como impacto del presente proyecto, las autoridades correspondientes dispondrán de una base de información práctica y con alto grado de detalle

(lo cual es brindado por el uso de tecnología *LiDAR*), que se pueda utilizar para la toma de decisiones en temas de gestión de riesgos, así como en evaluación y reparación de la infraestructura.

- Se desarrolla una nueva metodología para la evaluación de la erosión costera y su afectación sobre la infraestructura vial, que también puede utilizarse para evaluar otro tipo de infraestructura ubicada en la zona de estudio.
- Con el objetivo de obtener un valor de resistencia ante la erosión de los materiales, se les da un nuevo uso a ensayos geotécnicos comunes. Esta metodología incluye el uso del Análisis de Granulometría mediante tamices, y de la prueba de abrasión Los Ángeles (Henaine, 2010).
- Las metodologías que se implementan en este trabajo no utilizan datos oceanográficos ni modelajes físicos de inundación como lo realizan autores como Wadey *et al.* (2015) debido a que se enfatiza en el medio físico geológico y en las condiciones actuales del terreno. Esto representa una ventaja ya que para Costa Rica en ocasiones no se encuentran disponibles o no existen los datos necesarios para llevar a cabo dichos modelajes. Así mismo algunos abordajes no toman en cuenta los aportes provenientes de ríos y drenajes, que también ocasionan erosión costera. Dentro de este panorama, los modelajes físicos y oceanográficos vienen a ser un complemento de estudios acerca de erosión costera como el presente.

Limitantes

- Existen pocos estudios relacionados con procesos costeros en el norte de la costa Pacífica costarricense, por lo que la información base resulta limitada. Este trabajo espera generar más información e incentivar este tipo de proyectos en otras zonas del país.

- La mayoría de los datos de entrada con los que se trabajó no se encontraban en formato digital para Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya sea en formato vectorial o ráster, por lo que fue necesario digitalizar la información manualmente; esto conlleva un atraso en la realización de los modelos. Otras zonas del país donde se quiera implementar la metodología planteada aquí podrían tener este mismo problema.
- No se puede brindar una solución específica a los procesos de erosión costera, ya que se escapa del alcance de este trabajo y de las funciones por ley de evaluación y fiscalización del Lanamme UCR. Esa responsabilidad debería de tomarla el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) con una participación de las municipalidades donde se encuentran los tramos de la ruta. Aquí se dan recomendaciones generales de medidas a tomar para reducir el impacto negativo de la erosión.

1.4 Importancia de este estudio

A pesar de que existen evidencias del ascenso del nivel del mar, así como de procesos de erosión costera en el área de estudio, los cuales fueron observados preliminarmente en giras de reconocimiento, el presente trabajo describe cualitativa y cuantitativamente la ocurrencia de dichos procesos; se representan gráficamente en mapas que facilitan la visualización de los resultados.

Este trabajo contribuye con la identificación de sitios susceptibles, por lo que Instituciones como el Lanamme UCR podrían advertir a las autoridades pertinentes que hay un problema que ya se ha identificado y de esta manera dar recomendaciones generales acerca de cómo enfrentarlo, y que dichas autoridades procedan a tomar medidas con el fin de evitar mayores deterioros en la infraestructura y consecuencias derivadas. Dichas autoridades son quienes definen

si es viable invertir en estructuras para la protección de la carretera, o en casos más severos, si es necesario reubicar el trazo de la ruta.

Los resultados de este proyecto se podrán utilizar como base para la realización de futuros trabajos de reordenamiento territorial que beneficien a la población y al ambiente, por ejemplo, podría tomarse en cuenta para la elaboración de un Plan Regulador Costero. El presente trabajo genera información detallada que contempla el efecto de la erosión costera en una región, y sirve en el ámbito municipal como guía e instrumento para planificación y toma de decisiones.

Mediante este análisis, se trata de darle un uso adicional a los datos *LiDAR* (*Laser Imaging Detection and Ranging*) que se encuentran disponibles para el área de estudio, puesto que esta tecnología tiene un costo elevado de adquisición. El costo ronda los 1000-1500 dólares por kilómetro cuadrado, esto hace que pocas entidades puedan adquirirlo. Algunas instituciones en Costa Rica que tienen a disposición datos *LiDAR* son: CNE, ICE, MOPT y Lanamme UCR, por lo tanto, lo ideal sería sacar el máximo provecho de la utilización de estos datos los cuales poseen alto grado de detalle y elevado valor económico.

Una contribución del presente estudio es el desarrollo de una metodología para la evaluación de la susceptibilidad a la erosión para sitios cercanos a la costa, en este caso utilizado en específico para una carretera, pero que también se le podrían dar usos en el análisis de susceptibilidad o vulnerabilidad en comunidades e infraestructura costeras en general (aeropuertos, hoteles, muelles, entre otras.). Esta metodología puede ser aplicada por otros estudiantes de geología o profesionales en evaluación de riesgo, quienes podrán recrear los análisis y realizar las pruebas en materiales de otros sitios del país donde haya carreteras cercanas al litoral. La metodología presente en el presente estudio permite evaluar la susceptibilidad ante procesos costeros de erosión en lugares donde se tenga indicios o evidencias de que el fenómeno está sucediendo, por ejemplo, la carretera que pasa frente a playa Caldera (Ruta Nacional No. 23), donde ya se han dado problemas debidos al oleaje (Figura 3).



Figura 3. Afectación por fuerte oleaje durante marea alta. Fuente: Periódico *Al Día*, Julio de 2012.

Una característica importante del área de estudio es que posee heterogeneidad de condiciones, lo cual permite poner a prueba la metodología en diferentes contextos. Por ejemplo, posee geoformas como: acantilados, plataformas de abrasión, playas y estuarios. Además, presenta zonas con elevaciones relativamente altas y también bajas; así como tramos de carretera asfaltada y en lastre. Adicionalmente, en esta metodología es prioridad la respuesta del terreno y del material geológico que está siendo impactado por el agua del océano y que es vulnerable a erosionarse según diversos factores, y aunque involucra datos oceanográficos, no depende de estos en grandes cantidades; esto representa una ventaja puesto que dichos datos son, en ocasiones, difíciles de obtener, demandan grandes cantidades de tiempo y esfuerzo o simplemente podrían no encontrarse disponibles para una región determinada.

1.5 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos sobre los cuales se basa esta investigación:

1.5.1 Objetivo general

- Determinar las áreas con afectación actual o susceptibilidad ante erosión costera mediante la caracterización geológica del sustrato y de la dinámica costera para el tramo Ostional-Carrillo de la RN-160.

1.5.2 Objetivos específicos

- Clasificar el área de estudio en unidades geomorfológicas.
- Identificar cualitativa, cuantitativa y espacialmente los procesos de erosión costera y pérdida de sustrato en el tramo Ostional-Carrillo de la RN-160.
- Determinar los sitios en el tramo Ostional-Carrillo de la RN-160, donde la carretera puede ser dañada por erosión costera.
- Establecer la susceptibilidad ante la erosión costera del tramo Ostional-Carrillo de la RN-160 mediante modelos predictivos de inundación costera ante diferentes escenarios de ascenso del nivel del mar.

1.6 Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio comprende las comunidades costeras ubicadas en los distritos de Cuajiniquil, Nosara, Sámara y Puerto Carrillo. Dentro de estos distritos se encuentran poblados como: Ostional (distrito Cuajiniquil), Nosara, Pelada, Guiones, Garza (distrito Nosara), Barco Quebrado, Esterones, Buena Vista, Cangrejal, Sámara (distrito Sámara), Carrillo (distrito Puerto Carrillo), todos ubicados en la provincia de Guanacaste según el Instituto Geográfico Nacional

(IGN). Dentro de esta franja se encuentra el Refugio Nacional de Vida Silvestre (RNVS) Ostional, el cual se extiende desde punta India al Norte de playa Ostional hasta Punta Guiones, al Sur de playa Guiones y Norte de playa Garza, el cual fue creado mediante la Ley N° 6919.

Se ubica en un cuadrante entre las coordenadas 311000 E a 337000 E y 1093000 N a 1090000 N según la proyección CRTM-05, que corresponde con parte del área de las hojas topográfica Garza, Cerro Brujo y Cerro Azul del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:50000. El área de interés corresponde principalmente con el área donde existe una base topográfica *LiDAR* disponible, la cuál es la franja costera que se ubica en el cuadrante anteriormente mencionado, hasta 1,5 km tierra adentro (Figura 4). La elevación de la zona oscila entre 0 m s.n.m. y 15 m s.n.m. en las comunidades costeras, pero en las partes montañosas puede llegar hasta los 420 m s.n.m.

Holdridge (1967) realiza una clasificación de zonas de vida para Costa Rica. Dentro de esta, la mayor parte de la Península de Nicoya, así como la zona de estudio corresponde con un bosque húmedo tropical (bh-T) en el que las temperaturas superan los 24°C casi todo el año, además se indica que el promedio de lluvia oscila entre 1800 mm y 4000 mm por año; presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por cinco o seis meses, normalmente entre diciembre y mayo.

Para la creación de los mapas se divide la zona de estudio en 4 sectores de igual tamaño, esto se debe a que la forma del área de estudio es alargada porque se trata de una franja costera, por lo que la representación en un solo mapa pierde mucho detalle. Las siguientes son los segmentos de costa que comprende cada sector:

- A) Carrillo, Sámara y la parte Este de Buena Vista.
- B) Parte Oeste de Buena Vista, Barrigona, Barco Quebrado y Bajo Escondido.
- C) Garza, Guiones, Pelada y el Este de Nosara.
- D) Nosara y Ostional.

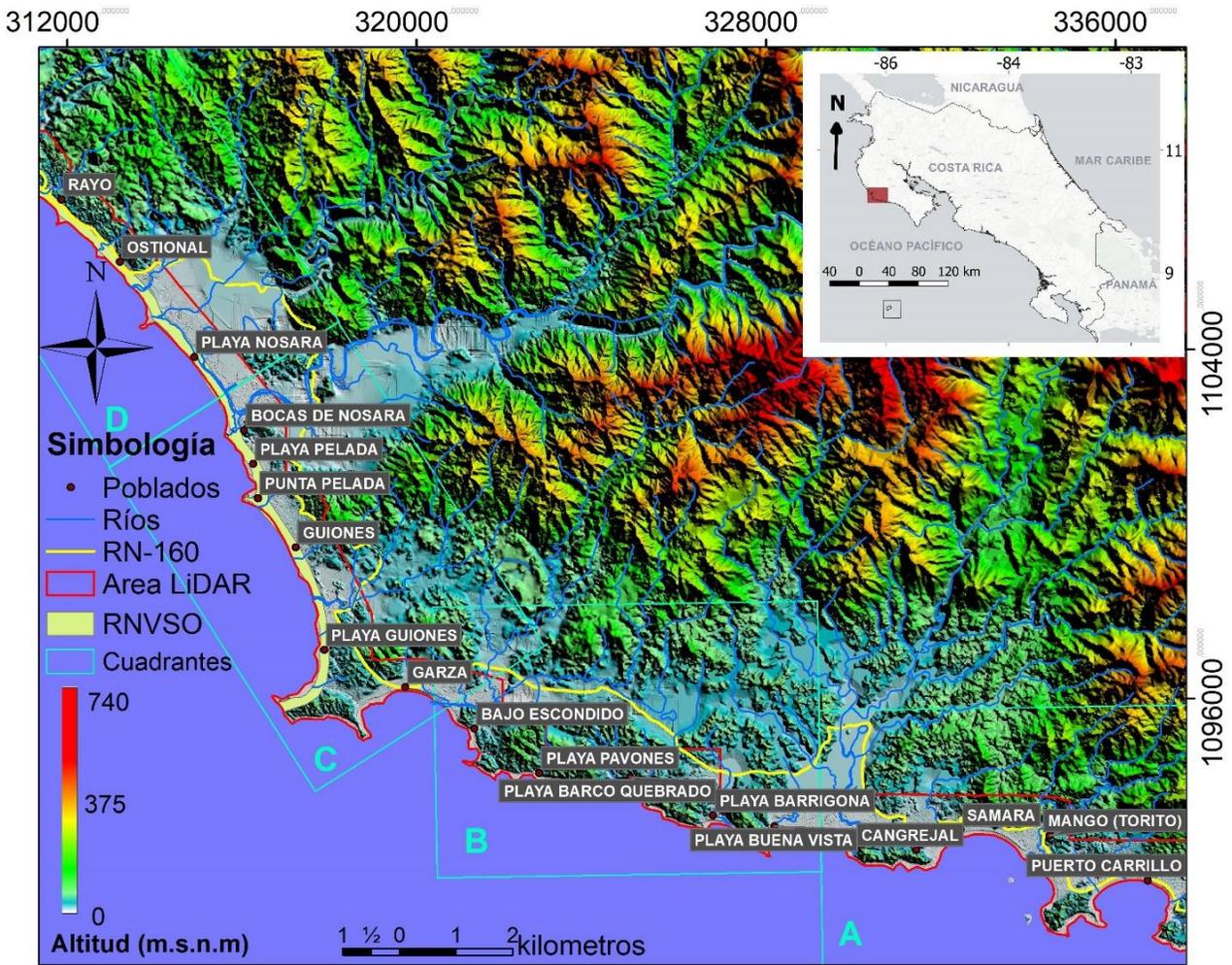


Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Creado con datos obtenidos del Atlas Digital de Costa Rica 2014 (Ortiz-Malavassi, 2014).

1.7 Definición de zona de estudio y sitios de interés

La elección de la zona de estudio se debe a distintas razones, principalmente es que en la zona ya se han documentado procesos de erosión, como los expuestos en Lizano (2013), quién identifica remoción de material por acción del oleaje en playas como Guiones, Sámara, Nosara, Ostional y Carrillo. Denyer *et al.* (2014) realiza observaciones de palmeras caídas y sistemas rústicos de retención de la erosión, por lo que califica de playas erosivas a sitios como Sámara.

Aunado a lo anterior, se ha comprobado que esta región del país presenta periodos de subsidencia entre sismos de gran magnitud (Marshall & Anderson,

1995); esto ocasiona que el nivel relativo del mar ascienda y el agua marina alcance los sitios con bajas altitudes o inicie remoción de sedimentos en lugares que anteriormente no estaban siendo afectados por ello. Este efecto puede verse contrarrestado por los terremotos que ocurren de manera cíclica que ocurren en la península de Nicoya y que ocasionan levantamiento y por consiguiente descenso relativo del nivel del mar (Linkimer *et al*, 2012).

Este tramo de la RN-160 corresponde con el único acceso al Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional (RNVSO), por lo que algún daño en la carretera podría impedir el acceso a este refugio.

Una ventaja para la realización del presente estudio es que esta región posee mapas geológicos de elaboración reciente, que fueron publicados por Denyer *et al.* (2014), estos son de gran ayuda para crear los mapas de susceptibilidad ante erosión. Además, características como: diversidad de tipos de roca y que la carretera tenga partes con asfalto y partes sin asfaltar, hacen que el lugar sea idóneo para probar la metodología.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

En este capítulo se brinda información acerca de algunos temas relacionados con la erosión costera y la RN-160, los cuales resultan importantes para comprensión del trabajo realizado en la presente investigación.

2.1 Elevación del nivel del mar y naturaleza de la erosión costera

El aumento de la temperatura global durante las últimas décadas está provocando cambios significativos e irreversibles en los océanos, lo cual puede comprometer en el futuro los beneficios que estos prestan a las poblaciones humanas (IPCC, 2007). Algunos de estos cambios son: la fracturación de las masas de hielo, el aumento del volumen del mar, debido a expansión térmica, derretimiento de los hielos y, consecuentemente, su aporte de agua a los océanos, entre otros ejemplos; lo anterior ocasiona que el nivel del mar ascienda a nivel global (PNUMA, 2007) (Figura 5). Los cambios debido al calentamiento global anteriormente mencionados, aunque ocurran lejos de Costa Rica, tienen consecuencias visibles en las costas tanto del Caribe como del Pacífico Costarricense.

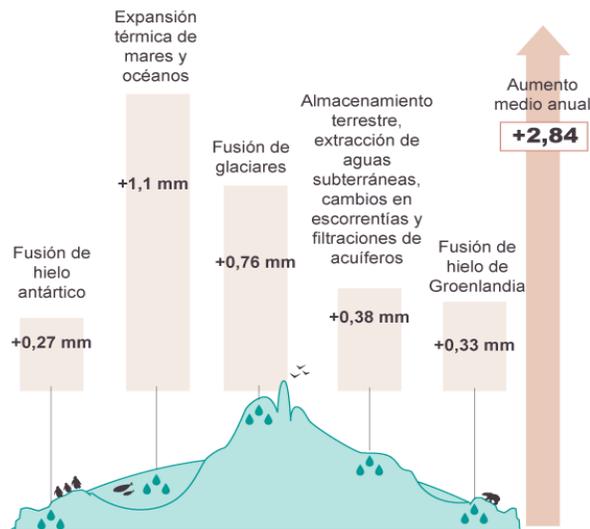


Figura 5. Aportes al aumento del nivel del mar. Media anual en mm desde 1993 hasta 2010. Modificado de PNUMA (2007).

Existen sitios que ya han sido afectados por el calentamiento global como la región del mar de Amundsen, la península Antártica, Groenlandia, entre otros lugares donde las capas de hielo y glaciares se están derritiendo; así como cualquier masa de hielo que toque los océanos, esto debido al aumento gradual de temperatura de los océanos (EL TIEMPO, 2018).

Hay comunidades o ciudades costeras que ya han sufrido los problemas derivados del ascenso del nivel del mar, por ejemplo, el caso del condado de Essex, al sureste de Inglaterra, donde en años recientes (a partir de 1973) se han perdido hasta 260 km² de marismas y estuarios en las costas de esta región inglesa; además, se ha perdido gran cantidad de área para agricultura y pastoreo contiguos a las marismas y estuarios perdidos. (EUROSION, 2005).

A nivel regional de América Latina lugares como Ecuador y St. Kitts & Nevis han perdido terreno debido al ascenso del nivel del mar, aproximadamente un 10% y 25% respectivamente, de sus áreas costeras han perdido terreno debido al ascenso del mar y acelerado por eventos climáticos extremos ocasionados por el calentamiento global (EcoWatch, 2018). En las islas del Caribe ya se sienten los efectos del calentamiento global y el ascenso del nivel del mar, por ejemplo, en la ciudad de Santo Domingo en República Dominicana hay sitios donde las altas marejadas y lluvias intensas causan inundaciones; se está dando erosión costera en los puertos, aeropuertos e infraestructura turística, además de la salinización de los acuíferos que abastecen la ciudad (FAO, 2013). En Cuba sucede algo similar, en la región de la Habana se han incrementado los ingresos del mar hacia la tierra, ocasionando evacuaciones de turistas. Ha habido cambios en los renglones de pesca debido al cambio de profundidad y, por consiguiente, cambios en la salinidad de las aguas, también se ha dado la contaminación por salinidad de los acuíferos (CIH, 2001). Otro cambio notable en la región producto del calentamiento global y que incide sobre el nivel del mar es el derretimiento de los glaciares en Colombia, donde se pasó de tener aproximadamente 349 km² en 1850 a aproximadamente 37 km² en la actualidad (IDEAM, 2001) (Figura 6).

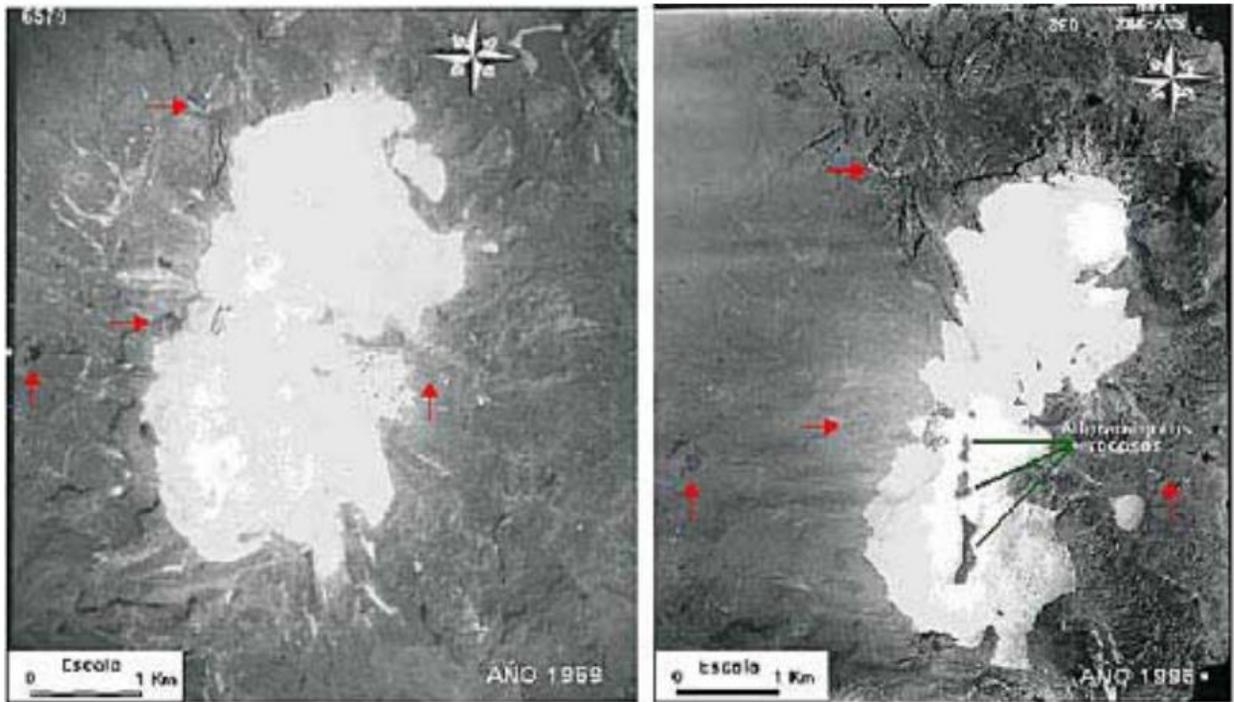


Figura 6. Deshielo en los glaciares en Colombia. Comparación de fotografías aéreas donde se muestra la disminución de las áreas glaciares en el volcán nevado Santa Isabel entre 1959 (izquierda) y 1996 (derecha). Las flechas rojas muestran puntos de comparación para lograr visualizar de una mejor manera y las flechas verdes indican la aparición de afloramientos rocosos en la cima. Modificado de IDEAM (2001).

A escala mundial se prevé que en un futuro próximo el calentamiento global tenga efectos directos sobre el nivel del mar, lo cual a su vez tendría consecuencias en el comportamiento normal de las playas y del oleaje (Figura 7), como: inundación de humedales costeros y tierras bajas, retroceso de playas, salinidad de acuíferos; patrones de erosión y sedimentación litorales se verán modificados, por lo que se dará un deterioro de la infraestructura costera en general (Bedia, 2004).



Figura 7. Comportamiento normal de la playa y del oleaje. Modificado de La Nación (2016b).

Dicho deterioro en la infraestructura costera ya se ha dado y es muy probable que continúe sucediendo en las comunidades costeras de Costa Rica. Carreteras como la RN-160 se incluyen dentro de la infraestructura costera que sufre las consecuencias del ascenso del nivel del mar. La infraestructura costera puede ser alcanzada debido a la inundación de tierras bajas y puede presentar mecanismos de daño como el “Flujo de Presa”, donde las aguas fluyen por encima de la carretera de un lado al otro (FHWA, 2014) (Figura 8).



Figura 8. Impacto del mar a la infraestructura costera debido a inundación de tierras bajas. Tomada de FHWA (2014).

La elevación del nivel del mar varía en intensidad según el lugar que esté afectando, y no necesariamente implica que dicha elevación sea homogénea para todo el mundo. Durante los últimos 100 años, en todas las latitudes, la elevación global del nivel medio del mar ha sido de +/- 15 cm en promedio; no obstante, información generada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha predicho que el nivel del mar puede ascender a un máximo de 4,5 m en tan solo unas cuantas décadas. Hay mucha controversia al respecto, especialmente por las variaciones que ocurren en escala local (Maul, 1993). Para Costa Rica, CEPAL (2011) predice que el aumento del nivel del mar a nivel local debido al calentamiento global y fenómeno ENOS en la costa del Pacífico será de 2,0 mm por año entre 2010 y 2040, esto sin tomar en cuenta otros factores de influencia como subsidencia. Según Dawes (1986), existen diversos factores que controlan el nivel medio del mar tanto a nivel global como regional, entre ellos: cambios en masas oceánicas debido al aporte del hielo que se derrite, cambios en el volumen del océano como resultado de la temperatura, cambios en las formas de las cuencas oceánicas, movimientos de la corteza terrestre, entre otros; cualquiera de los factores mencionados anteriormente tiene la capacidad, ya sea de manera

individual o en conjunto, de ocasionar que el nivel relativo de las costas costarricenses ascienda o descienda.

Basado en observaciones realizadas por Lizano (2013), muchas de las playas de Costa Rica, tanto en el Pacífico como en el Caribe, experimentan procesos de erosión que han sido incrementados debido al ascenso del nivel del mar. Los procesos de erosión costera se dan por eventos como: mareas altas extremas, tormentas, huracanes, marejadas, tsunamis; si el nivel del mar asciende debido al calentamiento global los procesos anteriores van a tener mayor impacto en las costas. Lizano (2013) también indica que algunos lugares que se encuentran en playas abiertas muestran erosión más acelerada y requieren de una acción inmediata, mientras que playas hacia el interior de bahía o golfos, aunque también evidencian cambios en su morfología, los procesos son más lentos y no siempre requieren medidas correctivas. Es necesario tener identificados los lugares que experimentan los procesos de erosión, así también los que se encuentran parcialmente protegidos y no se encuentran urgidos de intervención, para ello se requieren estudios específicos de procesos como la erosión costera que contribuyan a plantear soluciones prácticas a este tipo de problemas.

Algunos de los sitios en Costa Rica que sufrieron el impacto de la erosión costera son la comunidad de Esterillos Oeste en la región Pacífico Central, donde un incremento en el nivel del mar junto con otros factores de importancia como: las edificaciones en zona de riesgo, alcantarillas que drenan directo a la playa y mareas extraordinarias que han causado daños importantes a casas, una escuela y un hotel (La Nación, 2016b). En las costas del Caribe costarricense también se observan los efectos de la erosión, según Semanario Universidad (2016), en las costas de Limón; los sedimentos de la playa se han ido lavando lo cual ha provocado que segmentos de carretera se deterioren y que la vegetación costera desaparezca. En lugares como el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Puerto Vargas, parte de la propiedad ha desaparecido. En Cieneguita, desde el año 1976 se ha registrado un proceso de pérdida de sedimentos y retrogradación en el sector Central y Sur de la playa principalmente, esto repercute en daños

ocasionados a la infraestructura pública, como la pista de aterrizaje, y daños a viviendas (Barrantes *et al*, 2017).

La erosión costera actúa de manera que el golpeteo incesante de las olas sobre la base de las formaciones geológicas y depósitos costeros ocasiona la aparición de hendiduras y, como consecuencia directa, colapso de bloques, estos materiales son retrabajados hasta producir sedimentos que se incorporan a la dinámica litoral (Posada & Henao, 2008) (Figura 9).

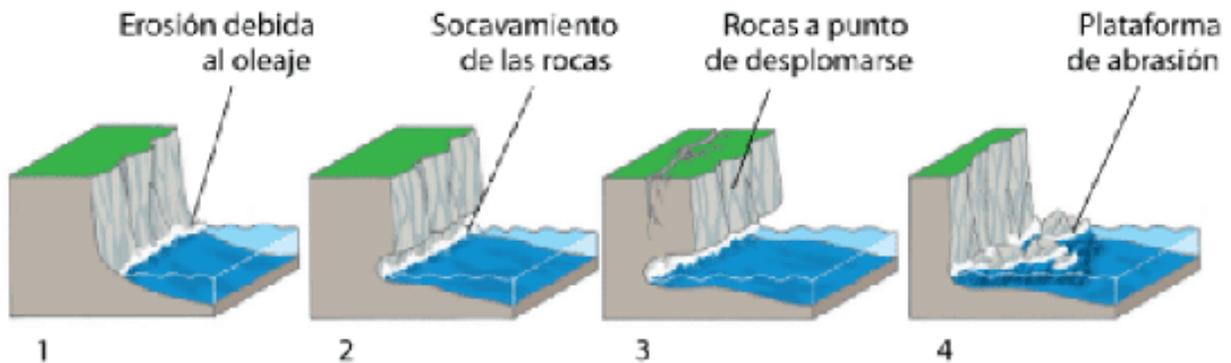


Figura 9. Esquema del proceso de erosión costera. Tomado de Gutiérrez (2008).

La erosión costera, además de producirse por causas naturales como: dinámica costera, cambios en las corrientes marinas, expansión térmica de los océanos, entre otras; puede ser también producto, o bien, ser influenciada por actividades antrópicas. Actividades como el relleno de tierras litorales, obras marítimas, extensión de áreas portuarias, infraestructura turística, trabajos de regulación de ríos, extracción de agregados para construcción de los acantilados, defensas costeras, marinas, entre otras; podrían modificar las condiciones naturales del litoral como su batimetría, patrones de propagación de las olas, transporte litoral, paquetes de sedimentos del sistema, caudal y aporte sedimentario de los ríos (Posada & Henao, 2008) (Figura 10). Es importante mencionar que en el área de estudio no existen actividades antrópicas de importancia, que puedan alterar la dinámica costera de manera significativa, la única excepción son algunas alcantarillas que drenan directo al mar y muros de contención a pequeña escala.



Figura 10. Dinámica costera común y modificación de patrones debido a una obra de infraestructura. Modificado de MITECO (2017).

Los cambios en las condiciones naturales de las costas son estudiados por la geomorfología costera y la gestión del riesgo, por lo que en este tema los geólogos tienen la capacidad y responsabilidad de identificar la amenaza, caracterizar los procesos costeros y proponer soluciones prácticas al respecto.

El efecto causado por la erosión costera varía según el material que se exponga a esta, puesto que su respuesta al golpeo del agua difiere según el tipo de roca, composición, dureza, grado de fracturación, meteorización, entre otras características. Posada & Henao, 2008 realizan una clasificación fundamentada en la resistencia del material; en el litoral se pueden encontrar los siguientes tipos: rocas cohesivas y no cohesivas, playas, planicies pantanosas-lodosas, zonas deltaicas y estuarios. También indica que las costas con características como las anteriores se pueden enmarcar en dos tipos de comportamientos físico-mecánicos: sustrato rocoso, que abarca las rocas cohesivas y no cohesivas (Figuras 11 y 12) y sustrato blando, que incluye playas, planicies pantanosas-lodosas, zonas deltaicas y estuarios (Figura 13). Es importante mencionar que la morfología de planicies pantanosas-lodosas no se encuentra en el área de estudio, la foto ilustrativa fue tomada de Parques Nacionales de España (2018).



Figura 11. Imagen ilustrativa para rocas cohesivas y no cohesivas. La línea roja divide los sectores del acantilado que poseen cada uno de los tipos de roca mencionados. Se observa como las rocas no cohesivas presentan mayor grado de meteorización, mientras que las rocas cohesivas se presentan firmes e *in situ*.



Figura 12. Vista en planta de líneas de costa con sustrato blando y sustrato rocoso. La imagen A muestra la costa con sustrato blando (desembocadura río Garza) y la imagen B la costa con sustrato rocoso (Bajo Escondido). Las imágenes corresponden con las fotografías aéreas de los datos *LiDAR* utilizados en el presente estudio.



Figura 13. Imágenes ilustrativas de costas con sustrato blando. La imagen A corresponde a costas tipo playa (Garza), la B corresponde con planicies pantanosas-lodosas (Parque Nacional Doñana, España) y la C con zonas deltáicas y estuarios (Buena Vista).

Además de las rocas y sedimentos que se mencionan anteriormente, en las costas es usual encontrar manglares expuestos a la oscilación del agua marina. Cubit *et al.* (2011) menciona que los manglares protegen las zonas costeras contra la erosión que ocasiona el oleaje normal y las grandes olas generadas por tormentas, además, los mangles acumulan sedimentos entre sus raíces, de tal forma que le van robando tierra al mar y extendiendo la línea de costa.

2.2 Geología del área de estudio

El área de estudio se localiza dentro de la Península de Nicoya, en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. En esta sección se mencionan los principales rasgos geotectónicos y se describen las formaciones geológicas que afloran en el área y son relevantes para llevar a cabo el estudio de la erosión costera. Principalmente se ubica dentro de la cuenca sedimentaria Sámara-Cabo Blanco;

que, según su origen tectónico, se sitúa dentro de la región de Talud de la Trinchera (Trench Slope) del país (Astorga *et al.*, 1989). El basamento local y regional corresponde con rocas ígneas asociadas a la formación de corteza oceánica, donde las más antiguas son del Aptiano, sobre este se depositan rocas sedimentarias desde el Neógeno al Cuaternario y depósitos no consolidados del Cuaternario, esta secuencia presenta unidades de ambientes marinos profundos, someros y de transición a continental; todas estas rocas se encuentran afectadas por deformación tectónica en diferentes fases (Denyer *et al.*, 2014).

En la figura 14 se presenta un mapa geológico regional con las formaciones aflorantes en el área de estudio.

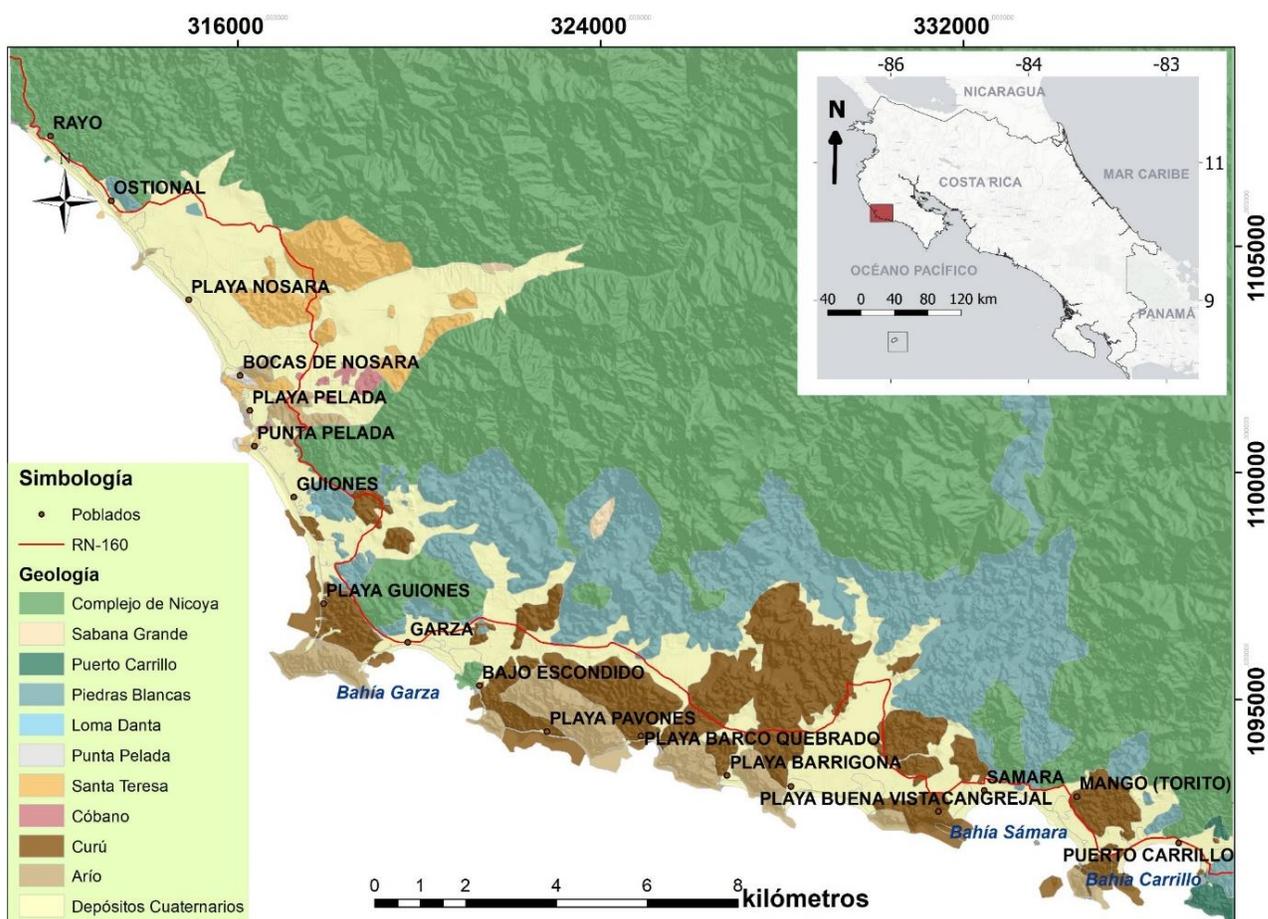


Figura 14. Mapa geológico regional. Fuente: elaboración propia basado en Denyer *et al.* (2014).

A continuación, se describen las principales unidades geológicas del área de estudio basado en bibliografía y observaciones de campo:

Complejo de Nicoya

Son rocas asociadas a la formación de corteza oceánica (de afinidad oceánica), compuesta esencialmente por rocas ígneas tanto intrusivas como extrusivas y radiolaritas; corresponde con el basamento de esta región del país. Denyer *et al.* (2014) la divide en 5 unidades principales: Complejo de Nicoya-Basaltos, Complejo de Nicoya-Radiolaritas, Intrusivo Potrero, Plagiogranito Ocotál y Komatitas Tortugal; de las anteriores, la que principalmente aflora en el área de estudio es el Complejo de Nicoya-Basaltos.

En general se trata de una secuencia de afinidad oceánica que está conformada por basaltos toleíticos masivos y en almohadillas, diques, brechas de hialoclastita, gabros, ferrogabros, picritas y plagiogranitos (Tournon, 1984). Esta secuencia posee radiolaritas asociadas depositadas en el fondo del océano, en ocasiones en forma de xenolitos incluidos dentro de otras subunidades del Complejo de Nicoya. Para efectos de este trabajo interesa principalmente la unidad de basaltos, que Denyer *et al.* (2014) describe como rocas masivas cruzadas por fracturas en ocasiones rellenas de zeolitas o sílice. Es frecuente la presencia de estructuras en almohadilla, estas pueden tener una corteza de hialoclastita producto del enfriamiento. Esta unidad compuesta por basaltos es la que aflora en el área de estudio y las rocas encontradas se asocian a características como: presencia de diques, almohadillas y brechas de hialoclastita. Las coordenadas del afloramiento representativo de esta unidad son: 311645,606 E; 1107388,855 N.

El espesor del Complejo de Nicoya se estima en al menos 1500 m. Con respecto a su edad Denyer & Gazel (2009) indican que son rocas más antiguas que el Campaniano Inferior-Santoniano (83 Ma), la mayor edad atribuida a rocas de esta formación corresponde con el Berriasiano-Hauteriviano, 139-133 Ma (Hoernle *et al.*, 2004). Se encuentra distribuido en parches a lo largo de toda el área de estudio.

Con respecto a la génesis de esta formación, Wildberg (1984) concluye que el Complejo de Nicoya inferior se formó en la dorsal del Pacífico y está compuesto por basaltos tipo MORB. La geoquímica de las rocas del Complejo de Nicoya muestra una clara signatura de *plateau*, esto indica que están asociadas a un punto caliente, el cual se cree es el de Galápagos, lo cual es demostrado por Sinton *et al.* (1997). Surge un problema cuando se empiezan a comparar las edades de los basaltos con las radiolaritas puesto que estas últimas resultan más antiguas que los basaltos. Denyer & Baumgartner (2006) dieron una explicación a este problema mediante la afirmación de que el magmatismo produjo un despegue de los sedimentos radiolaríticos a niveles superiores en la corteza, por lo tanto, el sustrato original debe encontrarse kilómetros debajo.

Formación Sabana Grande

En el área de estudio es una de las formaciones que tiene menor abundancia. Se localiza como parches aislados en el Cerro Nancital, cerca de punta Guiones, por lo que no se toma en cuenta para los análisis de laboratorio. Esta unidad corresponde con los sedimentos pelágicos, hemipelágicos y turbidíticos del campaniano y se encuentran ampliamente distribuidos por toda la Península de Nicoya (Mac Donald, 1920).

Las rocas asociadas a esta formación pueden ser: lutitas silíceas, calcilitas parcialmente silíceas e intercalaciones de areniscas medias y finas ligeramente calcáreas (Denyer *et al.* 2014) y su edad corresponde con Coniaciano-Campaniano según Bandini *et al.* (2008).

Con respecto a su origen, esta formación corresponde con una sedimentación pelágica con influencia de aporte terrígeno, lo cual es comprobado por el aumento en las intercalaciones de areniscas turbidíticas. Los eventos de sedimentación anóxica son poco frecuentes y se presentan principalmente hacia la base Bandini *et al.* (2008).

Denyer *et al.* (2014) indica que esta formación sobreyace inconformemente al Complejo de Nicoya por contactos erosivos y por falla, y se encuentra sobreyacida discontinuamente por sedimentos del Coniaciano de la formación Nambí y Puerto Carrillo.

Formación Puerto Carrillo

Aflora al extremo Sureste del área de estudio, al final de playa Carrillo. Es definida por Sprechmann (1984) como litosomas conglomerádicos que sobreyacen al Complejo de Nicoya. La describe como brechas mal estratificadas constituidas por fragmentos basálticos, pedernales amarillos y rojos y clastos de gabro; su color es verde oscuro y resaltan clastos de pedernales rojos y amarillos. También posee lentes de arenitas y calcilitas que están intercaladas con las brechas.

Denyer *et al.* (2014) ubica a la formación Puerto Carrillo dentro del Campaniano. Su génesis, según Baumgartner *et al.* (1984), es por depósitos de flujos de gravedad en un ambiente sedimentario pelágico, luego de la formación y emplazamiento de las rocas del Complejo de Nicoya, como resultado de erosión submarina.

Esta unidad se encuentra subyacida de manera discontinua con el Complejo de Nicoya y se encuentra sobreyacida de manera concordante o interdigitada con la formación Piedras Blancas según Flores (2003).

En el área de estudio se analiza una muestra tomada en las coordenadas: 337347,381 E; 1091089,240 N, esta corresponde con una brecha de fragmentos basálticos, cuya matriz es color verde oscuro y contiene trozos de jaspe (pedernal).

Formación Piedras Blancas

En el área de estudio aflora en la comunidad de Ostional, únicamente como un parche aislado y en las cercanías de Nosara, playa Pelada, Guiones, Garza y Sámara aflora de manera masiva y con mayor frecuencia.

Flores *et al.* 2003 describe a esta formación como calcilutitas blancuzcas y rojizas con intercalaciones de areniscas medias a finas rojas y grises-carbonatadas y ligeramente silíceas, con componentes de origen volcánico y presencia de foraminíferos.

Con respecto a su origen y edad, Denyer *et al.* (2014) atribuye su origen a sedimentos carbonatados hemipelágicos, con presencia de *Globotruncanas* del cretácico superior. Robaszynsky & Caron (1995) la ubican en el Campaniano Superior hasta el Maastrichtiano inferior.

Flores *et al.* (2003) indica que esta formación está sobreyace inconformemente a el Complejo de Nicoya y de forma discontinua a la formación Sabana Grande y se encuentra sobreyacida discontinuamente por la formación Curú, miembro Quebrada Pavas y la formación Santa Ana.

La muestra analizada se describe como una calcilutita de color beige, con bandas centimétricas de areniscas finas y componentes carbonatados debido a la reacción al HCl, se tomó del sitio con las coordenadas: 333465,913 E; 1093075,515 N.

Miembro Loma Danta (Formación Santa Ana)

Esta unidad aflora únicamente en un punto del área de estudio, el cual se ubica cerca de playa Guiones, por lo cual tampoco se toma en cuenta para los ensayos geotécnicos. En general se describen como areniscas medias gris verdosas calcáreas o una secuencia de intercalaciones centimétricas de calcilutitas grises parcialmente silicificadas, seguidas por calizas masivas con lentes de calcarenitas que se caracterizan por ser ricas en fósiles como corales, rudistas, *Inoceramus*, bivalvos algas, peloides, foraminíferos, etc. Su génesis corresponde con depósitos carbonatados transportados por corrientes de turbidez (Denyer *et al.*, 2014).

Su edad se ubica en Maastrichtiano superior a Paleoceno basado en correlaciones estratigráficas y contenido fosilífero (Denyer *et al.*, 2014).

Una particularidad de esta formación son sus afloramientos, ya que estos no presentan espesores constantes, son de calidad regular y se encuentran principalmente en la cima de cerros o colinas a manera de bloques o relictos (Denyer *et al.*, 2014). Este miembro se encuentra por encima del miembro San Buenaventura mediante un contacto erosivo y está sobreyacido por el miembro Cerco de Piedra de la formación Curú (Denyer *et al.*, 2014).

Formación Curú

Esta unidad es una de las más importantes en la zona de estudio, puesto que aflora, extensivamente, en la zona; principalmente en la parte Sur, a partir de playa Guiones. Esta formación fue definida por Astorga (1987) y corresponde a una secuencia depositada del Maastrichtiano al Paleoceno Inferior.

La formación Curú se describe como mezclas de arena y lodo en proporciones variables y algo de gravas. Son de origen volcánico básico (basáltico), caracterizado por la abundancia de feldespatos, carencia de cuarzo, abundancia de magnetita y minerales ferromagnéticos. Presenta cinco tipos de facies (flujos): turbulentos lodo-arenosos, turbulentos arenosos, turbidíticos retrabajados, turbulentos gravosos y escombros. Se presentan estratos métricos de areniscas gruesas oscuras con intercalaciones de estratos decimétricos de areniscas y lutitas (Astorga, 1987).

Astorga (1987) afirma con respecto a su origen que se conforma de flujos turbidíticos en los que el sedimento no entra a la cuenca en un único punto, sino a través de varios, a partir de los cuales es dispersado en forma longitudinal en una cuenca alargada y relativamente estrecha. Indica tres tipos de flujos turbidíticos: planos de cuenca, complejos lobulares y depósitos canalizados progradantes.

Esta formación sobreyace de manera discontinua a las formaciones Piedras Blancas, Santa Ana y San Buenaventura. Se encuentra sobreyacida de manera concordante por la formación Descartes y la formación Arío (Denyer *et al.*, 2014).

La muestra representativa se toma del lugar con las coordenadas: 317825,443 E; 1097562,426 N. Se cataloga como una turbidita, presenta color café, tamaño de grano arena media con estratos irregulares de lutita y arenisca gruesa, presenta estructuras de convolución.

Miembro Cerco de Piedra (Formación Curú)

En general corresponde con sedimentos arenosos y conglomerádicos de origen turbidítico. Se compone de conglomerados volcánicos regular a mal seleccionados con fragmentos angulares a redondeados de hasta 30 cm, predominantemente andesíticos, de calizas y pedernales; y presenta matriz arcillosa a limo arenosa con cemento calcáreo (Sprechmann, 1982). Esta formación sobreyace discordantemente al miembro Loma Danta y es sobreyacido por la formación Barra Honda, Miembro Zapotal y la formación Arío.

En cuanto a su edad, se le ubica en el rango de Paleoceno Medio a Superior basándose en su posición estratigráfica y en una datación realizada en la base del techo de la unidad (Rivier, 1983).

Rivier (1983) afirma que el origen de los conglomerados de la base es por flujos de gravedad en el flanco de un supuesto aparato volcánico cercano y el hecho de que se presentan lentes de caliza arrecifal son indicadores de un ambiente marino somero. Por otra parte, Astorga (1987) indica que esta unidad posee un origen turbidítico, correspondiente con facies de depósitos de flujos turbulentos gravosos y depósitos de flujos de escombros.

Para efectos de análisis de laboratorio, esta formación se incluye como parte de la formación Curú.

Formación Arío

Corresponde con una de las unidades más abundantes del área de estudio, se encuentra de manera extensiva a lo largo de la línea de costa. Esta unidad se

describe como depósitos de turbiditas de grano fino e intercalaciones de sedimentos pelágicos. Es conformado por turbiditas calcilutíticas, pelitas negras y depósitos canalizados de dos tipos, gravas basálticas y areniscas bioclásticas con macroforaminíferos. Se distinguen cuatro tipos de depósitos: de corrientes de turbidez de baja concentración, depósitos pelágicos-hemipelágicos, de flujos turbulentos arenobioclásticos de alta concentración, de flujos turbulentos arenogravosos (Astorga, 1987).

En cuanto a la edad de esta unidad, Astorga (1987) le asigna una edad Paleoceno Superior-Eoceno Superior/Oligoceno Inferior, basándose en la secuencia estratigráfica. Se correlaciona con otras unidades de manera que sobreyace concordantemente a la formación Curú y es sobreyacida, a manera de discordancia angular, por la formación Punta Pelada.

Astorga (1987) se refiere a la génesis de esta formación como depósitos de turbiditas de grano fino e intercalaciones de sedimentos pelágicos depositados por asentamiento pelágico en un ambiente de planos de cuenca, cuando disminuye el aporte turbidítico.

La muestra analizada representativa para esta formación se describe como arenisca fina con presencia de fragmentos bioclásticos de tamaño milimétrico (alrededor de un 10%), color café claro. Se obtuvo del sitio con las coordenadas: 327223,922 E; 1093123,922 N.

Formación Punta Pelada

Se refiere a una secuencia de areniscas finas, calcárea, macizas, calcarenitas bioclásticas ricas en fósiles de macroforaminíferos y equinodermos. Dengo (1962) indica que posee más de 40 m de espesor, está constituida por areniscas finas, color pardo, con muchos fragmentos de bivalvos; caliza arenácea clara, con abundantes foraminíferos y equinoideos; calcilutita y areniscas y lutitas calcáreas de color gris.

Se asoció a esta formación una muestra de areniscas finas ricas en material bioclástico y con presencia de fósiles de bivalvos y equinodermos (25 %) de color gris claro, fue tomada del sitio con las coordenadas: 316099,661 E; 1100635,275 N.

Baumgartner-Mora *et al.* (2007) confirma una edad Oligoceno Superior para esta formación basándose en estudios de nanofósiles, foraminíferos planctónicos y análisis de isótopos de estroncio.

En el área de estudio esta formación se puede encontrar en el sector de playa Pelada en sus dos extremos, tanto en punta Pelada como en punta Nosara. Su origen se atribuye, según Baumgartner *et al.* (1984), a un ambiente de energía mediana a alta en una plataforma somera; Baumgartner-Mora *et al.* (2007) añade que las calizas de esta formación representan un banco carbonatado en un ambiente marino, somero y abierto.

Formación Santa Teresa

Se refiere a una unidad conformada por sedimentos marinos someros cuya edad es Mioceno Inferior (Mora, 1985), la cual se ubica en las cercanías del poblado de Nosara y en playa Pelada y playa Nosara.

Esta unidad se describe como areniscas limpias, conglomerados líticos y calcáreos con moluscos, macroforaminíferos y algas coralígenas (Baumgartner *et al.* (1984); además Mora (1985) indica que es una secuencia de 80 m, con varias capas de areniscas finas y gruesas bien estratificadas y secuencias mal estratificadas con conglomerados fosilíferos, con estratos que pueden variar su espesor. Se presenta también estratificación cruzada, festoneada y cruzada planar de gran ángulo.

La formación Santa Teresa sobreyace a la formación Arío y a la caliza con foraminíferos de la formación Fila de Cal. Su génesis, según Calvo (1987), se atribuye a cuatro sistemas deposicionales bien definidos: a) deltaico, b) "fan delta", c) ensenadas estuarinas y d) barras arenosas carbonatadas. Corresponde con un ambiente somero con gran cantidad de bioturbación.

Se localiza un afloramiento de esta formación, de donde se extrae una muestra de areniscas medias de color pardo y con presencia de fósiles de moluscos y macroforaminíferos (10%). Se toma del punto con las coordenadas: 315921,450 E; 1101746,494 N.

Formación Cóbano

Son rocas de origen continental que afloran en el sector de Nosara y en las cercanías de playa Pelada. Denyer *et al.* (2014) la describe como depósitos de abanicos aluviales y terrazas conformadas por conglomerados, con clastos volcánicos del Complejo de Nicoya, pedernales rojos y amarillos, en una matriz arenosa o arcillosa de colores rojizos.

Estratigráficamente se encuentra por encima de la formación Montezuma. Su edad es de finales del Plioceno a inicios del Pleistoceno.

Su origen se debe a un fuerte proceso de erosión y peneplanización de las rocas del Complejo de Nicoya y de la cobertura sedimentaria del Paleógeno, también al levantamiento de la península de Nicoya, lo cual contribuyó a la depositación de materiales gruesos y la alteración y denudación de las rocas del Complejo y la cobertura sedimentaria Paleógena (Denyer *et al.*, 2014).

Esta formación no se incluye en el muestreo debido a que aflora en sitios puntuales, no es de gran relevancia regionalmente.

2.3 Información acerca de la RN-160

La ley No. 4786 de la República de Costa Rica, delega al MOPT funciones como la construcción, mantenimiento y mejoramiento de las rutas nacionales, por tal razón el MOPT es la institución encargada del cuidado de la RN-160.

La carretera posee una longitud de 229 km en total, su trazo bordea la península de Nicoya. Esta recorre la mayoría de las zonas costeras de la península,

iniciando en playa Naranjo y recorriendo el anillo costero de la península de Nicoya hasta llegar a la ciudad de Santa Cruz.

Por el área de estudio pasan aproximadamente 45 km de la carretera, de los cuales un total de 22 km son analizados por las metodologías empleadas, esto corresponde con los segmentos de la RN-160 que ingresan al área con disponibilidad de datos *LiDAR* y a su vez los 22 km más cercanos a la línea de costa.

Las siguientes son las secciones de control, definidas por el MOPT, que se encuentran dentro del área de estudio: 50460, 50600, 50591, 50592, 50580 y 50573. Aunque para efectos de este trabajo, se trabaja con cinco secciones definidas a conveniencia, esto se debe a que son cinco las secciones de carretera que tienen disponibilidad de datos *LiDAR* (Figura 15).

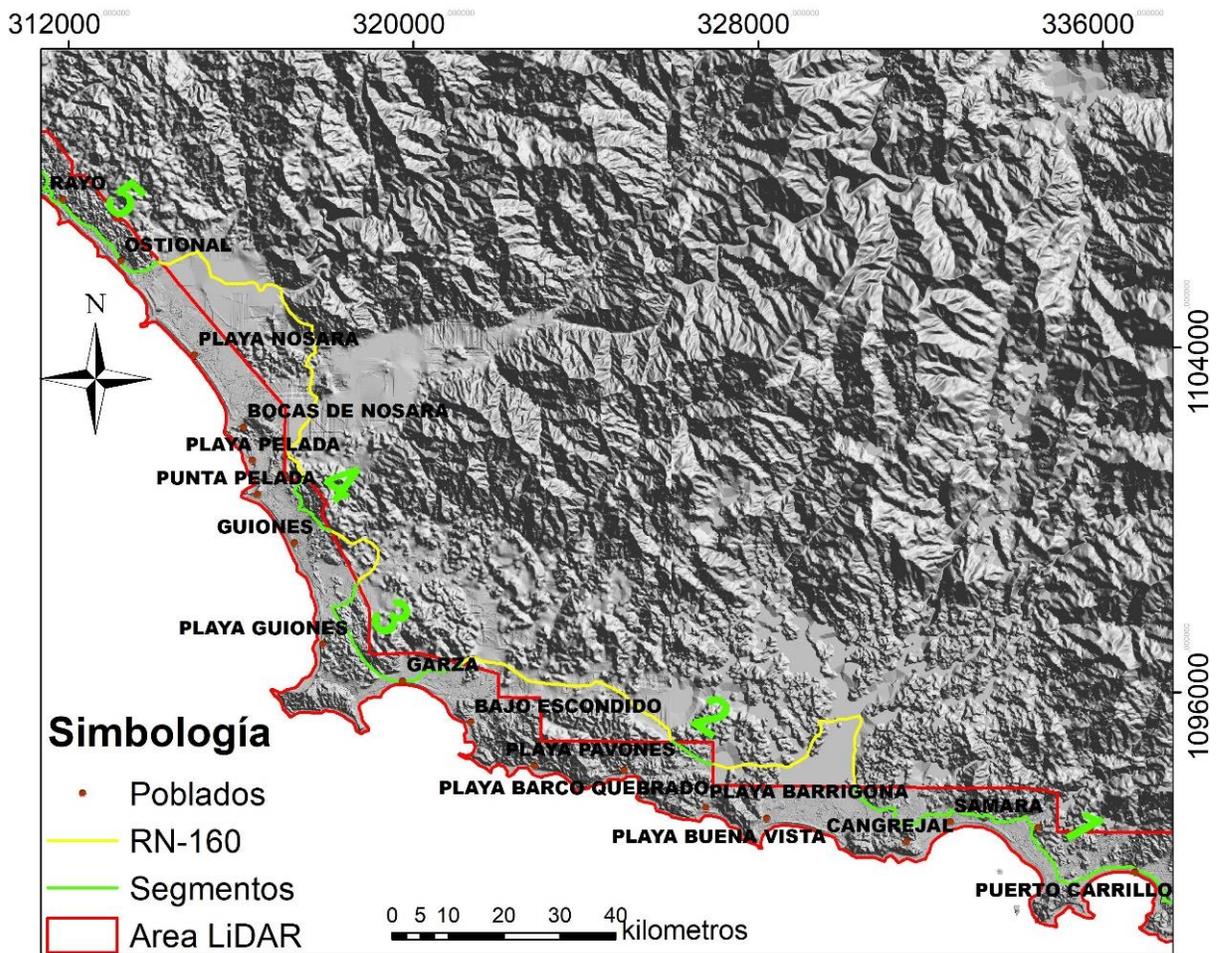


Figura 15. Segmentos definidos de la RN-160.

Es importante aclarar que el segmento 1 se encuentra asfaltado por completo (9,6 km), también en el segmento 3 hay 1,7 km de carretera asfaltada. Los demás segmentos poseen carretera de lastre. Por lo tanto, de los 22 km de carretera que se analizan, 11,3 km se encuentran asfaltados y 10,7 km corresponden con carretera de lastre. Además, en los sectores 3 y 4 el asfaltado de la carretera está por ejecutarse (MOPT, 2018).

CAPÍTULO III

3. Geomorfología

En este capítulo se delimitan y caracterizan las formas del relieve, también se clasifican según los procesos externos que las originan. Con tal fin se utilizan datos *LIDAR* para la identificación de diferentes unidades geomorfológicas. Se describe su génesis, distribución, composición, pendientes y altitudes que presentan. Además, se introducen temas relacionados a esta como: la hidrografía y el clima.

3.1 Relevancia de la geomorfología para el estudio

La distribución espacial de las geofomas en el espacio de estudio resulta de gran importancia para prácticamente todas las etapas de este proyecto. En primera instancia, nos indica dónde se ubica la línea de costa y específicamente las playas, en las cuales se va a trabajar el IE-SC; además de las zonas de manglar que corresponden muchas veces con desembocaduras de ríos, que podrían afectar la dinámica sedimentológica de la costa. También podemos saber, a partir de esto, cuáles sectores la RN-160 se encuentra cerca de las formas anteriormente mencionadas, ya que estos serían los puntos de mayor interés debido a que la carretera se encontraría más cerca de lugares con posible erosión.

Posteriormente, a partir de la geomorfología podemos diferenciar entre sustrato blando y sustrato rocoso (materiales no consolidados y materiales consolidados). Básicamente las morfologías catalogadas como cerros denudacionales, plataformas de abrasión y acantilados corresponderían a sustrato rocoso y las formas como manglares, playas y planicies aluviales o marinas caerían dentro de lo que se considera como sustrato blando. Esto es importante debido a que nos ayuda en la definición de algunos parámetros como el de geología.

En cuanto al análisis de los posibles escenarios si hay elevación del nivel del mar, el conocimiento previo de las morfologías presentes nos ayuda a saber cuáles son los sectores con menor altitud (por lo general playas, manglares y planicies) que serían, eventualmente, los más afectados por inundación marina.

También, al localizar las zonas de manglar sabemos que estas actúan como una barrera natural ante la erosión, ya que son capaces de disminuir el daño por inundaciones, estos disipan la energía proveniente del constante impacto de las olas y protegen ante eventos como tormentas, huracanes, mareas muy altas, tsunamis, ascenso del nivel del mar. Los manglares además son creadores de nuevos suelos. La vegetación de este tipo incentiva la sedimentación mediante la reducción de la energía de la ola y la disminución de la velocidad del flujo de agua, de esta manera hace que la capacidad del agua para acarrear sedimentos hacia afuera de la zona de manglar sea menor. Esta disminución de los flujos y la velocidad del agua también ocasiona que sedimentos en suspensión precipiten y se forme suelo (Spalding M. *et al.* 2014).

3.2 Uso de datos cartográficos y *LiDAR*

Para el presente proyecto se utiliza como base topográfica datos de tecnología *LiDAR*. Se trata de información del terreno obtenida mediante percepción remota y que posee diversos usos, entre ellos: cartografiar la topografía de superficies extensas cuando es aerotransportado, o zonas u objetos de menor tamaño cuando se usa en tierra. Se encuentra disponible desde hace varias décadas, pero ha sido en los últimos quince años, que al complementarse con otras tecnologías como: GPS, computadoras, fotografía digital de gran formato, y nuevos softwares; que ha evolucionado hasta el punto de poder generar MED con altos grado de detalle y resolución en el orden de centímetros a milímetros. Las imágenes *LiDAR* se encuentran acompañadas de ortofotografías de muy alta resolución (entre 10 y 15 cm). Además, deberían estar sin presencia de nubosidad en casi la totalidad

del área de estudio. Estas fotografías permiten interpretar con mayor facilidad la realidad de la zona (Ruiz *et al.* 2014).

En este caso, se utilizará durante el proyecto una base de datos *LiDAR* con resolución de entre 3 y 4 puntos por m², el cual se cataloga como densidad media, y se obtiene con una sola pasada de la aeronave, en un ancho de banda de barrido de hasta 800 m. Con los productos generados con esta densidad de puntos, en los MED se pueden apreciar carreteras, ríos, quebradas, edificaciones y se pueden distinguir varios tipos de vegetación (Ruiz *et al.* 2014).

El barrido del *LiDAR* ha sido trazado paralelo a la costa en el año 2014 y estos datos fueron obtenidos por la CNE. Su costo ronda los 1000-1500 dólares por kilómetro cuadrado, lo cual hace que pocas entidades puedan adquirirlo.

Los MED generados a partir de datos *LiDAR* y complementados con las ortofotos que acompañan a estos datos, tienen varios usos:

- Se utilizan como base topográfica para la totalidad del proyecto.
- Se observa la posición de la carretera con respecto a la línea de costa.
- Contribuyen a crear los modelos de ascenso del nivel del mar.
- Digitalización de las unidades del mapa geomorfológico.

Además de los datos *LiDAR* se utiliza una base cartográfica de diversa índole para llevar a cabo este proyecto; información como: carreteras, edificaciones, cuencas, red de drenaje, poblados, entre otros; los cuales son fundamentales para la realización del proyecto. Como fuentes proveedoras de datos utilizamos: IGN, SNIT, Lanamme UCR, Atlas Digital de Costa Rica 2014, Misión TERRA, Google Earth, etc. Hay información necesaria que no se encuentra disponible en ninguna fuente o no existe, por lo tanto, será necesario digitalizarlos como *shapefiles* mediante la utilización de SIG, basado en bibliografía, fotografías aéreas y datos de campo.

3.3 Aspectos generales de la geomorfología en la zona de estudio

En este apartado se detallan los aspectos más relevantes con respecto a la geomorfología del área elegida, se describen las formas de mayor importancia, se clasifican y se elaboran mapas que despliegan su distribución espacial.

Para el análisis de los procesos de erosión que ocurren en la costa es indispensable el conocimiento, a detalle, de la geomorfología de la región, la cual se compone de diversas geoformas cuyos orígenes varían. Entre las morfologías más comunes del área de estudio se encuentran: acantilados, playas, cerros, planicies de origen aluvial o marino, ríos, entre otras.

Para determinar cuáles morfologías se encuentran en la zona de estudio y dónde se presentan, se realizó trabajo tanto de oficina como de comprobación de campo; se observaron fotografías aéreas, curvas de nivel, modelos de elevación digital, entre otros recursos para así delimitar las regiones correspondientes a cada una de las geoformas.

3.4 Clima

IMN (2008) define las regiones climáticas del país, a partir de lo cual se puede ubicar al área de estudio dentro de la región Pacífico Norte, específicamente en su unidad peninsular. La época seca sucede desde diciembre hasta marzo. Los vientos alisios son predominantes; el mes de abril es de transición a la época lluviosa y en mayo se establecen por completo las lluvias. Existen dos periodos de lluvias marcados, el primero es entre mayo y agosto y precipita el 50% del total anual; entre julio y agosto se da un “veranillo” provocado por la intensificación de los vientos alisios. Durante setiembre y noviembre se da el mayor aporte de lluvia en el año, donde precipita el 46% aproximadamente del total anual (Figura 16).

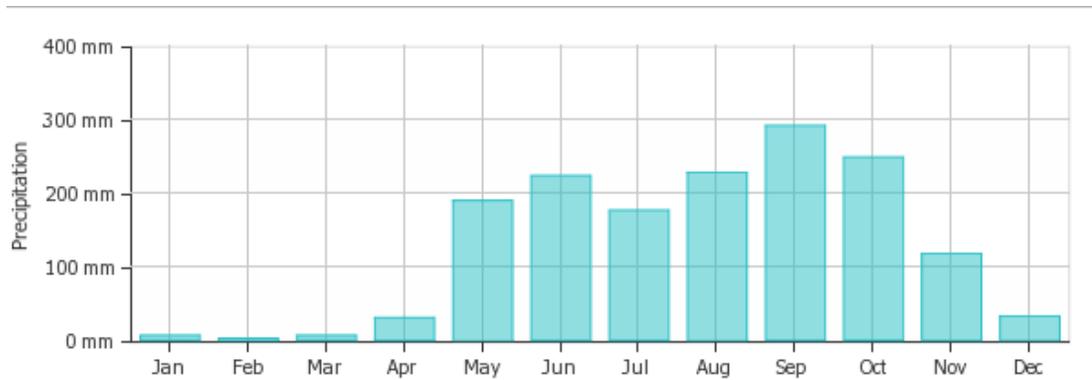


Figura 16. Precipitación mensual en mm para el área de estudio. Tomado de IMN (2008).

Durante la época lluviosa es posible que se modifiquen los patrones de precipitación debido a tormentas o huracanes, puede que estos se vean aumentados significativamente, al punto de que en cuestión de pocos días se puede superar la precipitación promedio de todo un mes. Lo anterior sucedió durante la tormenta tropical Nate entre el 4 y el 6 de octubre de 2017, donde, en Guanacaste, cayeron hasta 400 mm de lluvia en ese periodo, lo cual superó la precipitación promedio del mes de octubre. Este exceso de precipitación aunado a la saturación de los suelos ocasionó daños en la región como: cortes en los servicios básicos, inundaciones y personas fallecidas (Voz de Guanacaste, 2017). Las desembocaduras de los ríos y morfologías en la playa en zonas aledañas a las desembocaduras se ven modificadas debido a la cantidad de agua que drenan los ríos después de una tormenta como Nate, este efecto es considerado en la elaboración del IE-SC.

Algunas de las características principales en cuanto al clima de esta región según Orozco (2007) son: Elevadas temperaturas (28° en promedio), régimen pluviométrico regular (105-120 días de lluvia al año), elevaciones bajas con muchas irregularidades en el interior de la península (promedio de elevaciones: 288 m.s.n.m.).

3.5 Hidrografía

En el área de estudio, se encuentran varias cuencas con ríos que drenan todos en el océano Pacífico. Se presentan en general drenajes en zonas montañosas, planicies y frentes costeros. Las alturas son relativamente bajas, sin superar los 150 msnm.

La red de drenaje de la zona de estudio está compuesta por la parte baja de la cuenca de drenaje de algunos ríos principales y pequeñas cuencas de algunas quebradas de menor importancia y drenajes intermitentes; algunas de estas quebradas recorren unos cuantos cientos de metros y caen al mar o fluyen hacia la planicie aluvial hasta infiltrarse o aportar a los ríos de mayor tamaño (Figura 17).

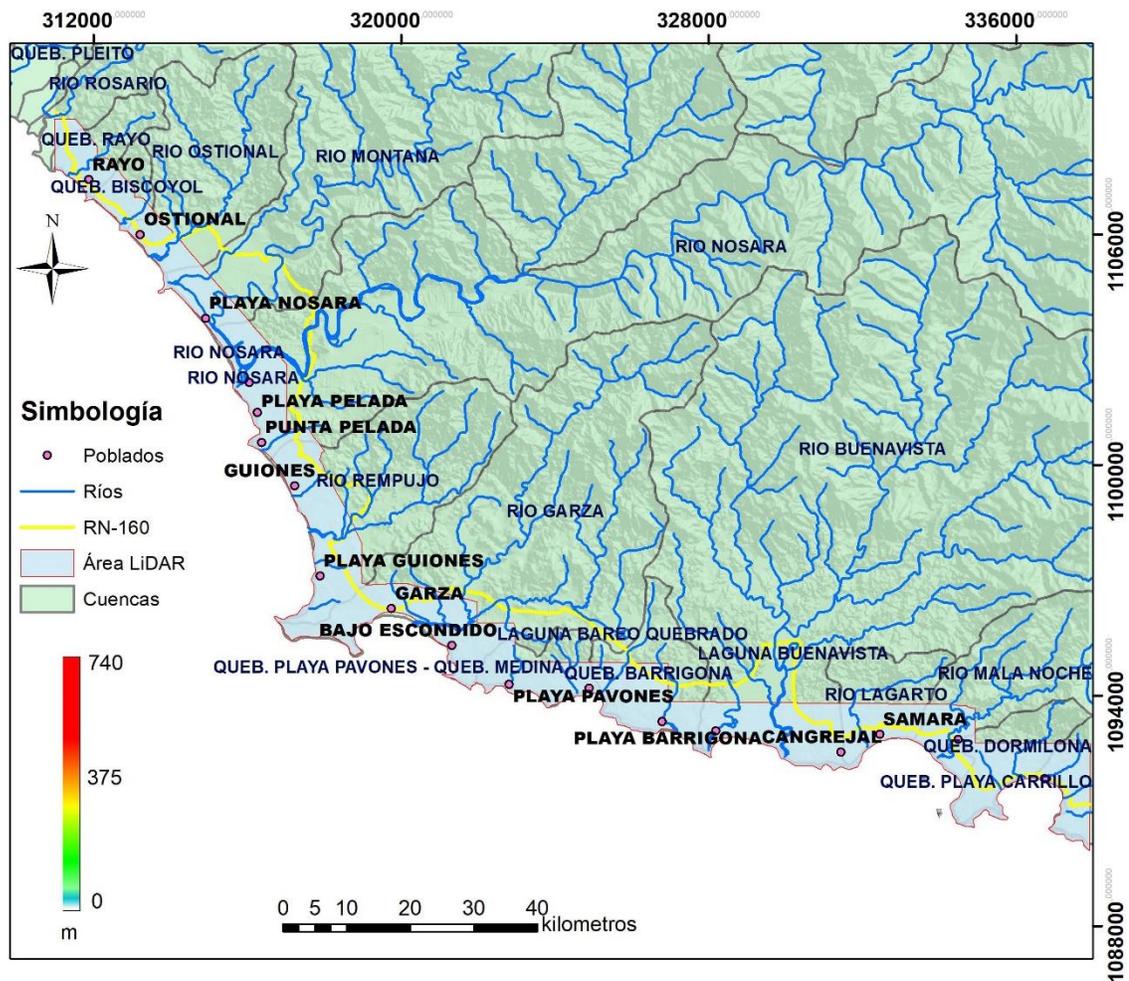


Figura 17: Hidrografía de la región.

Los ríos principales son: Nosara, Montaña, Ostional, Garza, Rempujo, Buena Vista, Malanoche y Rosario. Entre las quebradas y ríos más pequeños que también se localizan en la zona de estudio tenemos: Quebrada Carrillo, Dormilona, Lagarto, Pavones, Medina, Biscoyol y Rayo.

Como regla general, los ríos de mayor tamaño se encuentran sobre planicies aluviales y poseen patrones de drenaje meándricos y las quebradas y ríos de menor tamaño presentan patrones de drenaje dendríticos, paralelos, trenzados o reticulados.

Muchos de estos cauces, en ocasiones, dificultan el paso por la carretera (ya sea la RN-160 o los caminos secundarios), puesto que no todos poseen puentes y cuando el caudal es alto es imposible pasar, lo cual puede dejar a ciertas comunidades incomunicadas; también se convierte en un problema para la logística de este proyecto ya que algunos caminos, que son los accesos principales para las playas, cruzan estos ríos. En la época seca estos pueden encontrarse sin agua en su totalidad, lo cual hace que el paso por los que no poseen puente se facilite.

El aporte de estos ríos hacia el mar es relevante para este trabajo, debido a que estos afectan de manera directa la dinámica costera, principalmente cerca de las desembocaduras. Cuando el caudal es alto, hay exceso de aporte de agua con materiales abrasivos, lo cual puede incrementar la erosión en las zonas aledañas; además los ríos tienen la capacidad de modificar los patrones de sedimentación en las cercanías, por ejemplo, si hay un exceso de aporte de sedimento, este se depositaría en el mar ocasionando barras arenosas o bancos de arena que pueden revertir el efecto erosivo del mar o más bien alterar las corrientes costeras y afectar zonas distintas.

3.6 Unidades geomorfológicas

Las unidades geomorfológicas que se presentan en el área se clasifican a continuación, según su génesis, bajo los criterios expuestos por Van Zuidam (1986):

Origen denudacional

- Cerros de pendiente moderada a baja y cerros relictos:

Esta unidad se encuentra a lo largo de toda el área de estudio, en general en la zona más retirada de la línea de costa, aunque en ocasiones también se encuentra justo al frente de la costa. Se encuentra conformada por rocas de diferente tipo, tanto sedimentarias como ígneas con presencia de diversas formaciones geológicas, además poseen diversos orígenes que son relacionados con los tipos de roca presentes y también con la fuerte tectónica que se presenta en la zona de estudio (Figura 18).

En este caso, el proceso de mayor importancia es la denudación, pero muchos de estos cerros y colinas son formados en primera instancia por fallamiento activo y levantamiento producto de la tectónica de la región. Se puede mencionar los cerros al Norte de los poblados de Guiones, Pelada y Nosara que son originados por levantamiento de la península sumado al *Pull Apart* Nosara, los cerros frente a playa Barrigona y Barco Quebrado que son influenciados por las fallas Quirimán y Crucivallejo, además existen muchos cerros que son productos de una tectónica compleja que combina paleotectónica desde el Cretácico Superior, eventos de plegamiento y neotectónica (Denyer *et al.* 2014). Con respecto a las formaciones geológicas, se han identificado las siguientes formaciones en estos cerros: Complejo de Nicoya, Sabana Grande, Piedras Blancas, Curú, Cerco de Piedra, Arío, Punta Pelada, Santa Teresa y Cóbano.

La topografía es en general ondulada y las pendientes van desde los 10° hasta los 45°, es posible que algunos de estos cerros presenten pequeños deslizamientos de menor importancia o reptación. Los patrones de drenaje son dendríticos en su mayoría y algunos paralelos, posiblemente asociados a la gran cantidad de fallas presentes en el área. Estos drenajes en ocasiones aparecen como microcuencas de pocos cientos de metros o kilómetros de distancia, con ríos cortos que desembocan directo al mar y no en ríos de mayor tamaño. La elevación máxima corresponde con los cerros frente a la costa al Oeste de playa Barco Quebrado, los cuales alcanzan hasta 135 m s.n.m.

Algunos cerros relictos se presentan como producto de la erosión de estos cerros de pendiente moderada a baja, ocasionados por erosión que causan los ríos de mayor tamaño de la zona.

También se presentan piedemontes, localizados en la base de las montañas y elevaciones, que son remanentes de la denudación que afecta a las mismas, estos presentan tamaños muy pequeños debido a que las altitudes son bajas; además no son de gran relevancia, por lo que no se tratan como una unidad separada.

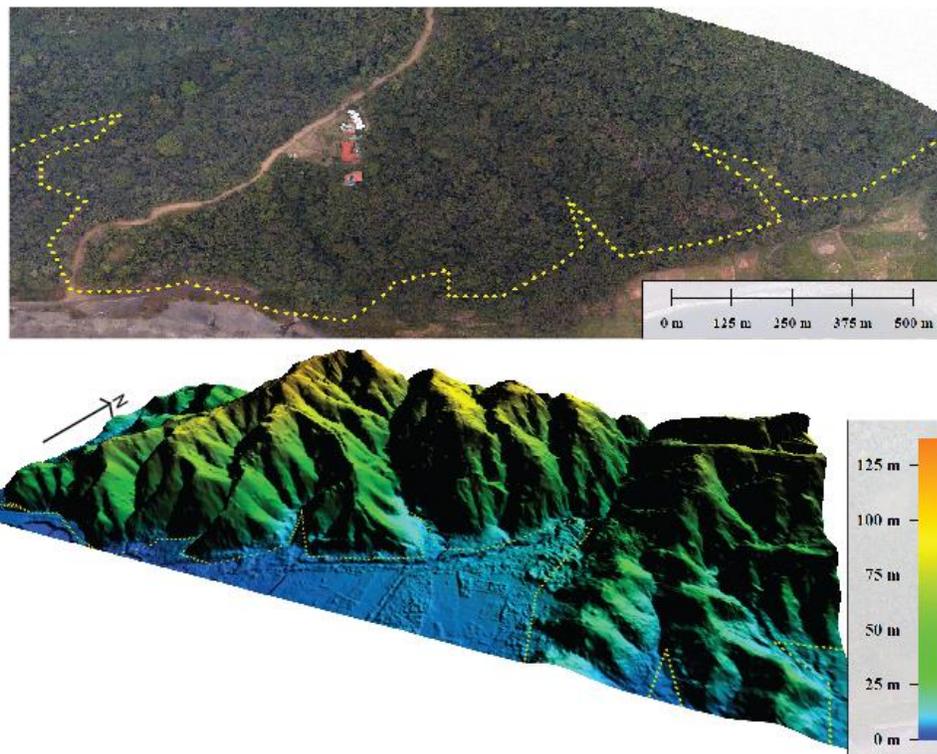


Figura 18. Ejemplo de geoforma cerros de pendiente moderada a baja y cerros relictos. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geoforma.

Origen fluvial

- Planicies aluviales

Se ubican a lo largo de toda el área de estudio y son las unidades de mayor extensión que se presentan en el área de estudio. Comprende áreas aplanadas con muy bajas altitudes (menores a 30 m s.n.m.) y pendientes menores a 10°. Por lo

general se encuentran en el espacio entre los piedemontes y la línea de costa (Figura 19).

Son constituidas por variedad de materiales no consolidados, que van desde limos hasta gravas que son depositados durante las inundaciones de los ríos que las forman, los cuales rellenan la topografía previa. Debido a lo anterior la edad de estas morfologías es Cuaternario.

Las de mayor importancia son las formadas por los ríos: Nosara, Montaña, Ostional, Rempujo, Garza, Buena Vista y Malanoche. Algunas de las planicies pueden tener también un origen marino parcial o total, principalmente las que se ubican frente al litoral, pero en este trabajo se clasifican dentro de la misma unidad.

Estas planicies pueden verse inundadas parcial o totalmente durante periodos de alta precipitación, como por ejemplo la planicie del río Nosara, que sufre inundaciones periódicamente. Los patrones de drenaje son en su mayoría meándricos, principalmente en los ríos de mayor caudal, aunque se presentan otros patrones de drenaje como: dendrítico, paralelo y enrejado.

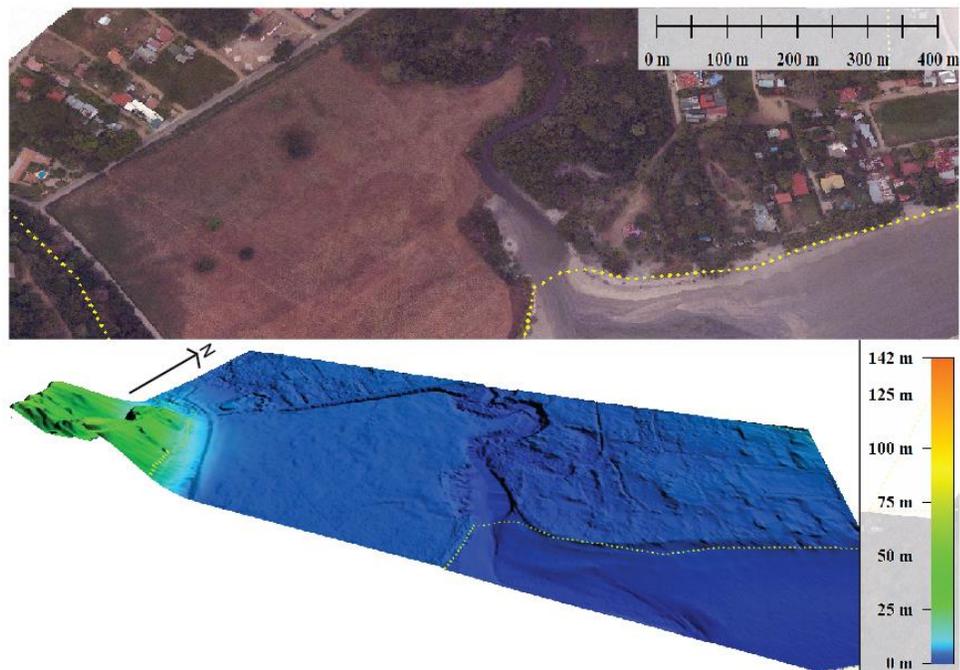


Figura 19. Ejemplo de geoforma planicies aluviales. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geoforma.

Origen marino

- Zonas de manglar

Se encuentran distribuidas a lo largo de toda la zona de estudio, en planicies y siempre frente a la línea de costa (Figura 20). Secciones rocosas del frente de la línea de costa como lo son: Bajo Escondido, Punta Pavones y Punta Barco Quebrado; carecen de zonas de manglar. Individualmente, cada una cubre un área desde unos pocos metros cuadrados hasta $0,3 \text{ km}^2$, solo hay una zona de manglar que posee área de mayor tamaño con respecto a las otras, la cual se encuentra frente a playa Nosara, asociada al río Nosara, esta mide cerca de 1 km^2 .

El patrón de drenaje es dendrítico y en ocasiones meándrico debido a las planicies y bajas altitudes.

Para su existencia debe de haber influencia tanto de agua dulce como salada, por lo tanto, estos se encuentran asociados a los ríos y quebradas que desembocan en el área de estudio, debido a lo anterior las zonas de manglar poseen edad Cuaternario. Los sedimentos que conforman estas unidades corresponden con limos y arcillas, y en menor cantidad arenas, los cuales resultan en la formación de nuevos suelos, esto debido a que las raíces de ciertas especies de vegetación tipo Mangle atrapan los sedimentos de las aguas que circulan a través de ellas.

Las zonas de manglar albergan gran cantidad de vida silvestre, son zonas boscosas ya que el agua abunda; poseen también muchos tipos de fauna, en la zona de estudio principalmente aves, cocodrilos, serpientes y mamíferos pequeños. Las que se encuentran en las playas Ostional, Nosara, Guiones, Pelada y Garza se encuentran protegidas por el Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional. Las mismas son utilizadas para actividades turísticas.

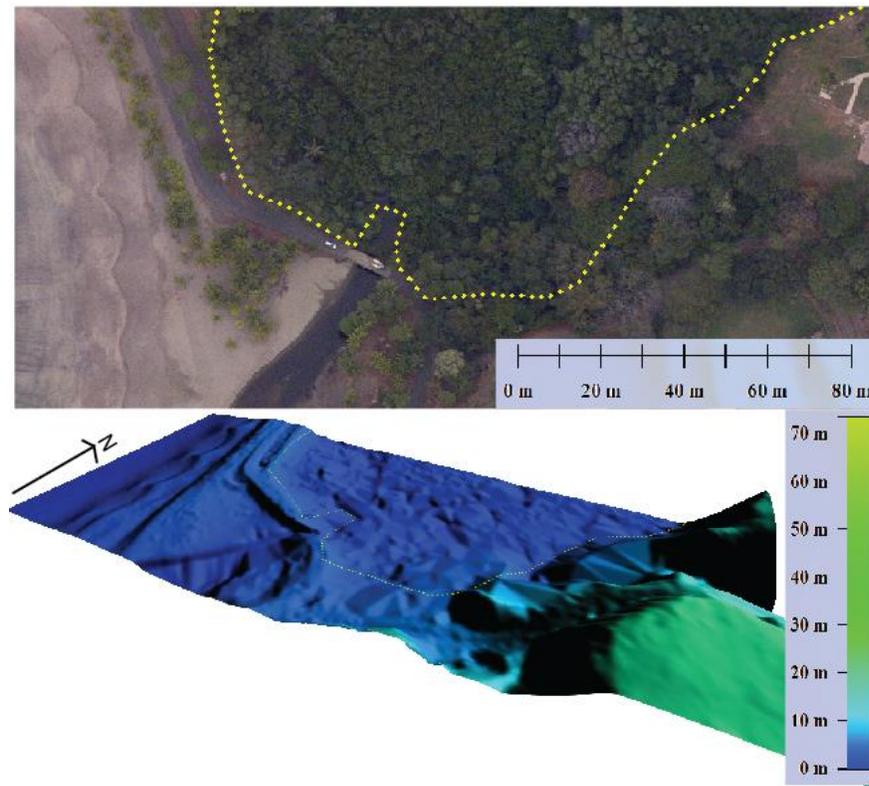


Figura 20. Ejemplo de geoforma manglar. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geoforma.

- Playas

Por lo general son de composición arenosa, pero hay algunas de tipo mixto donde se presenta sedimento inconsolidado (biogénico y clástico) y formaciones rocosas, como plataformas de abrasión (Figura 21). Corresponde con una zona muy dinámica, que presenta cambios estacionales debido a la influencia de factores como: mareas, corrientes litorales, marejadas, tormentas, dinámica fluvial, viento, entre otros. Estos constantes cambios hacen que sea de importancia monitorear los cambios no estacionales en las playas, ya que eventos como remoción de sedimento de estas puede ocasionar daños en infraestructura cercana.

Como rasgo general, las playas al Norte del área de estudio, en este caso las que se encuentran al Norte de punta Guiones, corresponden con playas de mayor longitud, con una línea litoral más uniforme y recta, además que la cantidad de roca expuesta y plataforma de abrasión en estas es menor. Por otra parte, las playas al

Sur de punta Guiones presentan una línea litoral más irregular, donde se presenta mayor cantidad de plataforma de abrasión, acantilados y roca aflorante; las playas se presentan en general con forma de bahía. Existe una clara diferencia entre las playas del Norte y el Sur del área de estudio y esta se atribuye al contexto geotectónico de la región. La playa con mayor longitud es Guiones, con poco menos de 6 km, las de menor longitud son Barrigona y Barco Quebrado, ambas miden menos de 1 km.

Las pendientes en las playas son muy variables, y dependen de factores como: granulometría, oleaje, corrientes, presencia de ríos, entre otras variables; el rango de pendientes es entre 1° y 25° . Las altitudes van desde los 0 m s.n.m. hasta aproximadamente 8 m s.n.m.

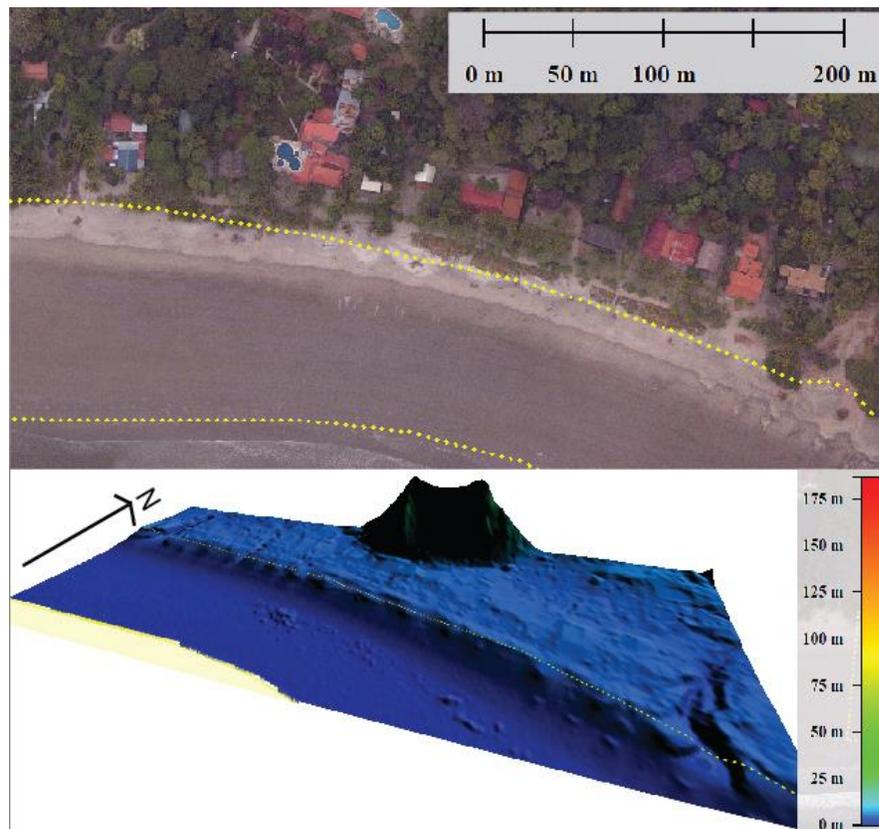


Figura 21. Ejemplo de geoforma playas. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geoforma.

- Acantilados

Se ubican frente a la costa, concentrados principalmente al Sur de la zona de estudio, desde punta Guiones hasta punta Carrillo, aunque también se presentan unos pocos de menor altitud en playa Pelada y en la parte Norte de playa Ostional (Figura 22). Su altitud es variada, oscila entre los 10 m hasta los 100 m, como es el caso del acantilado frente a playa Barrigona. En cuanto a longitud, alcanzan hasta 1300 m de largo, como se da en el acantilado de punta Matapalo. Las pendientes mínimas rodean los 40° y las máximas alcanzar y superar los 90°, en promedio superan los 70°.

Son constituidos por rocas de diversos tipos, en su mayoría sedimentarias, pero también se dan en rocas ígneas (Complejo de Nicoya) como sucede en los que se ubican en punta Carrillo y punta Rayo. Su génesis es variada, se forman en primera instancia debido al levantamiento de la Península de Nicoya, el cual inició hace aproximadamente 80 Ma y posteriormente son esculpidos por la denudación y tectónica que afecta a las rocas del área y finalmente por el constante oleaje al que están expuestos en su mayoría.

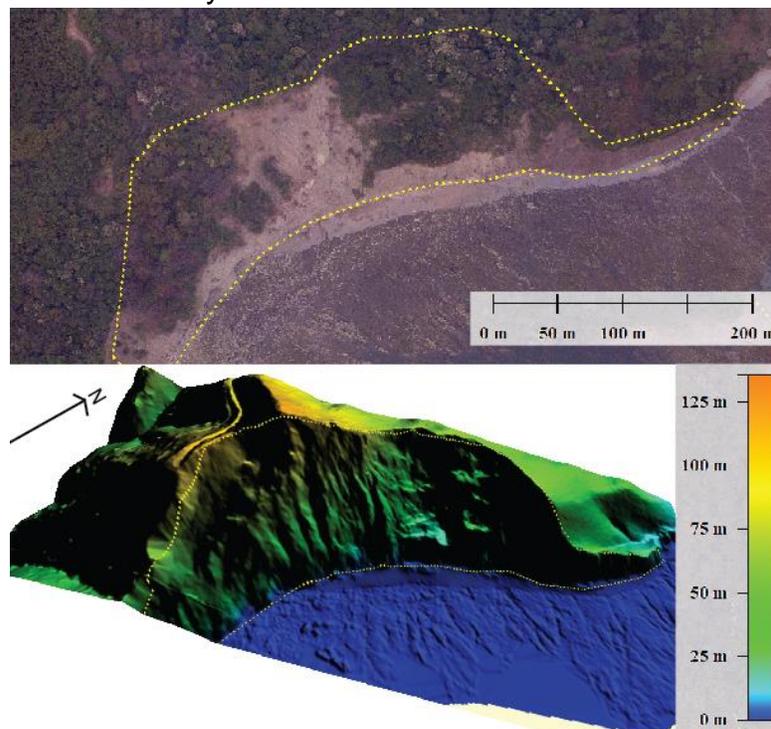


Figura 22. Ejemplo de geofoma acantilados. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geofoma.

- Plataformas de abrasión

Corresponde con porciones de roca, que ha sido erosionada y en parte aplanadas por la acción de las olas. Por lo general se encuentran expuestas en su totalidad durante la marea baja, pero en la marea alta pueden estar totalmente cubiertas de agua, ya que se encuentran al nivel del mar o alturas menores (Figura 23). Las pendientes son muy bajas, hasta los 3° aproximadamente.

Se originan por la erosión de los acantilados del frente costero, por lo tanto, por esta razón su edad puede ser tan antigua como el levantamiento de la Península de Nicoya. Las rocas que las constituyen son, al igual que los acantilados, mayoritariamente sedimentarias, pero con presencia de rocas ígneas del complejo de Nicoya en algunos sectores. Al igual que los acantilados, se presentan en su mayoría en la parte S de la región en estudio, y como parches aislados en la parte N. La de mayor extensión posee 2,2 km de largo, las de menor extensión pueden tener unos pocos metros de largo.

Estas morfologías pueden ser un elemento que atenúe la erosión en un segmento de la línea de costa, debido a que disipa la energía de las olas.

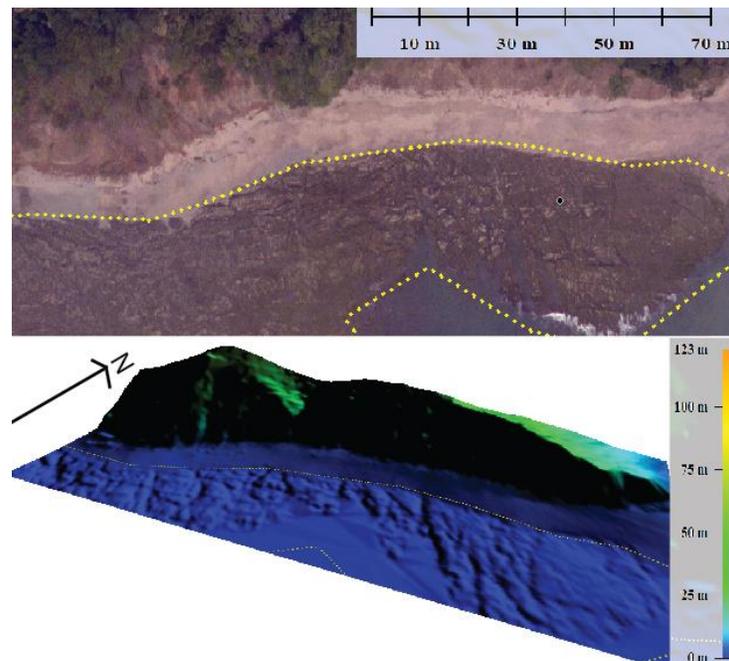


Figura 23. Ejemplo de geoforma plataforma de abrasión. Se muestra en la parte superior una fotografía aérea de la morfología y en la parte inferior en MED *LiDAR*. La línea amarilla delimita la geoforma.

Origen antropogénico

Gracias a la alta resolución de los datos *LiDAR* es posible detectar morfologías en el terreno que han sido creadas por el ser humano. Para la franja costera entre playa Carrillo y Ostional se logran identificar, mediante el modelo de elevación digital, carreteras, tajos, poblados y pistas de aterrizaje. En los mapas geomorfológicos no se incluyen las formas de origen antropogénico puesto que estas se ubican encima de otras unidades geomorfológicas naturales, por ejemplo, un tajo se encuentra sobre la morfología cerro; además, no son relevantes para efectuar la metodología utilizada. El único rasgo antropogénico que aparece en los mapas geomorfológicos corresponde con la RN-160. Aunque estas sí se consideran en el presente estudio, específicamente en el parámetro de cobertura de suelo, donde se clasifican como zonas rurales o urbanas y se les asigna un valor de susceptibilidad (Sección 4.2).

- Carreteras

La RN-160 es fácilmente identificable, se observa como una línea que pasa frente a la línea de costa atravesando de Este a Oeste el área de estudio. Además, se logran identificar carreteras secundarias a lo largo de toda el área estudiada. En la figura 24 se muestra una imagen del MED y se señala la forma de la RN-160 y de una carretera secundaria. Únicamente la RN-160 se incluye en los mapas debido a que el presente trabajo se centra en estudiarla.

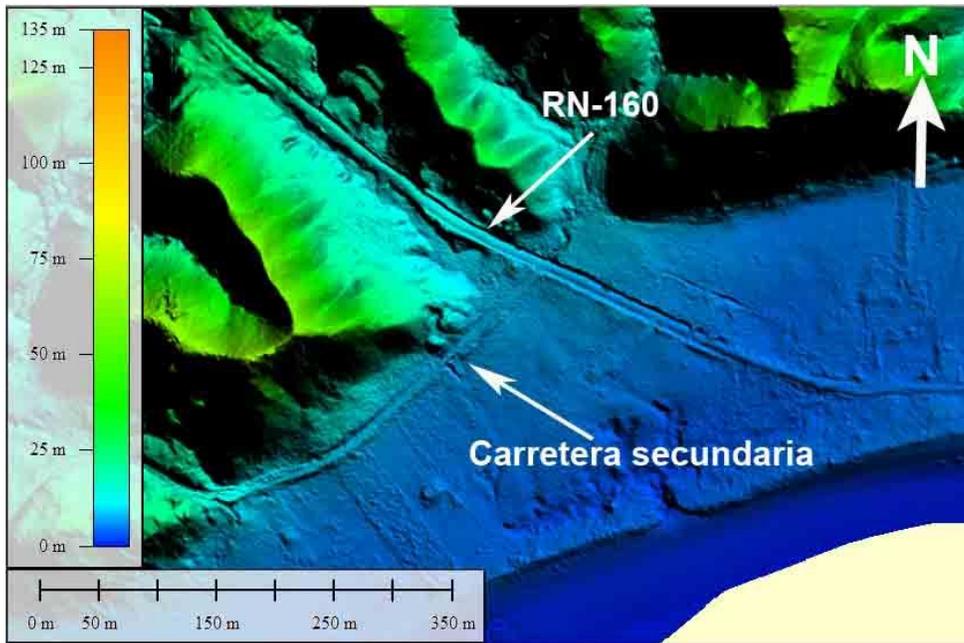


Figura 24. Vista de las carreteras en el MED *LiDAR*.

- Tajos

Se localiza un único tajo en toda el área de estudio, se encuentra al este de la comunidad de Ostional, en las coordenadas: 313715,69 E; 1105818,05 N. Se trata del corte en un cerro donde aflora la formación Piedras Blancas (Figura 25).

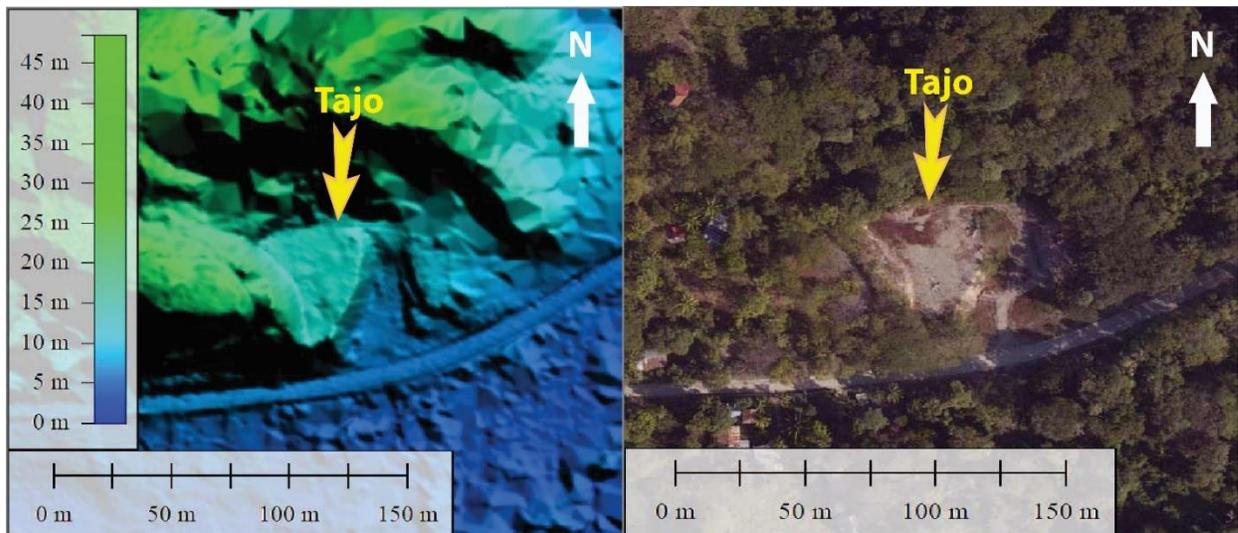


Figura 25. Vista de un tajo en el MED *LiDAR*. La foto de la izquierda muestra el tajo en el MED y la foto de la derecha muestra el mismo tajo pero visto desde la fotografía aérea.

- Asentamientos humanos

Se encuentran distribuidos de manera irregular a lo largo de toda el área de estudio. Corresponde con sitios donde existen edificaciones: casas, hoteles, restaurantes, plazas de deportes, entre otros (Figura 26).

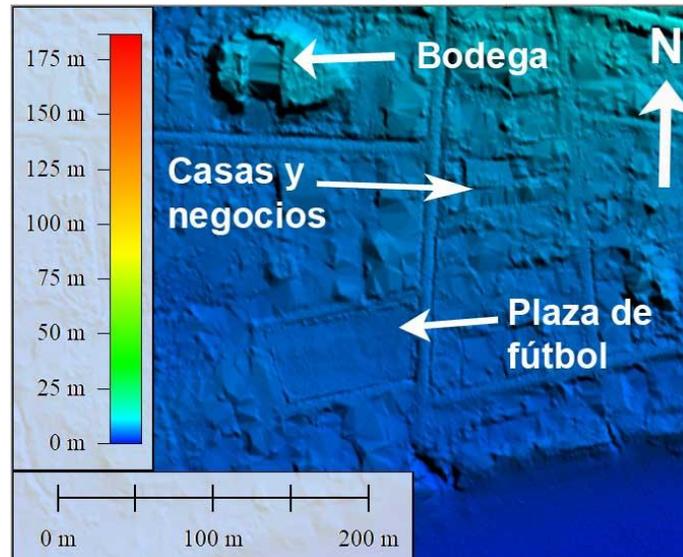


Figura 26. Vista del MED LiDAR de un asentamiento humano. MED del poblado de Sámará.

- Pistas de aterrizaje

Se localizan dos pistas para aterrizaje de avionetas en el área de estudio, una en la comunidad de Buena Vista y la otra frente a playa Carrillo (Figura 27).

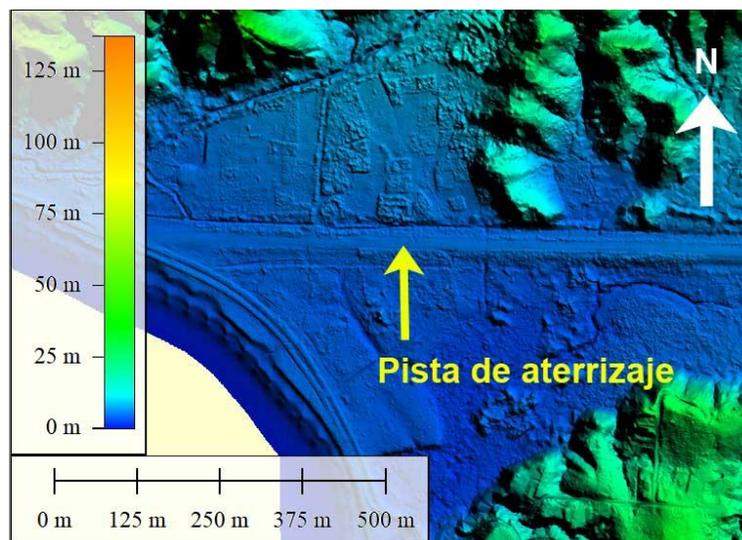
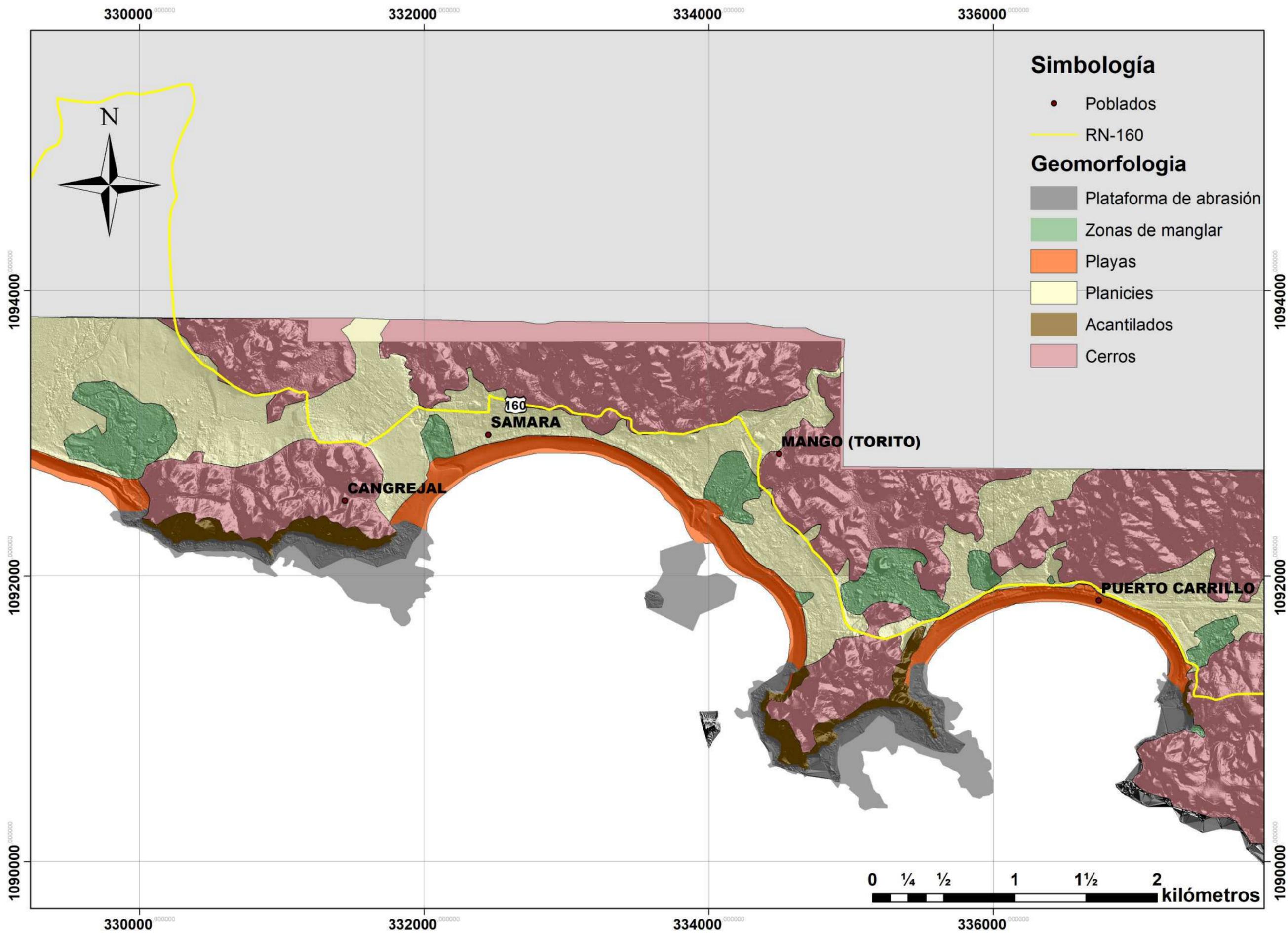
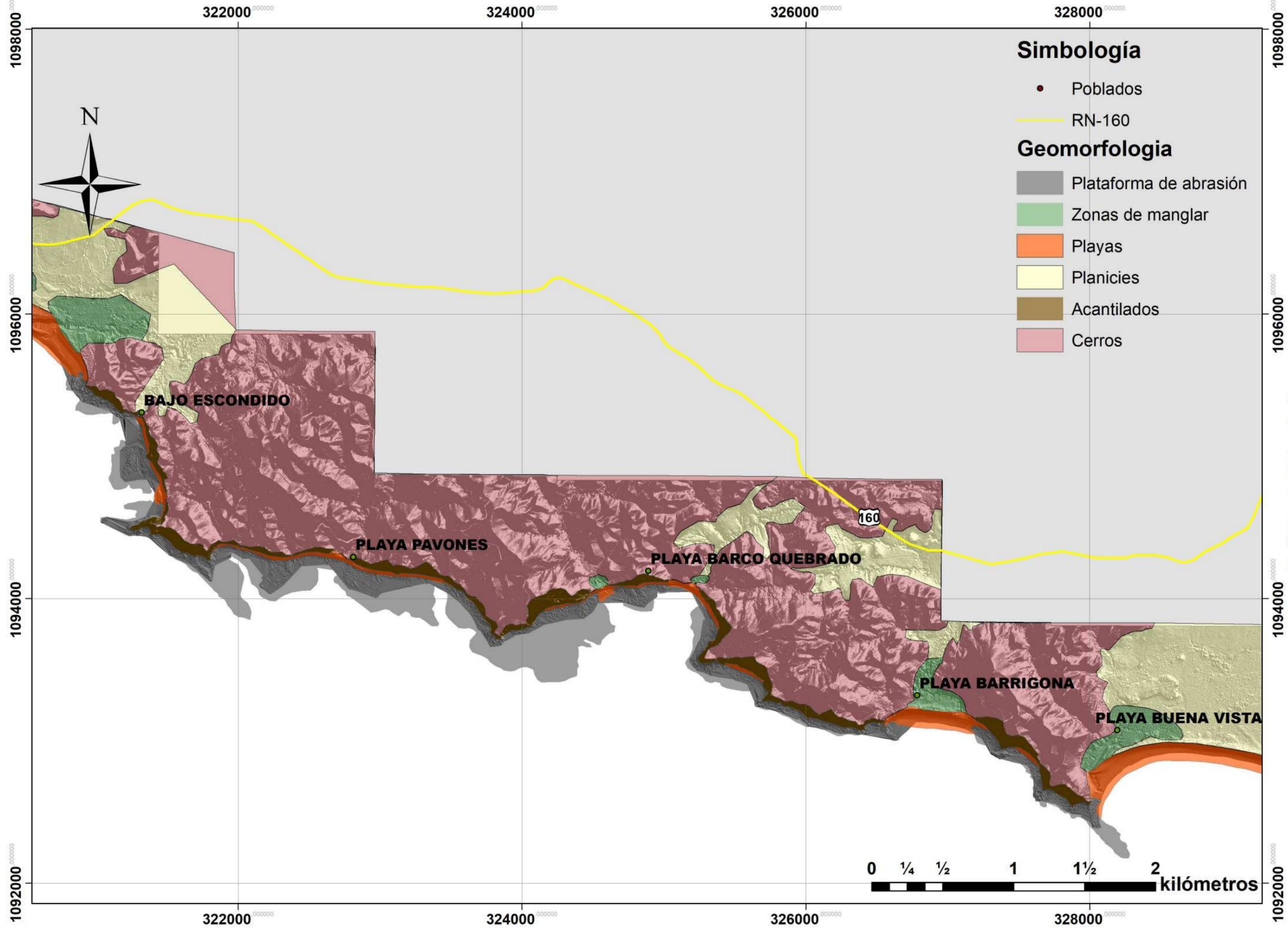


Figura 27. Vista de una pista de aterrizaje en el MED LiDAR. Se ubica frente a playa Carrillo.

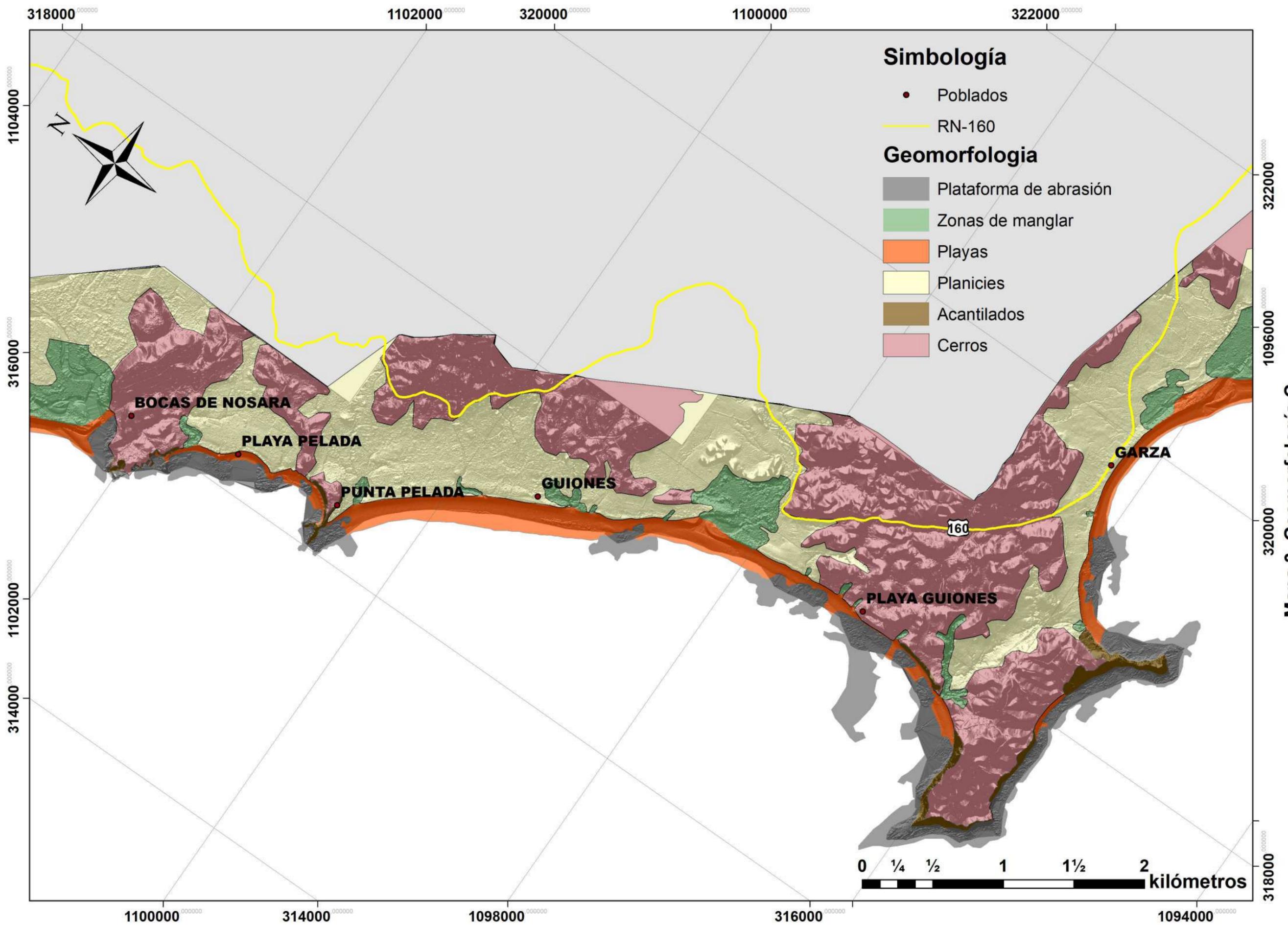
3.7 Mapas geomorfológicos

A continuación, se presentan los mapas geomorfológicos correspondientes a cada sección del área de estudio, con sus respectivas unidades geomorfológicas y la distribución de la RN-160 como referencia. Se ha dividido el área de estudio en 4 secciones de igual tamaño, y se presenta en mapas individuales debido a la forma alargada del área, esto hace que sea difícil representarla en un único mapa (Mapas 1, 2, 3 y 4).

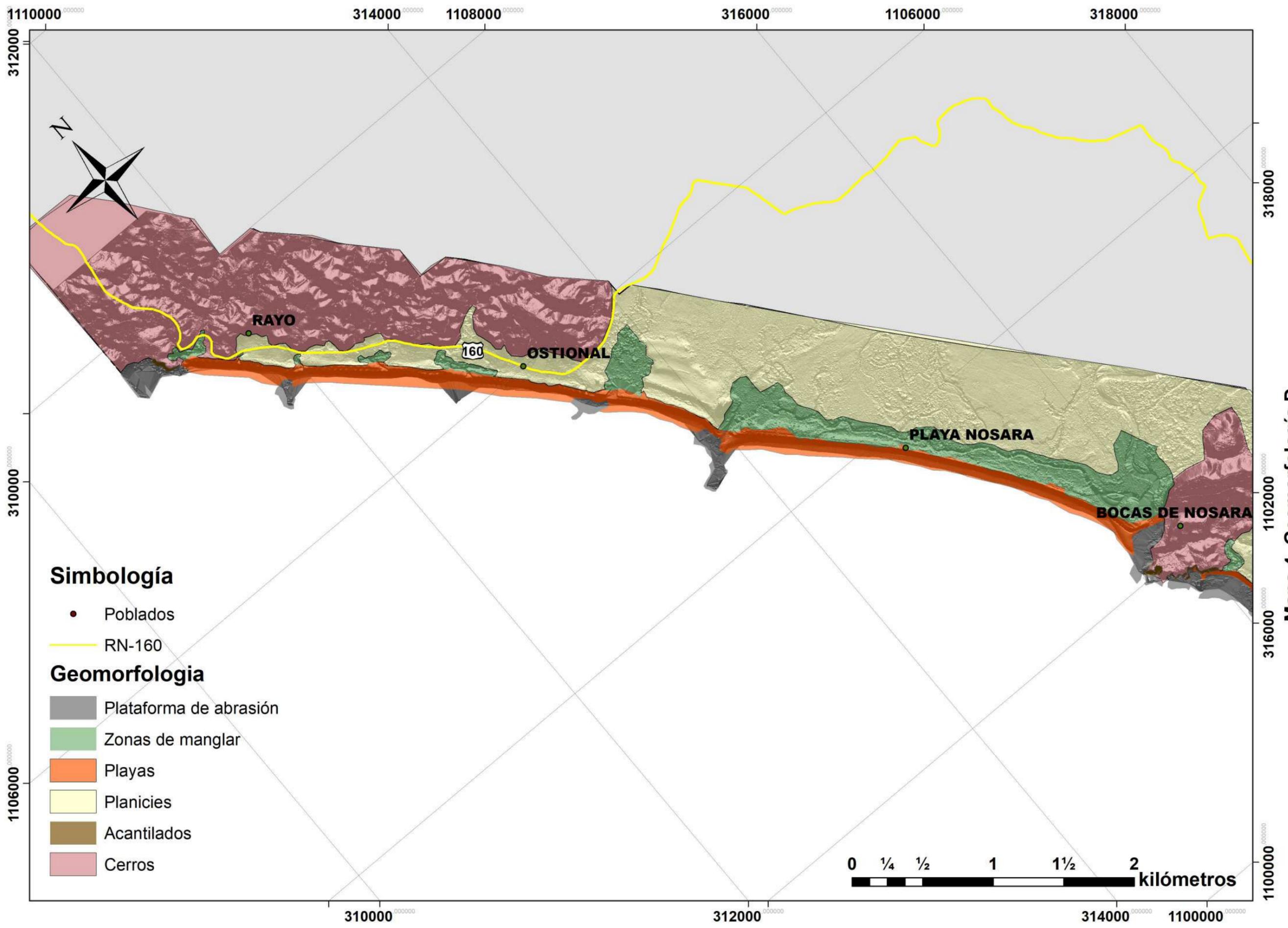




Mapa 2. Geomorfología B



Mapa 3. Geomorfología C



Mapa 4. Geomorfología D

CAPÍTULO IV

4. Metodología para la determinación de los procesos de erosión costera

Para la determinación de los procesos erosivos se utilizó una combinación de metodologías previamente aplicadas por otros autores. Puesto que se desea conocer el estado actual de la carretera con respecto a la erosión costera, se utiliza el Índice de Erosión-Sedimentación Costera (IE-SC) propuesto por Cárdenes & Obando (2005) como diagnóstico de los procesos erosivos que se presentan en la actualidad. El IE-SC es una metodología de tipo semi-cuantitativa que se desarrolló para el estudio de los intensos procesos de erosión-sedimentación en áreas costeras que podrían afectar las actividades humanas en general; en esta ocasión se utiliza en específico para una obra de infraestructura como lo es la RN-160, aunque este método no varía y se utiliza tal cual lo proponen los autores.

Por otra parte, se desea saber cuáles sitios son susceptibles a sufrir erosión costera, para este fin se utiliza la metodología que inicialmente fue propuesta por Gornitz *et al.* (1991) y modificada por varios autores; esta es un índice que permite relacionar variables físicas de una manera cuantificable y que expresa la vulnerabilidad relativa de la costa ante cambios físicos, como la erosión costera. Para este trabajo se utiliza la modificación propuesta por Alves *et al.* (2011), la cual utiliza varios parámetros inherentes al terreno y a la costa, se crea una matriz que clasifica estos parámetros en grados de susceptibilidad. Se generan mapas que resumen y presentan, de forma gráfica, susceptibilidad ante erosión costera en el terreno, según la matriz de clasificación. Dichos mapas se procesan mediante la herramienta de álgebra de mapas del SIG, para así generar un único mapa final que es la sumatoria de los creados anteriormente y que muestra la susceptibilidad ante la erosión costera en el terreno, a partir de esto se puede comparar la posición de la carretera con respecto a la susceptibilidad a la erosión que muestra el mapa final.

En última instancia y para complementar el trabajo, se crean escenarios de elevación del nivel del mar mediante la utilización de MED referidos al nivel medio del mar. Se modelan diferentes elevaciones en el nivel del mar con la ayuda del software *Global Mapper*, para obtener resultados ante diversas situaciones y observar a cuáles alturas de las modeladas se ven afectados ciertos tramos de la carretera.

Previo a la implementación de las metodologías descritas, anteriormente, se recopiló una base sólida de datos cartográficos del área de estudio que incluyen datos como: carreteras, datos de topografía, cobertura del terreno, geología, etc. Se dedica parte del tiempo a la búsqueda o la digitalización de tal información. Es importante también contar con un mapa geomorfológico de la zona, puesto que es información fundamental para utilizar las metodologías que se ha decidido usar en este proyecto. En esta ocasión no existe un mapa geomorfológico con el detalle suficiente para implementarlo en este trabajo, por lo que es necesario crearlo. Se dedica el capítulo 3 a la geomorfología del lugar y sus mapas respectivos.

Al obtener resultados de los análisis aplicados, se dan a conocer los tramos de la RN-160 que son afectados por la erosión costera actualmente; de esta manera se conocen también los sitios en la carretera que son susceptibles a presentar daños en un futuro próximo o distante. Esta información es valiosa para las autoridades pertinentes como municipalidades, Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) y Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) de manera que facilita la toma de decisiones con respecto a este tramo de la carretera.

4.1 Diagnóstico de la erosión utilizando el Índice de Erosión-Sedimentación Costera

Se analiza la erosión costera actual e *in situ* en el área de estudio mediante la implementación de la metodología para el estudio de los procesos de erosión-sedimentación que provee Cárdenes & Obando (2005), la cual se basa en observaciones de las evidencias físicas en el medio geológico. Estas observaciones

se realizan en un periodo que comprende tanto la estación seca como la lluviosa, para observar diferencias que puede causar el aporte de la precipitación en los sitios aledaños a las desembocaduras de los ríos. Se trata de una metodología simple y relativamente fácil de usar, que no depende de datos de entrada con los que no se cuenta, lo cual se adecúa de mejor manera a países donde conseguir los datos implica un significativo gasto económico.

Al catalogar los segmentos de línea de costa con un grado de erosión, se determinan los puntos donde la amenaza por erosión costera resulta más intensa para que se ponga especial atención en estos sitios. El IE-SC recolecta información prácticamente de toda el área de estudio, aunque se enfatiza en los sitios con infraestructura cercana a la línea de costa, en este caso la RN-160 primordialmente, además de construcciones como casas, restaurantes, hoteles, etc. La información recabada se despliega en mapas que utilizan simbología de diferentes colores según sea el grado de erosión, además se proveen fotografías ilustrativas de la situación en la que se encuentran muchos de los sitios analizados y por último se proporcionan conclusiones y recomendaciones a partir del estudio realizado.

Previamente se han realizado estudios que abordan el tema de impacto potencial de erosión costera en carreteras como el realizado por BIOMARCC-SINAC-GIZ (2013), pero este se realiza a escala muy general, a nivel de país en este caso, por lo que no considera sitios puntuales que se están viendo afectados de manera severa como sí lo hace la metodología del IE-SC; es necesario tener en cuenta lo anterior para intervenir sectores que lo necesitan con urgencia.

Una de las ventajas de este método es que resulta versátil en el análisis de la erosión costera sin importar la causa de esta. Se puede utilizar para medir daños provocados por ascenso del nivel del mar, así como cuando la causa de la erosión son eventos como el Fenómeno de El Niño o mareas muy altas extraordinarias como sucede en Costa Rica (Lizano, 2006). Otro factor que influye en el grado de erosión de una línea de costa es la tectónica de placas, puesto que al encontrarse tan cerca de una zona de subducción, el nivel relativo del mar cambia frecuentemente debido a periodos de hundimiento y levantamiento (Ambientico,

2014). También puede que sucedan varios de estos fenómenos al mismo tiempo (Lizano & Salas, 2001). Otra ventaja es que es una herramienta útil en las primeras fases de un estudio integral de manejo costero; por medio de esta se establece el grado de “estabilidad dinámica de las áreas costeras”, además su costo de implementación es relativamente bajo (Cárdenes & Obando, 2005).

4.1.1 Aplicación del IE-SC

La metodología del IE-SC se caracteriza por la división de segmentos de la línea de costa en niveles que van del 1 al 5, donde el nivel 1 presenta el grado de erosión más bajo o nulo, y el nivel 5 corresponde al grado de erosión más elevado por remoción de sustrato o destrucción de infraestructura. Se basa en la documentación de evidencias de erosión presentes en el litoral, esto para segmentos de playa con materiales no consolidados, es decir, no aplica para costas rocosas. Las evidencias de erosión-sedimentación que se pueden identificar se pueden clasificar en tres tipos: 1) evidencias en la vegetación, 2) evidencias en la infraestructura y 3) evidencias en el medio geológico.

Se lleva a cabo mediante observaciones en el campo, donde se toman en cuenta primordialmente los tres tipos de evidencias mencionados anteriormente, asimismo otras observaciones que se consideren pertinentes. Se contemplan aspectos como: exposición de raíces de árboles cercanos a la zona intermareal, árboles basculados o tumbados por el oleaje, presencia de infraestructura cercana a la línea de marea alta ordinaria, terrazas formadas por erosión, presencia de infraestructura de contención de la erosión si esta se encuentra presente, entre otras. A partir de características como estas se define un nivel entre 1 y 5 para el segmento de costa analizado, según se presenten una o más de las características y dependiendo también de su intensidad. Cuando se tienen los niveles definidos se procede a elaborar mapas, utilizando simbología distintiva para cada uno de los niveles. En este documento también se presentan fotografías ilustrativas de lo encontrado en el campo, ya que esto ayuda a visualizar la magnitud de los daños.

Además, para esta metodología es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) El periodo de monitoreo para este trabajo corresponde con el mismo periodo de elaboración del proyecto (aproximadamente un año), el cual es suficiente para observar diferencias producidas por la estación seca o lluviosa, también toma en cuenta las mareas más altas y extraordinarias, así como tormentas y efectos meteorológicos de importancia (en este caso se puede mencionar la tormenta tropical Nate que ocurrió en octubre de 2017).
- b) Se cuenta con datos de topografía *LiDAR* de alta resolución, lo cual brinda una base topográfica con elevada calidad y detalle y esto se ve reflejado en el estudio.
- c) Es de gran importancia tener en cuenta actividades humanas que podrían alterar el comportamiento regular de la erosión-sedimentación como: presencia de puertos y poblaciones costeras, la construcción de barreras de protección para la erosión o alcantarillas que desembocan en la playa, etc.
- d) Es indispensable realizar un estudio geomorfológico previo, que ayude a identificar las geoformas de la zona, para así definir las zonas donde trabajar y posibles morfologías asociadas a un problema de erosión-sedimentación.

4.1.2 Criterios para la definición de niveles

Cárdenes & Obando (2005) utilizan las características en la costa para identificar el nivel de erosión-sedimentación para cada segmento de costa (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles definidos para la aplicación del IE-SC

Nivel	Características
1. Erosión-sedimentación no apreciable	Estas zonas no presentan ninguna de las características que poseen los demás niveles. Esto no quiere decir que no haya procesos de erosión-sedimentación, sino que se debería de realizar observaciones durante periodos más largos de tiempo, puede que los cambios sean muy sutiles.
2. Erosión-sedimentación muy leve	<ul style="list-style-type: none"> - Raíces de árboles, palmeras, arbustos y vegetación costera en general expuestas cerca del límite de marea alta normal. - Terrazas de sedimento no consolidado (arena o suelo) de tamaño menor a 50 cm. - La infraestructura se encuentra a distancia considerable de la línea de costa y la erosión costera no representa un peligro verdadero para esta.
3. Erosión-sedimentación media	<ul style="list-style-type: none"> - Raíces de árboles, palmeras y arbustos se encuentran expuestas cerca de la línea de marea alta, puede haber árboles de tamaño considerable basculados. Esto indica que hay una pérdida importante del sustrato. - Terrazas de erosión con tamaño entre 50 cm y 1 m. - La infraestructura se encuentra a pocos metros de la línea de marea alta pero no ha sido impactada aún por el oleaje. - No existe infraestructura de protección ante el oleaje.
4. Erosión-sedimentación fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Las raíces de las plantas cerca de la línea de marea alta han sido fuertemente erosionadas, presentando estas exposición total o al menos grave. Los árboles de tamaño considerable se encuentran basculados al punto que están cerca de caer, han sido tumbados por completo o han sido removidos por el oleaje. - Se presentan terrazas de erosión de tamaño considerable, por lo general sobrepasando 1 m de alto, incluso algunas pueden llegar a los 2 m de altura. - La infraestructura costera se encuentra muy cercana al frente de erosión, a pocos metros de ser impactada por el oleaje, esta corre peligro de ser afectada a corto plazo. - Existen infraestructura para la protección ante el oleaje como: muros de concreto o roca, sacos con arena, chatarra, llantas, gaviones, entre otros. Estas aún no presentan daños o los daños son leves.
5. Erosión-sedimentación muy fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Las raíces de árboles y palmeras se encuentran totalmente expuestas; árboles de tamaño considerable han sido tumbados. - Terrazas de erosión con alturas mayores de 1,5 m. - Existe infraestructura de protección costera, pero esta ha sido afectada, ya sea destruida por completo o parcialmente, desplazada o enterrada por arena. También puede que esta infraestructura provoque afectación en otros sectores del litoral. - La infraestructura costera como: casas, hoteles, carreteras, puentes, etc. ha sido removida totalmente, parcialmente o sus bases han sido erosionadas de manera que su colapso es inminente.

4.2 Susceptibilidad de zonas costeras ante la erosión

Consiste en la creación de un mapa de susceptibilidad ante la erosión costera generado a partir de la sumatoria de varios mapas de tipo ráster, en este caso 9, que son básicamente parámetros a los que se les da un peso según sea su importancia y que corresponde a cada sitio en el área a estudiar. Se lleva a cabo principalmente mediante la utilización de SIG. El cruce de toda la información en un único mapa de susceptibilidad tiene como fin crear una herramienta eficaz para delimitar zonas susceptibles, contribuyendo con los organismos de ordenamiento y planificación.

4.2.1 Antecedentes

En el pasado se han utilizado índices para estimar la vulnerabilidad o susceptibilidad relativa de la costa, el más común es el CVI (Coastal Vulnerability Index) introducido por Gornitz *et al.* (1991), que se basa en las contribuciones relativas e interacciones de variables como: relieve, geología, geomorfología, cambio vertical del nivel del mar, desplazamiento de la línea de costa, rango mareal y altura de ola. Debido a que las mencionadas anteriormente son variables cualitativas y cuantitativas, se les asigna un rango entre 1 y 5. Este índice ha sido modificado y han sido cambiadas sus variables por el mismo Gornitz *et al.* (1994), el cual incluye 13 variables, entre ellas algunas climatológicas relacionadas con huracanes y tormentas.

Otros autores también han realizado modificaciones como: Thieler & Hammar-Klose (1999) quién modifica algunos aspectos de la tabla de clasificación, aunque mantiene los mismos parámetros. Yamada *et al.* (1995) involucra variables de infraestructura, economía y actividades humanas en su índice SCI (Sustainable Capacity Index). Se modifica también el índice en los trabajos de Shaw *et al.* (1998) (Sensitivity Index), Forbes *et al.* (2003) (Erosion Hazard Index), entre otros trabajos.

Los trabajos y modificaciones anteriores tienen en común que describen la erosión como una línea vectorial con varias clasificaciones. Esta línea representa erosión que ocurre a lo largo de la costa pero que puede estar tomando en cuenta datos relativos a la superficie tierra adentro o al mar. Por lo tanto, otros autores decidieron utilizar una base ráster para toda el área costera y no solo la línea de costa, dando como resultado en un mapa que muestra la susceptibilidad de la zona. El mapa de salida produce una versión más flexible y más fácil de interpretar, ya que permite la identificación de los cambios de la erosión, en y a lo largo de la costa, con el potencial para que la erosión se mueva hacia el interior a lo largo del tiempo, entonces la información ráster retenida mostrada en cada celda puede ser relevante a medida que la línea de costa se traslada hacia tierra (Fitton *et al.*, 2016).

La representación en forma de mapa de susceptibilidad ante erosión costera fue utilizada por autores como: Mclaughlin & Cooper (2010), Hegde & Reju (2007), Alves *et al.* (2011), (Fitton *et al.*, 2016), etc. Se elige utilizar la versión de mapa para el presente proyecto.

Para la creación de los mapas de los sitios por donde pasa la RN-160 se elige la metodología utilizada por Alves *et al.* (2011) como modelo a seguir, aunque se realizan algunas modificaciones en la tabla de clasificaciones de los parámetros: la inclusión de los ensayos de granulometría y Los Ángeles para cuantificar de manera más precisa y con mejor ajuste a la realidad el parámetro de geología, además el parámetro de geomorfología se adaptó a las unidades presentes en el área y el de acciones antropogénicas también se modificó de acuerdo a las actividades e infraestructura presentes en el área.

4.2.2 Procedimiento para crear los mapas de susceptibilidad

Se elaboraron mapas para cada una de las secciones en que fue dividida el área de estudio, que son 4 en total. La metodología consiste en 3 etapas en general: Recopilación de información y creación de la base de datos a utilizar, generación de

mapas a partir de cada uno de los parámetros y creación del mapa final, resultados y discusión.

Se utilizan las siguientes abreviaturas para los parámetros: Elevación topográfica (ET), Distancia a la línea de costa (DC), Geología (GL), Geomorfología (GM), Cobertura del terreno (CT), Rango máximo de mareas (RM), Altura de ola significativa máxima (AO), Tasa promedio de erosión/acreción (TE), Acciones antropogénicas (AA), Elevación topográfica (ET).

En la figura 28 se muestra un diagrama de flujo del proceso para la obtención de los mapas.

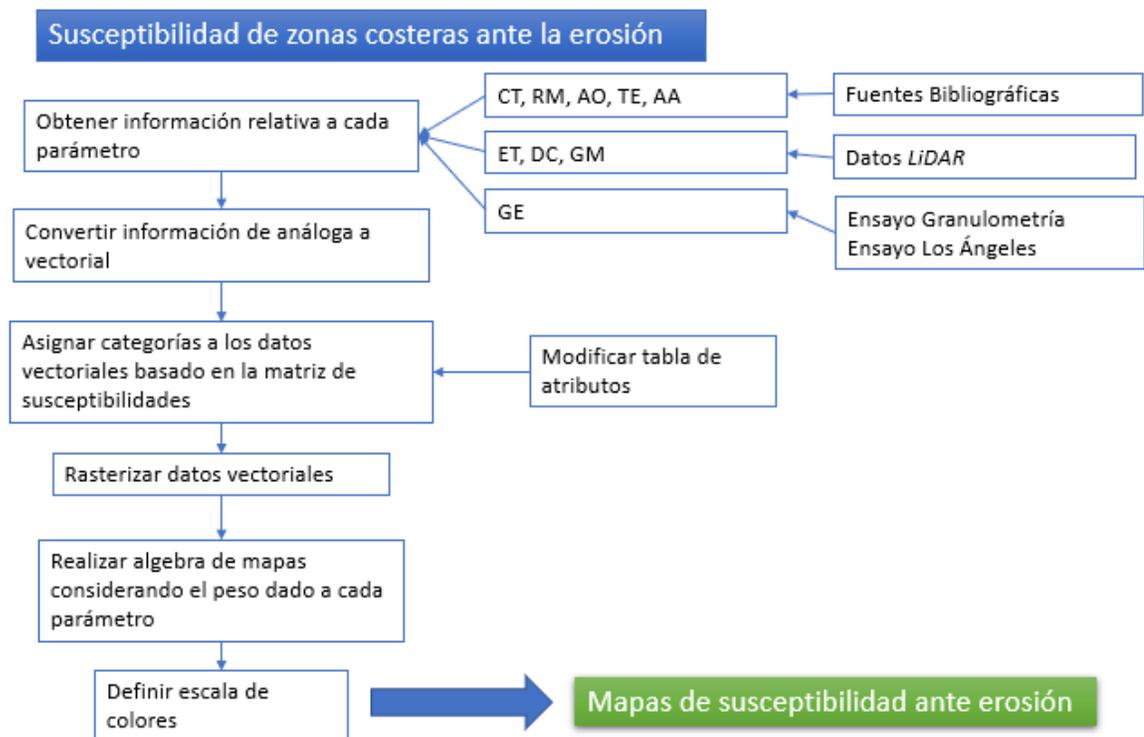


Figura 28. Procedimiento para la obtención de los mapas de susceptibilidad.

En la primera etapa, se buscan documentos acerca del uso que se le ha dado a esta metodología y los cambios que se le han realizado a través del tiempo. Se procede a recopilar los datos cartográficos que puedan contribuir a la elaboración de los mapas, para esto se recolectan datos de topografía como: curvas de nivel en formato *shapefile*, modelos de elevación digital, fotografías aéreas del área de

estudio, etc. y se procede a crear a partir de los anteriores los datos vectoriales con los que se inicia el proceso de la generación de mapas. La información acerca de mapas de parámetros que no se pueden elaborar con estos primeros datos es necesario buscarla a partir de otras fuentes, ya sea que se obtengan de publicaciones acerca de un tema en específico, por ejemplo, para el parámetro de altura máxima de ola significativa el cual se obtuvo de una publicación acerca de oleaje en las costas de Costa Rica (Lizano, 2007). Otros parámetros, como el de rango máximo de mareas, se obtuvieron mediante datos crudos disponibles en páginas web (<http://www.mioicmar.ucr.ac.cr/>). El parámetro de geología proviene de publicaciones de mapas, los cuales fueron digitalizados.

Una vez recopilada toda la información bibliográfica necesaria para desarrollar los mapas correspondientes a cada variable, se procede a crear un mapa en formato vectorial (*shapefile*) correspondiente a cada uno de los parámetros para la totalidad del área de estudio, esto resulta en 9 archivos vectoriales que posteriormente se convertirán a formato ráster. Esta actividad se realizó con la herramienta “*create feature*” del programa ArcGis y son, en esencia, mapas de polígonos; todos los archivos se trabajan con el sistema de coordenadas CRTM05. Es importante indicar que conforme se va digitalizando cada polígono se debe también crear una columna en la tabla de atributos que asigne un nombre, valor o calidad a esos polígonos, de manera que cuando se termine de editar el *shapefile* cada forma posea un atributo que lo caracterice y permita clasificarlo.

Realizado lo anterior es necesario modificar la tabla de atributos para que cada uno de esos nombres, valores o calidades sean transformados a un valor numérico, de tipo *Integer*, entre 1 y 5, basándose en la matriz de susceptibilidades según corresponda. Para la elaboración de los mapas de tipo ráster con los que se elabora el mapa de susceptibilidad ante erosión costera, se decidió trabajar con números desde el momento en que se digitalizan los polígonos, por comodidad se le asignó un número distintivo a cada tipo de polígono. Por ejemplo, en el *shapefile* del parámetro de geomorfología los polígonos con el número 1 corresponden con playas y los del número 2 corresponden con desembocaduras o estuarios, pero al

transformar ese atributo y adaptarlo a la matriz de susceptibilidades, ambas geoformas poseen el valor de 5, ya que la susceptibilidad es muy alta en ambos casos. Es necesario que cada uno de los *shapefile* contenga una columna que indique un valor numérico basado en la matriz de susceptibilidades para cada polígono; ya que el siguiente paso es transformar la información vectorial a formato ráster, la cual funciona de manera que asigna un valor numérico a cada píxel en el mapa, por lo tanto, debe de existir una columna en los atributos del *shapefile* sobre la cual se pueda ligar la creación del archivo ráster. En la figura 29 se muestra una vista de cómo luce un mapa cuando se encuentra aún en etapa de archivo vectorial y otra de cuando este se convierte a formato ráster, se toma el ejemplo del parámetro de geomorfología, y se muestran las unidades geomorfológicas en el mapa A, el cual es la versión vectorial y sus respectivas categorías según la matriz de susceptibilidad ante erosión costera (Tabla 3) en el mapa B, el cuál es la versión ráster.

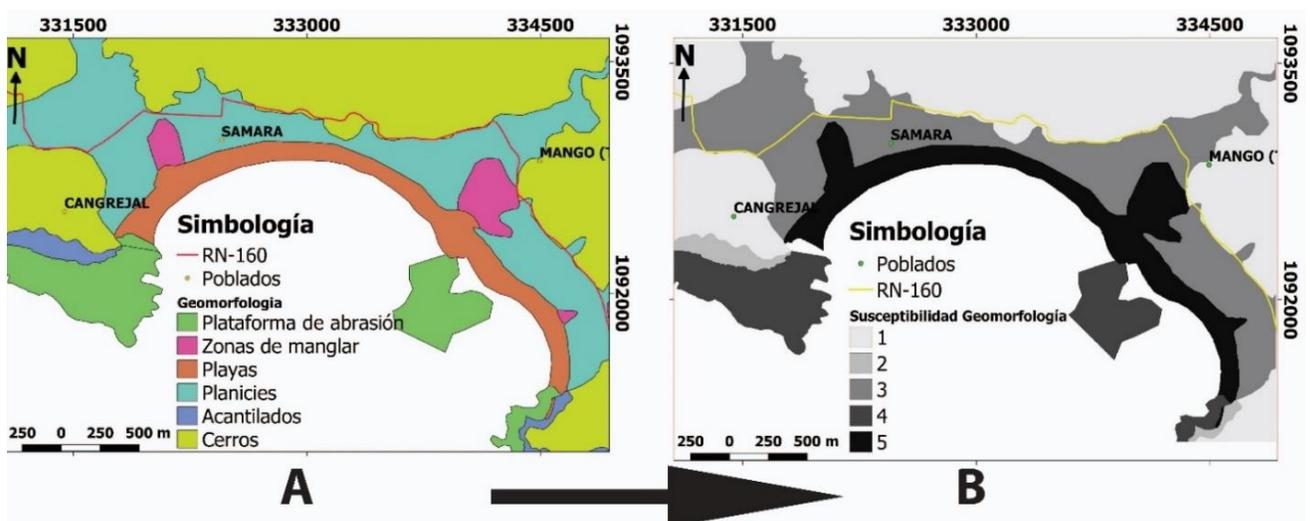


Figura 29. Ilustración del proceso de rasterización. El mapa A corresponde con el mapa del parámetro de geología en formato vectorial, en el mapa B se muestra el mapa ráster con los valores de susceptibilidad correspondientes al parámetro de geología.

Mediante el software QGIS 3.2.1, se crean los mapas en formato ráster. Primeramente, se cargan en un proyecto de QGIS todos los *shapefile* que corresponden a los parámetros y se verifica que el sistema de coordenadas de todos los archivos sea el mismo. Es necesario, también, poseer un archivo vectorial que

delimite el área del mapa que queremos crear, ya que los *shapefile* generados inicialmente abarcan toda el área de estudio y si tratamos de generar un ráster con toda esa información y con el detalle deseado puede derivarse en errores del programa debido a sobrecarga de información.

Cuando la información se encuentra debidamente cargada se procede a utilizar la herramienta “Rasterizar” para convertir de formato vectorial a ráster que posee el QGIS. Se selecciona el *shapefile* con el que queremos trabajar (capa de entrada), se selecciona el campo o columna a utilizar (atributo), la resolución deseada y se indica el área donde se quiere rasterizar (para este únicamente se selecciona el archivo que delimita el cuadrante de trabajo previamente cargado), finalmente se da clic en “ejecutar” y el programa automáticamente genera el ráster, se crea un mapa de este tipo por cada parámetro, 9 en total (Figura 30). posteriormente, se crea mediante la herramienta “Calculadora Ráster” el mapa de susceptibilidad ante erosión resultante de la combinación de los otros 9 (Figura 31). Si tenemos en cuenta los 4 cuadrantes en los que se dividió el área de estudio, tenemos un total de 36 mapas ráster. Combinando estos 9 mapas ráster por cuadrante de estudio para obtener el mapa de susceptibilidad integrado, resulta en 4 mapas más, para un total de 40 mapas que fueron generados.

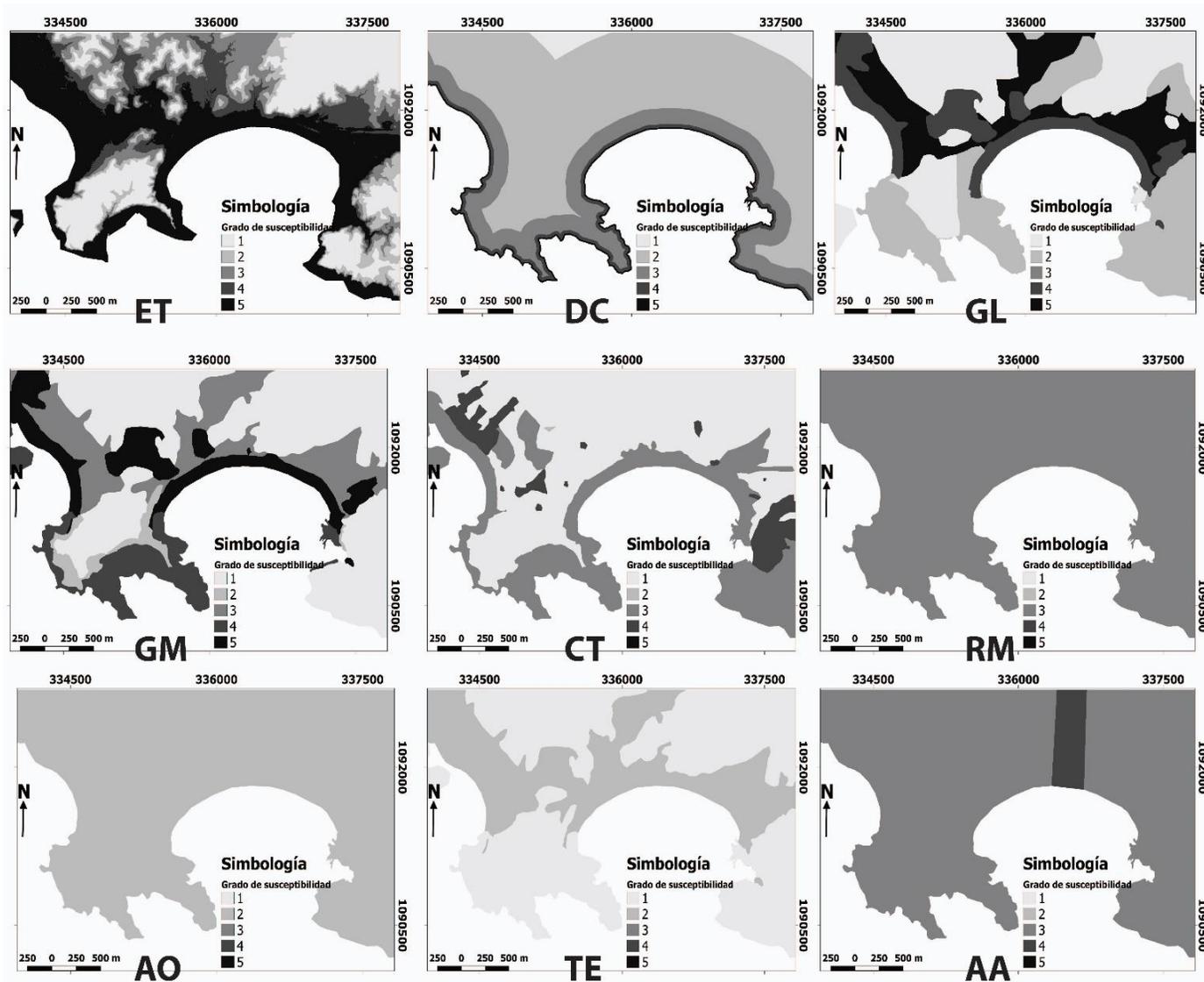


Figura 30. Mapas de entrada en formato ráster correspondientes a cada uno de los parámetros utilizados para generar el mapa final de susceptibilidad ante erosión. El ejemplo corresponde al sector de playa Carrillo.

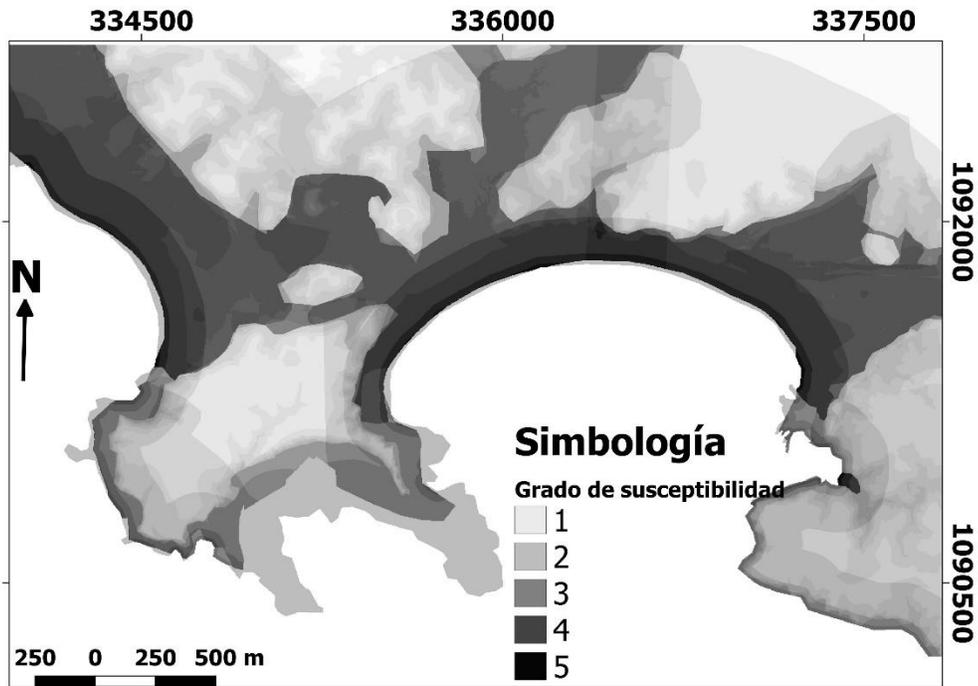


Figura 31. Mapa de susceptibilidad ante erosión producto de la combinación de los mapas ráster correspondientes a cada parámetro. Versión en escala de grises.

Cuando los mapas ráster están listos, se cargan en un proyecto de QGIS y se procede a la utilización de la herramienta “calculadora ráster”. Esta permite utilizar una fórmula matemática para realizar operaciones con mapas ráster. Mediante esta herramienta se crea el mapa de susceptibilidad integrado, que incluye la información de los 9 parámetros. Se realiza una sumatoria de los valores de cada parámetro para cada píxel del mapa, esto se puede llevar a cabo debido a que a todos se les dio valores entre 1 y 5 correspondientes al grado de susceptibilidad, también se le da un peso a cada parámetro según su importancia, esto provoca que los valores de geología y distancia a la línea de costa, por ejemplo, sean más relevantes a la hora del resultado que valores como rango máximo de mareas. El peso relativo de cada valor se detalla más adelante.

Al contar con el mapa integrado en formato ráster se antepone el *shapefile* de la RN-160 y se analizan los tramos que pasan por zonas de mayor susceptibilidad a erosionarse o menor y se brindan recomendaciones al respecto.

4.2.3 Fuentes de los datos de entrada

Los datos de entrada utilizados para este modelo provienen de diferentes fuentes. Una parte proviene de bases de datos cartográficas, como los datos *LiDAR* con los que se trabaja en este proyecto, así también fotografías aéreas. Otra parte proviene de otros estudios realizados por diferentes autores y que se encuentran como publicaciones o reportes técnicos y no necesariamente como un mapa georreferenciado, dichas fuentes se indican en la tabla 2. Para la mayoría de las variables fue necesario digitalizar la información debido a que se encontraba disponible como un mapa en físico y no digital, o simplemente como un dato proveniente de bibliografía. En todo caso, se trató de que la información proviniera de una fuente confiable, puesto que la calidad del resultado es proporcional a la calidad de los datos de entrada (Tabla 2).

Tabla 2. Referencias de los datos de entrada utilizados para los mapas de susceptibilidad.

Parámetro	Fuente
Elevación topográfica (ET)	Geoprocesamiento de los datos <i>LiDAR</i> disponibles para este proyecto.
Distancia a la línea de costa (DC)	Geoprocesamiento de los datos <i>LiDAR</i> disponibles para este proyecto.
Geología (GL)	Fuente de datos analógica. Mapas geológicos del documento Cartografía Geológica de la Península de Nicoya a escala 1:50000 (Denyer <i>et al</i> , 2014), digitalizados y adaptados al MED <i>LiDAR</i> .
Geomorfología (GM)	Elaboración propia digitalizando a partir de las fotografías aéreas, MED <i>LiDAR</i> y observaciones de campo.
Cobertura del terreno (CT)	Elaboración propia digitalizando a partir de las fotografías aéreas, MED <i>LiDAR</i> , observaciones de campo e información disponible en el Atlas digital de Costa Rica 2014 (Ortiz-Malavassi, 2014).
Rango máximo de mareas (RM)	Digitalizado a partir del documento de Lizano (2006). Verificado con las tablas de predicción de mareas para la costa del Pacífico Norte de Costa Rica que proveen el IMN (https://www.imn.ac.cr/en/tablas-de-mareas), CIMAR UCR (http://www.mioicmar.ucr.ac.cr/) y Tabla de Mareas (https://tablademareas.com/cr/costa-oceano-pacifico/guanacaste).
Altura de ola significativa máxima (AO)	Digitalizado a partir de datos incluidos en el documento de Lizano (2007).
Tasa promedio de erosión/acreción (TE)	Digitalizado a partir de datos obtenidos en Andrade (1996) y observaciones en el campo.
Acciones antropogénicas (AA)	Elaboración propia digitalizando a partir de las fotografías aéreas, MED <i>LiDAR</i> y observaciones de campo.

4.2.4 Matriz de clasificación de la susceptibilidad ante erosión costera

Se presenta una tabla que contiene la clasificación para los valores de cada parámetro en una escala de 1 a 5, donde los valores de 1 representan una susceptibilidad muy baja y los valores de 5 representan susceptibilidad muy alta (Tabla 3). Esta involucra datos de entrada cualitativos y también cuantitativos, pero al asignar una clasificación a cada uno provoca que el valor que se utiliza en la construcción de los mapas sea cuantitativo. Con base en esta tabla se clasifican los mapas correspondientes a cada parámetro para su posterior procesamiento mediante álgebra de mapas. Los valores elegidos son basados en trabajos anteriores como el de Alves *et al.* (2011) y Coelho (2006), se modificaron algunos parámetros para adaptarlos a la región estudiada (Apartado 4.2.1), como el de geología, geomorfología y acciones antropogénicas; estos se indican en la tabla con un asterisco.

Tabla 3. Matriz de clasificación de la susceptibilidad ante erosión costera. Modificada de Alves et al. (2011). Parámetros modificados (*).

Grado de susceptibilidad	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Parámetros	1	2	3	4	5
Elevación Topográfica (ET) (m s.n.m.)	>30	>20 ≤30	>10 ≤20	>5 ≤10	≤5
Distancia a la línea de costa (DC) (m)	>1000	>200 ≤1000	>50 ≤200	>20 ≤50	≤20
Geología (GL)*	Sustrato rocoso			Sustrato blando	
	Rocas con coef. Los Ángeles <20	Rocas con coef. Los Ángeles ≥20 <40	Rocas con coef. Los Ángeles >40	No consolidados Gruesos. Predominancia de partículas con tamaño mayor a 0,074 mm	No consolidados Finos. Predominancia de partículas con tamaño menor a 0,074 mm
Geomorfología (GM)*	Cerros, colinas y montañas	Acantilados rocosos	Planicies aluviales o marinas	Plataformas de abrasión	Playas, dunas, estuarios, desembocaduras
Cobertura del terreno (CT)	Bosque	Vegetación cultivada y granjas	Sin cobertura	Asentamientos rurales	Urbanizado e industrial
Rango máximo de mareas (RM) (m)	>1	≥1 <2	≥2 <4	≥4 <6	≥6
Altura de ola significativa máxima (AO) (m)	>3	≥3 <5	≥5 <6	≥6 <7	≥7
Tasa promedio de erosión/acreción (TE)	>0	>-1 ≤0	>-3 ≤-1	>-5 ≤-3	≤-5
Acciones antropogénicas (AA)*	Intervención que protege la costa de la erosión		Sitios sin intervención humana	Intervención que contribuye a la erosión de la costa.	
	Alta protección	Baja protección		Leve	Grave

4.2.5 Parámetros

Elevación Topográfica (ET): Se adquiere a partir de los datos crudos del *LiDAR*, y corresponde con rangos de elevación del terreno en estudio. Se exportan en un archivo .grd, el cual es un ráster que posee la información numérica de la

altura y que el QGIS es capaz de leer. Mediante la herramienta de la calculadora ráster se realiza una reclasificación de valores continuos a valores discretos utilizando una expresión matemática como la siguiente:

$$("elevaciongrid@1" < 5) * 5 + (("elevaciongrid@1" >= 5) AND ("elevaciongrid@1" < 10)) * 4 + (("elevaciongrid@1" >= 10) AND ("elevaciongrid@1" < 20)) * 3 + (("elevaciongrid@1" >= 20) AND ("elevaciongrid@1" < 30)) * 2 + ("elevaciongrid@1" > 30) * 1$$

Se toma como referencia la matriz de clasificación que se muestra en el apartado 4.2.4 y se obtiene como resultado un mapa con valores entre 1 y 5 clasificados según la altura en el terreno.

Distancia a la línea de costa (DC): Con el objetivo de generar este mapa el primer paso es obtener un *buffer*, esto es una herramienta de análisis que posee el QGIS la cual crea una zona de influencia alrededor de una entidad vectorial; para efectos de este trabajo se genera un *buffer* alrededor de la línea de costa. Lo primero es digitalizar la línea a partir de los datos *LiDAR*, esta va a ser nuestro archivo vectorial base para generar el *buffer*. Se carga la línea de costa en el QGIS y se utiliza la herramienta *Multi Ring Buffer* para crear un *shapefile* con múltiples bandas del mismo ancho que poseen un valor de distancia desde litoral; para este trabajo el *buffer* posee bandas de 5 metros de ancho que se extienden por 2000 metros de distancia a partir de la línea de costa, resultando en un *shapefile* con bandas de distancia a la línea de costa, de las cuales se toma en cuenta las que crecen hacia tierra adentro. Posteriormente se convierte este *shapefile* a formato ráster. Además, se realiza una reclasificación con la herramienta de calculadora ráster, tomando en cuenta las categorías de la matriz de clasificación (Apartado 4.2.4), para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$("distancia@1" < 20) * 5 + (("distancia@1" >= 20) AND ("distancia@1" < 50)) * 4 + (("distancia@1" >= 50) AND ("distancia@1" < 200)) * 3 + (("distancia@1" >= 200) AND ("distancia@1" < 1000)) * 2 + ("distancia@1" >= 1000) * 1$$

Se obtiene como resultado un mapa con valores entre 1 y 5 clasificados según la distancia a la que cierta franja se encuentre de la línea de costa. El

parámetro de distancia a la línea de costa resulta ser uno de los más importantes para determinar la susceptibilidad de un lugar dado, por lo que el peso de este es relativamente mayor al de los demás parámetros a la hora de la sumatoria de los mapas.

Geomorfología (GM): Para este proyecto se realizó todo un capítulo dedicado a la geomorfología del lugar (Capítulo 3), dicha información y los *shapefile* que se generaron en la sección de geomorfología se utilizan para la elaboración del ráster correspondiente a este parámetro. Esto se debe a la inexistencia de mapas geomorfológicos para la región que posean una escala adecuada para el presente trabajo, por lo que hubo que realizar el análisis geomorfológico del lugar. Se asignaron valores de susceptibilidad entre 1 y 5 a cada unidad geomorfológica y se indicaron estos en una sola columna en su tabla de atributos.

Cobertura del terreno (CT): Se digitalizaron los *shapefile* principalmente a partir de las fotografías aéreas contenidas en el paquete *LiDAR*; se utilizó también información de la base de datos del SNIT y del Atlas 2014 (Ortiz-Malavassi, 2014) para delimitar las zonas con cobertura boscosa o sin ella, vegetación cultivada y asentamientos rurales o urbanos; cabe destacar que estos últimos no existen del todo en el área estudiada. De igual manera que con los parámetros anteriores, se asignan valores entre 1 y 5 a cada polígono según el grado de susceptibilidad y se genera el ráster correspondiente a este parámetro.

Rango máximo de mareas (RM): Para este parámetro se utiliza un dato que se encuentra en el rango de 2 y 3 m, basado en los cálculos realizados por Lizano (2006), quien calculó un valor de 2,28 m, y en valores de niveles mareográficos como el promedio de mareas de sicigia que corresponde con 2,8 m (Voorhis *et al.* 1983) para aguas del Pacífico de Costa Rica. Esto se puede corroborar también con las tablas de predicción de mareas para la costa del Pacífico Norte de Costa Rica (Tabla 2) donde se puede comprobar que la altura de la marea oscila entre 2 y 3 m a través del tiempo. Se asume un valor único para toda el área de estudio, puesto que el comportamiento es similar en toda la costa del Pacífico Norte de Costa Rica, debido a que no existen estudios con mayor detalle que a nivel regional para esta

zona. Es por esta razón que el mapa luce de manera uniforme y de un solo color en su totalidad. Para lograr esto se utilizó un *shapefile* de toda el área de estudio con un solo valor que es el grado de susceptibilidad moderado (3), ya que los datos de rango de mareas encontrado oscilan entre 2 y 4 m.

Altura de ola significativa máxima (AO): Tomando como referencia el estudio realizado por Lizano (2007), se utiliza el valor de 3,28 m, que corresponde con la altura significativa de ola (en aguas profundas) de un registro de olas para el Pacífico Norte de Costa Rica. Al multiplicar el dato anterior por 1,5 obtenemos la probabilidad de tener una ola de casi 5 m en aguas del Pacífico Norte (Kamphuis, 2000). Al igual que en el parámetro anterior, un único dato es el que se encuentra disponible para toda la región y no existen datos con mayor resolución, por lo que se asume un comportamiento uniforme para el área de estudio. Se podrían dar variaciones en este valor de altura de ola en lugares protegidos naturalmente como bahías o golfos, donde esta variable sería menor debido al efecto barrera que tienen ante el oleaje; pero estas variaciones no se ven reflejadas en el mapa de susceptibilidad ante erosión debido a que no se cuentan con los datos a esa escala.

Tasa promedio de erosión/acreción (TE): Se utiliza como tasa de erosión un valor obtenido a partir del retroceso de la línea de costa medido por Andrade (1996) de 42 metros en 100 años, por lo tanto 0,42 m/año, esto concuerda también con las observaciones realizadas durante la realización de este proyecto donde con certeza la línea de costa se ha desplazado distancias decimétricas como máximo en aproximadamente un año. Se justifica el uso de este dato debido a que, el Pacífico de Costa Rica, a diferencia del Caribe, no posee estudios donde se midan tasas de erosión/acreción como tal. También concuerda con una tasa de erosión promedio medida a nivel regional para las costas del Pacífico de Colombia que ronda los 0,21 m/año (Cifuentes-Ossa *et al.*, 2017). En estudios anteriores, se han utilizado fotografías aéreas de diferentes años para determinar la tasa de erosión a través del tiempo, pero desafortunadamente las fotografías aéreas que existen de la franja costera entre Ostional y Carrillo no poseen la resolución adecuada para obtener una tasa promedio de erosión medida en metros.

La clasificación va a ser básicamente de dos categorías, una para sustrato blando y otra para sustrato rocoso, debido a la similitud en comportamiento, puesto que es lógico que los materiales no consolidados se van a erosionar de manera más rápida que los materiales consolidados. En este caso los valores mayores a 0,42 m/año poseen susceptibilidad baja (2), esta categoría se asigna a los materiales no consolidados. Por otra parte, los materiales rocosos caen dentro de la categoría de susceptibilidad muy baja (1) que lógicamente poseen un valor de tasa de erosión menor al de 0,42 m/año.

Para generar este mapa se necesita de un *shapefile* con polígonos delimitando las zonas con materiales rocosos y las zonas con materiales inconsolidados, a estos se les asigna en su tabla de atributos el valor de 1 y 2 respectivamente y se obtiene el mapa ráster utilizando el QGIS.

Acciones antropogénicas (AA): Las intervenciones humanas inciden en los patrones naturales de comportamiento de la dinámica costera, y tienen impacto en los volúmenes de sedimentos en circulación en la costa litoral. Obras como proyectos hidroeléctricos, dragados, los quebramares, las extracciones de arenas, urbanización en zonas dinámicas y la destrucción de cordones dunares, tienden a aumentar los valores de erosión de la costa; por otra parte, obras que son intervenciones de defensa catalogadas como: "de mantenimiento de la posición" de la línea de costa, como lo son: las obras paralelas y perpendiculares a la costa, tales como muros de protección, alimentaciones artificiales de arenas, las dunas artificiales y otros tipos de barreras costeras, contribuyen más bien a proteger el litoral ante la erosión (Coelho *et al.*, 2006). En el área de estudio no se presenta infraestructura ni intervención costera de ningún tipo, con excepción de un sitio en la parte central de playa Carrillo donde hay un muro de protección ante oleaje.

La clasificación puede dividirse en sitios donde hay infraestructura que protege la costa ante la erosión (1 y 2), sitios sin intervención (3) y sitios con intervención que contribuye a la erosión (4 y 5), ya sea que la intervención humana provoque erosión como tal o reducción de las fuentes de sedimento en caso de los lugares donde se da acreción. Para los sitios donde hay infraestructura que protege

se incluye también que haya contribución a las fuentes de sedimento. En el caso del área de estudio el mapa del parámetro de Acciones Antropogénicas luce de un color uniforme, se debe a que prácticamente toda cae dentro de la categoría 3, puesto que la intervención es mínima y muy puntual, únicamente varía frente a un segmento de playa Carrillo, este posee la categoría 4.

Geología (GL): A grandes rasgos se divide en 5 categorías: dentro de 1,2 y 3 se ubican formaciones rocosas presentes en el área que se clasifican según los valores del Coeficiente de los Ángeles que se obtengan al aplicarles el ensayo con la Máquina Los Ángeles, que regularmente se utiliza para determinar la resistencia a la abrasión de un agregado, pero al que se le quiere dar un uso diferente en este trabajo. Formaciones como el complejo de Nicoya y Curú son más resistentes y poseen valores más bajos de desgaste con la Máquina Los Ángeles; luego hay varias formaciones con desgaste intermedio como: Piedras Blancas, Punta Pelada, Arío y Puerto Carrillo; por último, hay formaciones muy poco resistentes como: Santa Teresa que poseen un coeficiente más alto y por lo tanto muestran un desgaste más elevado.

Las categorías 4 y 5 son para materiales no cohesivos presente en la zona, donde unidades geomorfológicas con sedimentos más gruesos, por ejemplo, formaciones arenosas como playas y estuarios, son relativamente más estables en presencia de agua y su permeabilidad así como la resistencia aumentan, por lo que resultan ser menos erosionables debido al tamaño de la partícula, esto con respecto de sedimentos más finos como los limos (que se presentan en planicies aluviales y manglares) los cuales, al ser más finos, disminuyen la permeabilidad y resistencia, por lo que es menos estable en presencia de agua (Suárez, 2001). Partiendo de lo anterior, se introducen dentro de la categoría 4 las formaciones con sedimentos más gruesos y dentro de la categoría 5 los sedimentos más finos, teniendo como límite entre ellas el tamaño de partícula mayor o menor a 0,075 mm. Con el fin de clasificar los sitios según el tamaño de partícula, se realizaron ensayos de granulometría a muestras representativas en el área de estudio y se ubican dentro de la categoría 4 o 5 según su clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

(SUCS), donde las divisiones de arena y grava se introducen en la categoría 4 y las divisiones de limos y arcilla dentro de la categoría 5.

4.2.6 Parámetro de geología: Utilización de la Máquina Los Ángeles y Ensayos de Granulometría

La obtención del parámetro de geología mediante la utilización de la Máquina los Ángeles y el Ensayo de granulometría se da en 3 etapas:

4.2.6.A Definición de lugares a muestrear y recolección de muestras

En general se dan dos comportamientos bien diferenciados de erosión con respecto a geología, uno para las formaciones rocosas y otro para las formaciones inconsolidadas. Las primeras están conformadas por rocas duras con bajo potencial de ser erosionadas en este tipo de costa se incluye acantilados, plataformas de abrasión, etc. Las formaciones inconsolidadas corresponden con geoformas que se componen sedimentos no consolidados como: playas, depósitos arenosos, llanuras costeras o aluviales, manglares, entre otros; estas, por lo general, se erosionan de manera más fácil (Posada & Henao, 2008). Con el fin de cuantificar el grado de erosión de los diferentes materiales de manera que se pudiera crear una escala que se adaptara al modelo utilizado en este proyecto y debido a la inexistencia de un método para medir la erodabilidad de un material ante la acción del océano, se ideó utilizar métodos geotécnicos que han sido ampliamente utilizados para otros fines y que a la vez se adecuaran de manera correcta a los objetivos planteados.

El primer paso es delimitar los sitios donde existen formaciones rocosas y donde se encuentran las formaciones inconsolidadas. Para lograr lo anterior fue necesario verificar la geomorfología de la región, utilizando los mapas geomorfológicos (Capítulo 3) se clasifican las geoformas previamente definidas en formaciones rocosas o inconsolidadas, por ejemplo, si la geoforma es un cerro o una plataforma de abrasión, esta se clasifica como formación rocosa, en cambio, si

es una playa o planicie, esta cae dentro de la categoría de formaciones inconsolidadas. En la tabla de atributos del *shapefile* de la geomorfología, se crea una columna que indique con un valor numérico si esta corresponde a material consolidado o inconsolidado, seguidamente se utiliza un renderizado de color que utilice dicho atributo y nos permita observar con un color distintivo los sitios donde se presenta cada tipo de sustrato (Figura 32).

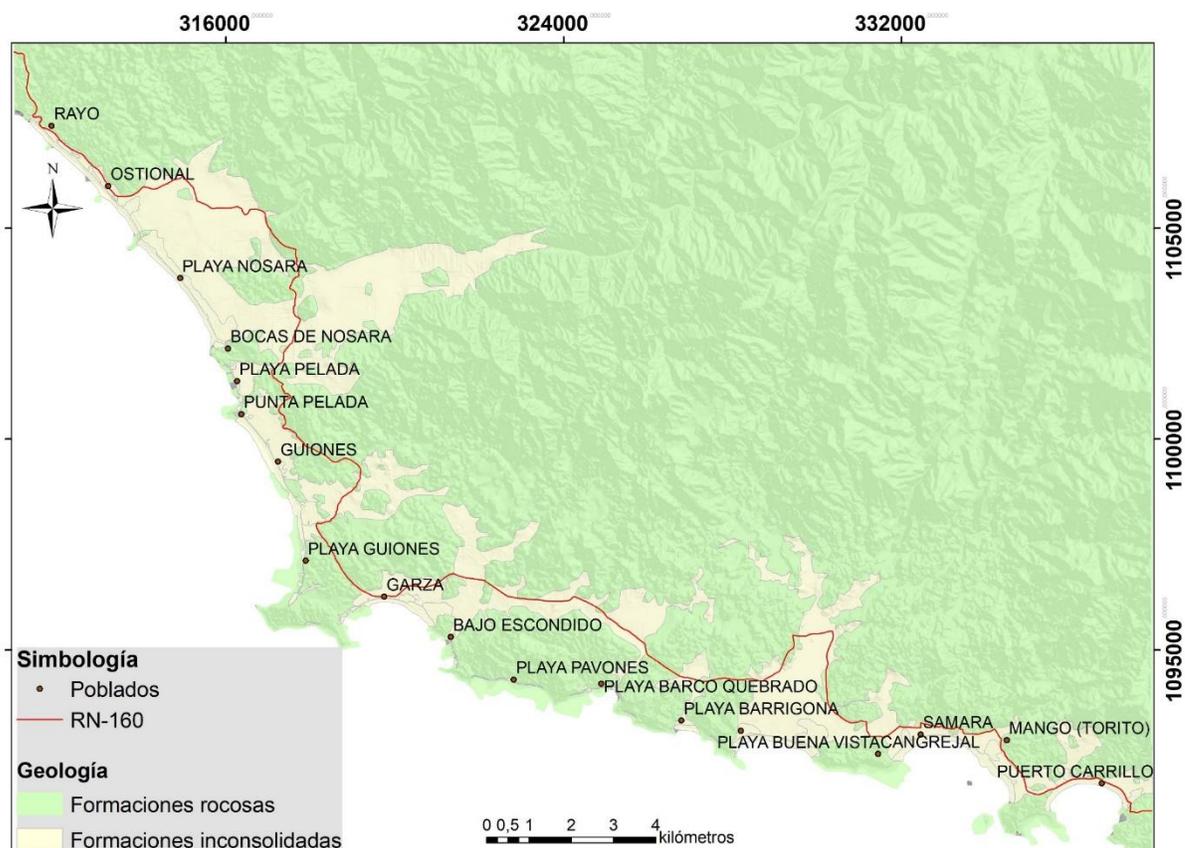


Figura 32. Localización de las formaciones rocosas y las inconsolidadas.

4.2.6.B Etapa muestreo

Se realizó trabajo de campo del 25 al 27 de abril de 2018 en conjunto con los profesores Paulo Ruiz Cubillo y Ronald Naranjo Ureña para realizar el muestreo tanto de los materiales rocosos como de los inconsolidados.

Para el caso del sustrato rocoso, se trabaja con respecto a las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, basándose en los mapas de la

Península de Nicoya creados por Denyer *et al.* (2014), se les da prioridad a las que se encuentran cerca de la línea de costa, puesto que serían las primeras en erosionarse debido a su cercanía del mar. Se presentan las siguientes siete formaciones: Complejo de Nicoya, Puerto Carrillo, Piedras Blancas, Punta Pelada, Santa Teresa, Curú y Arío. Se descartó el análisis de las formaciones Cóbano, Loma Danta y Sabana Grande debido a que afloran en el área de manera muy puntual y en sitios alejados de la línea de costa; el Miembro Cerco de Piedra se incluyó dentro de la formación Curú y no se analizó como una unidad aparte como sí lo hace Denyer *et al.* (2014) en los mapas geológicos de la península de Nicoya. De cada una de las anteriores se elige un sitio para muestrear, el cual debe ser un afloramiento donde la roca se muestre completamente sana, preferiblemente que se encuentre relativamente cerca de la RN-160 y de la línea de costa (Tabla 4 y Figura 33).

Tabla 4. Sitios de muestreo para la prueba con la máquina de Los Ángeles.

Código de muestra	No. Identificación	Formación Geológica	Coordenadas CRTM05
TE-R-25/4/18-01	M.911-18	Complejo de Nicoya	311645,606 E; 1107388,855 N
TE-R-26/4/18-01	M.912-18	Puerto Carrillo	337347,381 E; 1091089,240 N
TE-R-26/4/18-02	M.913-18	Piedras Blancas	333465,913 E; 1093075,515 N
TE-R-26/4/18-03	M.914-18	Arío	327223,922 E; 1093123,922 N
TE-R-26/4/18-04	M.915-18	Curú	317825,443 E; 1097562,426 N
TE-R-26/4/18-05	M.916-18	Punta Pelada	316099,661 E; 1100635,275 N
TE-R-27/4/18-01	M.917-18	Santa Teresa	315921,450 E; 1101746,494 N

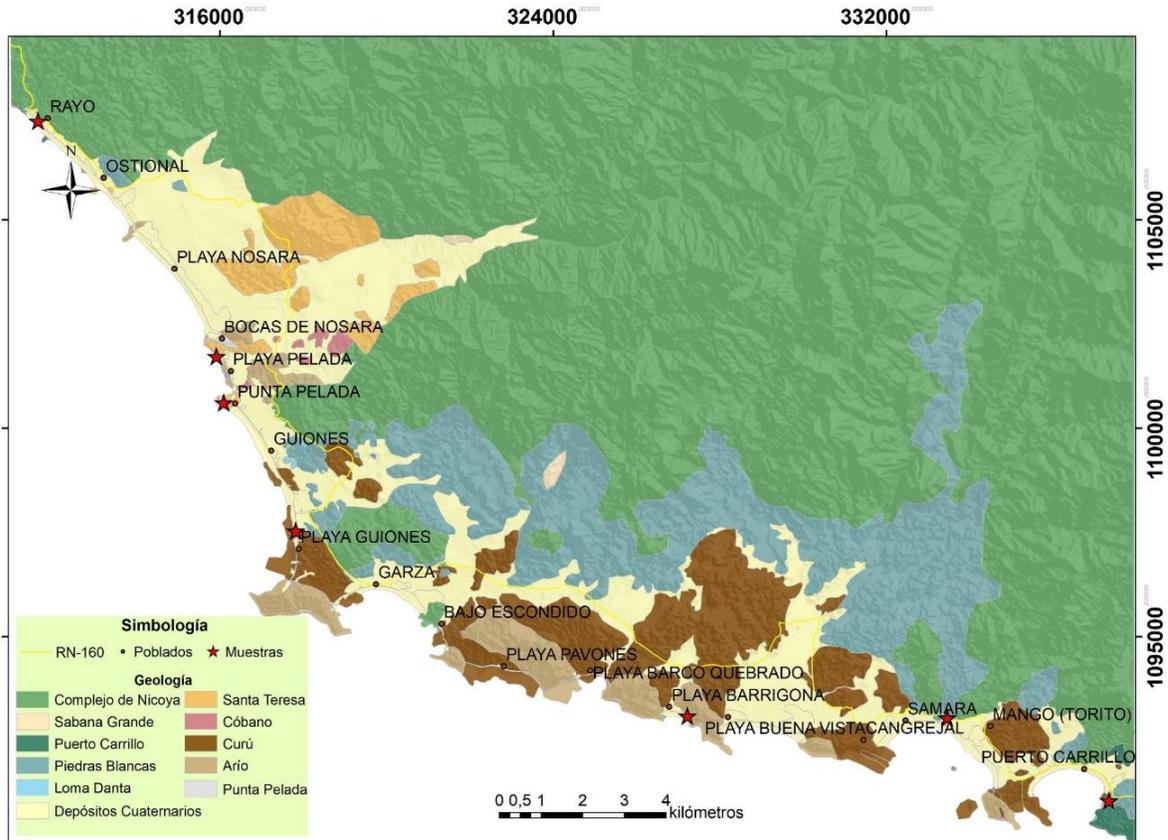


Figura 33. Sitios de muestreo para prueba con Máquina Los Ángeles. Las estrellas rojas son los puntos de donde se obtuvieron las muestras.

Se recolectaron muestras en los sitios elegidos; con la ayuda de una piqueta se recolectaron en sacos de entre 5 y 10 kilogramos de muestra por cada una de las formaciones, con tamaño aproximado al de un puño y asegurándose que se trataba de roca sana para posteriormente llevar al laboratorio del Lanamme UCR para realizarles el Ensayo Los Ángeles.

En cuanto al sustrato blando, los sitios se eligieron según el tipo de geoforma, basándose en el mapa geomorfológico (Capítulo 3) y tratando de elegir lugares donde muestrear en planicies aluviales o marinas, desembocaduras o estuarios y playas; se trató de tomar muestras representativas del comportamiento en general de los materiales, puesto que el muestreo de cada una de las planicies, desembocaduras y playas hubiese tomado mucho tiempo, esfuerzo y recursos de laboratorio, por lo que no era viable ni necesario. Se muestrearon la mayoría de

ellos y los que no se asimilaron al más cercano. Los criterios de elección para los sitios fueron: cercanía a la carretera, distancia a la línea de costa y extensión de la geoforma (priorizando las de mayor extensión); también se trató de obtener al menos una muestra de la planicie, desembocadura y playa asociada a cada uno de los cuadrantes en los que se dividió el área de estudio (Tabla 5 y Figura 34).

Tabla 5. Información acerca de las muestras obtenidas para el Análisis Granulométrico.

Código de muestra	No. Identificación	Lugar	Tipo geoforma	Coordenadas CRTM05
TE-S-25/4/18-01	M-896-18	Ostional	Desembocadura	311373,291 E; 1107588,069 N
TE-S-25/4/18-02	M-897-18	Ostional	Playa	313149,755 E; 1105908,778 N
TE-S-25/4/18-03	M-898-18	Ostional	Llanura	313190,672 E; 1105945,956 N
TE-S-26/4/18-01	M-899-18	Carrillo	Desembocadura	336644,899 E; 1091905,884 N
TE-S-26/4/18-02	M-900-18	Sámara	Playa	333198,598 E; 1092950,044 N
TE-S-26/4/18-03	M-901-18	Sámara	Llanura	331778,465 E; 1092634,171 N
TE-S-26/4/18-04.	M-902-18	Buena Vista	Desembocadura	328053,113 E; 1092851,813 N
TE-S-26/4/18-05	M-903-18	Buena Vista	Planicie	328157,898 E; 1093409,801 N
TE-S-26/4/18-06	M-904-18	Barrigona	Playa	327081,577 E; 1093190,246 N
TE-S-26/4/18-07.	M-905-18	Garza	Llanura	320528,028 E; 1096542,463 N
TE-S-26/4/18-08	M-906-18	Garza	Playa	319742,986 E; 1096230,886 N
TE-S-26/4/18-09.	M-907-18	Guiones	Playa	317825,443 E; 1097562,426 N
TE-S-26/4/18-10	M-908-18	Guiones	Llanura	317927,425 E; 1097627,970 N
TE-S-26/4/18-11	M-909-18	Pelada	Playa	316395,015 E; 1100811,075 N

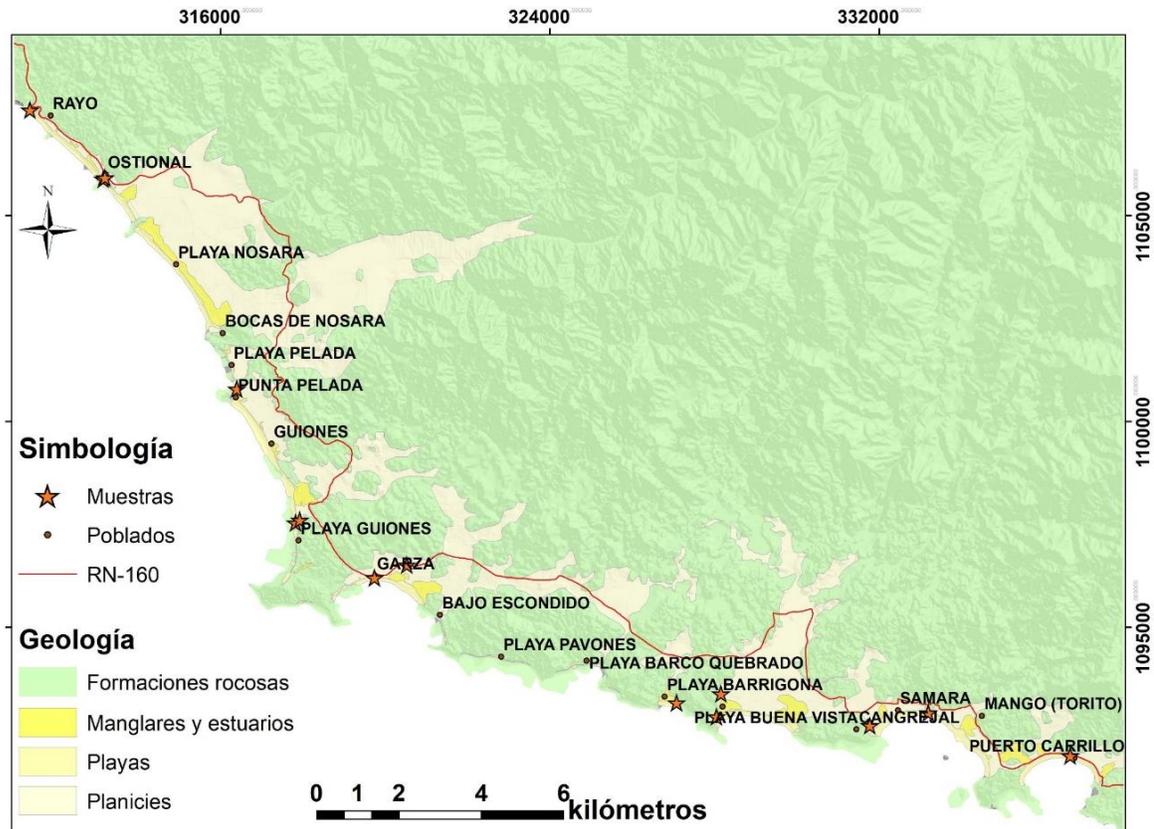


Figura 34. Mapa de los sitios de donde se obtuvieron las muestras para el Análisis Granulométrico. Las estrellas muestras los puntos donde se muestreó.

La recolección de las muestras se realizó, al igual que para el Ensayo Los Ángeles, recogiendo el material del lugar más cercano al punto definido para el muestreo. Utilizando una pala se extrae sedimento aproximadamente a 30 cm de profundidad, verificando que este sea el sedimento natural del lugar y no un relleno o algún material transportado. Se utilizan bolsas de plástico para transportar las muestras desde el campo hasta el laboratorio, la cantidad de sedimento recolectado es similar al de la bolsa plástica llena. En la Figura 35 se ilustra el método de muestreo:



Figura 35. Obtención de la muestra para análisis granulométrico. Se puede apreciar cómo se obtiene una muestra de suelo que trata de incluir los horizontes representativos de la morfología analizada.

4.2.6.C Descripción de pruebas de laboratorio

En este trabajo se utilizan los ensayos geotécnicos de Granulometría y la Prueba de Abrasión Los Ángeles en la obtención del parámetro de geología para la elaboración de los mapas de susceptibilidad ante erosión costera. Para establecer cuál de los dos ensayos se aplica a la muestra colectada, se clasifican en muestras de sustrato blando y de sustrato rocoso, ya que las propiedades físicas de cada uno son diferentes y esto incide sobre la facilidad con que el material es removido por el oleaje y las mareas.

4.2.6.C.1 Ensayo de Granulometría

Tiene como objetivo determinar las proporciones de los diferentes tamaños de grano en el material; con el fin de determinar sus propiedades mecánicas y la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Con el fin de obtener la distribución de tamaños de partículas, se emplean tamices estandarizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración indicado en la Tabla 6. Para suelos de tamaño inferior, se utiliza el método de análisis granulométrico de suelos por vía húmeda, basado en la Ley de Stokes.

Tabla 6. Numeración y abertura de tamices. Fuente: Espinace R., (1979).

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76,12	Grava
2"	50	50,8	
1 ½"	40	38,10	
1"	25	25,40	
¾"	20	19,05	
⅜"	10	9,52	
Nº4	5	4,76	Arena Gruesa
Nº10	2	2,00	Arena Media
Nº20	0,90	0,84	
Nº40	0,50	0,42	
Nº60	0,30	0,25	Arena Fina
Nº140	0,10	0,105	
Nº200	0,08	0,074	

4.2.6.C.2 Ensayo con Máquina Los Ángeles

Basándose en el protocolo de Lanamme (2018), se describe a continuación el ensayo con la máquina Los Ángeles:

Consiste en hacer golpear una muestra de material con una carga abrasiva dentro de un tambor metálico (giratorio), a una determinada velocidad. Este ensayo usualmente es una medida de la degradación de un agregado mineral de graduación estándar, resultado de una combinación de acciones incluyendo la abrasión o desgaste, impacto y trituración en un tambor de acero rotatorio que

contiene un número específico de esferas de acero, aunque en este caso se pretende analizar muestras que no van a ser utilizadas para agregados. Después del número prescrito de revoluciones, el contenido se removerá del tambor y la porción de agregado se tamizará para medir la degradación como un porcentaje de pérdida. El resultado del ensayo es la diferencia entre el peso original de la muestra y su peso al final del ensayo, expresada en porcentaje con respecto al peso inicial, se le llama Coeficiente de Los Ángeles.

Sobre la gradación de la máquina de Los Ángeles para determinar la intensidad de abrasión a la que se va a someter las muestras, este es un ensayo que se realiza a materiales que son usados como agregados, estos deben ser capaces de resistir desgaste y degradación durante la producción, colocación y compactación en pavimentos. En este proyecto se quiere utilizar este ensayo como una medida indirecta y solo para comparar niveles abrasión entre distintos materiales. De esta forma los resultados se podrán correlacionar con las diferencias de desgaste y degradación por procesos naturales entre los diferentes materiales evaluados dentro del área de estudio.

El experimento está estandarizado por la ASTM por la norma C131/C131M-14, la cual se muestra en el Anexo 2 aunque el ensayo que se propone aquí no es para agregados que se van a utilizar en pavimentos, se ha elegido seguir la mayoría de los pasos de esta norma ya establecida. Esto incluye cantidad de material, tiempo y la intensidad a la que se van a someter las muestras durante el experimento. Una variación que se realiza es la utilización de una chancadora para reducir el tamaño de las muestras de gran tamaño previo al ingreso a la Máquina Los Ángeles.

Entre las características que tiene que seguir el experimento según la norma se pueden mencionar las siguientes:

- La velocidad de la máquina debe ser de entre 30 a 33 revoluciones/minutos. Una prueba o experimento completo deberá tener como mínimo 500 revoluciones esto es equivalente a 15 minutos aproximadamente.

- La intensidad depende de la granulometría de la muestra. Existen 4 categorías para la intensidad, A, B, C, y D. La categoría A, es para las granulometrías más gruesas y se trabaja con un total de 12 bolas de acero. Las categorías B y C son para granulometrías intermedias y la categoría C es para las granulometrías más finas. Mientras menor sea la granulometría menor será el número de bolas de acero que se usan durante los experimentos (Tablas 7 y 8).

Tabla 7. Tabla de gradación según el número de esferas y la carga de la masa de muestra. Tomado de ASTM C131/C131M-14.

Gradación	Número de esferas	Masa de carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4580 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Tabla 8. Gradación según tamaño de granulometría de las muestras. Tomado de ASTM C131/C131M-14.

Tamaño de tamiz		Masa indicada por tamaño, (g)			
Pasando (mm)	Retenido (mm)	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25				
25	19	1250 ± 25			
19	12,5	1250 ± 25			
12,5	9,5	1250 ± 25	2500 ± 10		
9,5	6,3	1250 ± 25	2500 ± 10		
6,3	4,75			2500 ± 10	
4,75	2,36			2500 ± 10	
					5000 ± 50
Total		5000 ± 50	5000 ± 50	5000 ± 50	5000 ± 50

Descripción de la Máquina Los Ángeles:

Tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar el motor (Figura 36). En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegura una estanqueidad al polvo. Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada rígida y firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro de modo que se proyecte radialmente hacia el interior en 90 ± 3 mm. La distancia entre la aleta y la abertura, medida a lo largo de la circunferencia exterior del cilindro y en la dirección de rotación, debe ser igual o mayor que 1,25 m. En total la Máquina realiza 500 revoluciones en 10 minutos.



Figura 36. Máquina para el ensayo de abrasión Los Ángeles. Foto de la máquina del laboratorio de Lanamme UCR.

4.2.6.D Trabajo de laboratorio y procedimientos

En esta etapa se realizaron dos sesiones de laboratorio, una correspondiente a los materiales no consolidados, los cuales se analizaron mediante el ensayo de

granulometría y otra para materiales rocosos, que se analizaron mediante el ensayo con la Máquina Los Ángeles.

Ensayo de granulometría

En este apartado se describe el procedimiento llevado a cabo para el presente trabajo y los materiales utilizados. En el Anexo 1 se muestran las tablas y la información obtenida a partir del trabajo de laboratorio.

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo con tamices:

Se explica a continuación el procedimiento a seguir según Bowles (1981) y que fue el realizado para las muestras del presente proyecto.

Entre el equipo necesario se encuentra:

- Un juego de tamices estandarizados según la tabla 6 (Figura 37C).
- Al menos una balanza, preferiblemente dos, con precisión no menor de 1 g.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ (Figura 37D).
- Vibrador mecánico (Figura 37A).
- Herramientas y accesorios: Bandeja metálica, cucharón, recipientes (Figura 37B).



Figura 37. Equipo utilizado en el análisis granulométrico.

Procedimiento: Se homogeniza cuidadosamente el total de la muestra en estado natural. Se reduce por cuarteo una cantidad de muestra ligeramente superior a la mínima recomendada según el tamaño máximo de partículas (Tabla 9).

Tabla 9. Cantidad mínima por ensayar según tamaño de partículas. Fuente: Espinace R., 1979.

Tamaño máximo de partículas (mm)	Cantidad mínima para ensayar (kg)
5	0,5
25	10
50	20
80	32

Secar el material dentro de un horno a una temperatura inferior a 60°. Cuando esté seca, se obtiene la cantidad mínima recomendada (Mt) a ensayar según la Tabla 9.

Una vez obtenido el tamaño de muestra a ensayar, se separa a través del tamiz 3/8" ASTM (10 mm.). La fracción retenida en este tamiz se pesa y se lava con el fin de eliminar todo el material fino menor a 0,074 mm. Para esto, se remoja el suelo en un recipiente con agua hasta que las partículas más finas se suelten, enseguida se lava el suelo colocando como filtro la malla N° 200 ASTM (0,08 mm.), hasta observar que el agua utilizada salga limpia. El material retenido en la malla se deposita en una bandeja y se coloca a horno durante 24 horas. Cumplido el tiempo de secado y una vez enfriada la muestra, se pesa la muestra de ensayo y por diferencia con respecto a Mt se obtiene el material fino por lavado.

Posteriormente, se deposita el material en la criba superior del juego de tamices, los que deberán encontrarse limpios y ordenados en forma decreciente hasta la criba 3/8". El juego deberá contar de una tapa en la parte superior y una bandeja de residuos en la inferior. Se hace vibrar el conjunto durante 5 a 10 minutos, tiempo después del cual se retira del vibrador y se registra el peso del material retenido en cada tamiz.

Para la fracción de muestra que pasó el tamiz 3/8", el procedimiento es similar, salvo que una vez lavada y seca, se ensaya una muestra representativa de 500 g. utilizando los tamices comprendidos entre la malla N° 4 y la N° 200 ASTM.

Se grafica la curva granulométrica donde la ordenada será el porcentaje que pasa en peso en cada tamiz en escala natural y la abscisa el tamaño (diámetro equivalente) de las partículas en escala logarítmica.

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo vía húmeda:

En este apartado se explica el análisis de partículas por vía húmeda según Bowles (1981). Este método se utiliza para obtener un valor estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran comprendidas entre los 0,074 mm (malla N° 200 ASTM) y hasta alrededor de 0,001 mm. El análisis, utiliza la relación entre la velocidad de caída de una esfera en un fluido, el diámetro

de la esfera, el peso específico de la esfera como del fluido y la viscosidad de este, se expresa por medio de la Ley de Stokes.

El procedimiento consiste en mezclar una cantidad de suelo (50 g) con agua destilada más 125 ml de un agente dispersante, el que neutraliza las cargas eléctricas sobre las partículas más pequeñas del suelo que, a menudo, tienen carga negativa y se atraen entre sí con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionan como partículas. Así se obtiene una solución de 1000 ml, seguidamente se agita la solución dentro de una mezcladora y se vacía a otra probeta de 1000 ml de capacidad que se encuentre apoyada sobre una base firme. Accionar el cronómetro, introducir el hidrómetro y el termómetro. Con las lecturas del hidrómetro y sus respectivas temperaturas, calcular el peso de los sólidos en suspensión para poder estimar el diámetro de las partículas. Se utiliza para ello un nomograma desarrollado por Casagrande, que está basado en la Ley de Stokes.

Ensayo con Máquina Los Ángeles

Para el análisis que se pretende desarrollar en este trabajo, se utilizó siempre la misma máquina, a las mismas revoluciones por minuto y con la misma duración para cada prueba. Se trabajó siempre con la misma granulometría de muestras en un tamaño intermedio, para este caso las muestras se procesan utilizando la gradación categoría A. Para el experimento, la norma permite seleccionar manualmente o por medio de tamices el tamaño de las muestras que van a ser utilizadas en el ensayo. Este procedimiento posiblemente se tenga que hacer con las diferentes muestras recolectadas para que todas tengan la misma granulometría. Por lo tanto, la única variable que se estaría modificando es el origen y tipo de cada muestra que se analice. Se tiene que hacer un cálculo de pérdida entre la masa original y la masa final después de someterla al experimento, ese porcentaje de pérdida es lo que se relaciona con la abrasión. Se espera que los resultados generados a partir de este experimento estarían mostrando diferencias en el grado de abrasión de los diferentes materiales. El resultado de este proceso

mecánico es el que se estaría correlacionando con un proceso natural de abrasión y erosión en las costas para los diferentes materiales ensayados.

Materiales necesarios para este laboratorio:

- Máquina de los Ángeles
- Balanza que permite la determinación de la masa con precisión de 0,1%
- Esferas (carga abrasiva). Estará formada por 12 esferas de acero de 45 a 50 mm de diámetro y con una masa de 440 ± 50 g cada una.
- Tamices
- N° 12, Tamiz de lavado
- Horno que pueda mantener una temperatura uniforme de 110°C

Procedimiento: Se procede a colocar la muestra con la carga abrasiva, la cual consiste en esferas de acero, de un diámetro aproximado de 46,8 mm y una masa comprendida entre 390 g y 445 g (Figura 38A). La carga abrasiva para nuestro caso es de 12 esferas, ya que el tamaño máximo del material es mayor que $\frac{3}{4}$ " y la masa total de la muestra es $5000 \text{ g} \pm 25 \text{ g}$.

Ya colocada la muestra con la carga abrasiva correspondiente en la máquina de Los Ángeles, se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 r.p.m) hasta completar 500 revoluciones. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente constante.

Se extrae la muestra de la máquina, se pasa por el tamiz No. 12 y luego se pasa por los tamices de 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ". En la figura 38B se observan las muestras separadas y puestas en recipientes después de haber pasado por los tamices indicados anteriormente, previamente al lavado final. Por último, se lavan

las muestras para eliminar los finos restantes y se meten de nuevo al horno. Se pesan al final y se calcula el coeficiente.

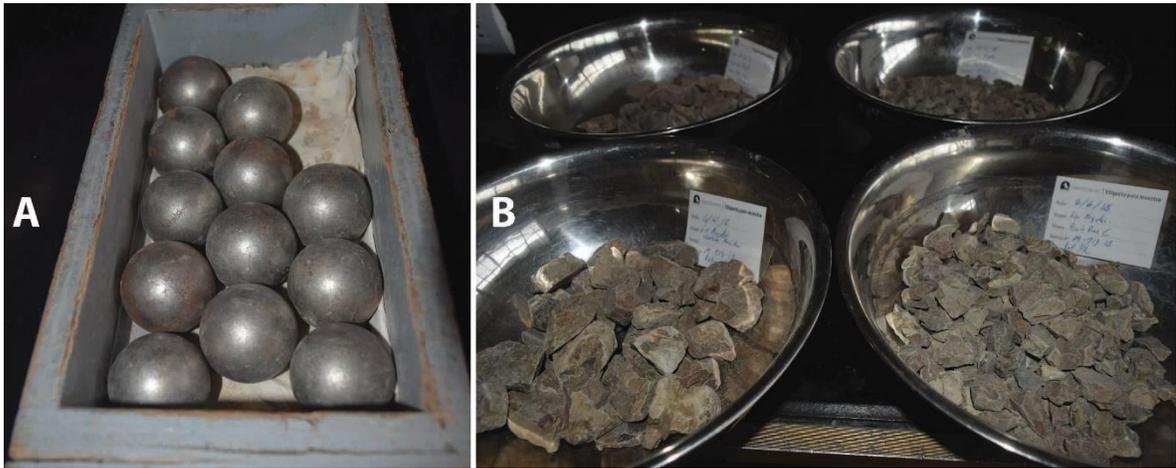


Figura 38. Materiales utilizados para el Ensayo Los Ángeles. A: Carga abrasiva para ensayo Los Ángeles. B: Muestra separada por tamaño durante el ensayo con Máquina Los Ángeles.

4.2.7 Ponderación de los parámetros

Los diversos parámetros considerados relevantes en la evaluación de las susceptibilidades de las zonas costeras ante erosión tienen diferentes grados de importancia y deben representar pesos variables en la clasificación final de susceptibilidad. Sin embargo, el peso que debe asignarse a cada parámetro no es, necesariamente, igual en todos los lugares de las zonas costeras, por lo que el análisis de la mejor forma de ponderación es difícil de realizar.

El software QGIS ofrece una manera relativamente fácil y rápida de probar y evaluar varios escenarios variando el peso dado a cada parámetro. Todos los escenarios fueron evaluados de manera empírica.

El peso de los parámetros utilizados en este estudio considera la reducción de los coeficientes de ponderación relativos a la clasificación de cobertura del suelo y de los rangos de marea. Estos parámetros se ven reducidos en importancia debido a que la cobertura del suelo es un parámetro que se considera pocas veces en este tipo de análisis y el rango máximo de marea es prácticamente uniforme en todos los lugares de la misma zona costera (Coelho, 2005).

En el criterio utilizado se aumentan los pesos de los parámetros de geología y de la distancia a la línea de costa, aspectos que condicionan fuertemente la susceptibilidad final, por ejemplo, puntos localizados sobre zonas con rocas de mayor resistencia o puntos distantes de la costa tienen necesariamente que ser poco vulnerables. Una razón adicional del porqué la geología es el parámetro más valorado del criterio de peso utilizado son los análisis de laboratorio que se llevaron a cabo con el fin de obtener la resistencia de los materiales geológicos. Hay que recordar también que los lugares alejados de la interfaz entre la tierra y el mar quedan naturalmente protegidos de la acción del oleaje debido a su lejanía o quedan menos protegidos si se encuentran cerca de esta, por lo que también se le da mucha importancia al parámetro de distancia a la línea de costa (Tabla 10).

A los parámetros restantes (ET, GM, AO, TE, AA) se les da un peso de 1 debido a que son de importancia media.

Tabla 10. Pesos utilizados en la ponderación de los parámetros.

Pesos	Parámetros
0,5	CT, RM
1	ET, GM, AO, TE, AA
2	GL, DC

4.3 Escenarios ante elevación del nivel del mar

Se utiliza un MED elaborado con datos de sensor *LIDAR*, estos datos fueron adquiridos por la CNE y corresponde con un barrido de aproximadamente 800 m a lo largo de la línea de costa, con una resolución de entre 3 y 4 puntos por m².

Con este MED funcionando como base topográfica se realizan simulaciones de elevación del nivel del mar e inundación de áreas costeras. Se realizan estas simulaciones tomando en cuenta variables mareográficas como proyecciones acerca de la elevación del nivel del mar por calentamiento global, fenómeno del Niño y mareas extraordinarias. Posteriormente se identifican los sitios propensos a inundarse según las variables mencionadas anteriormente y se compara la posición de la RN-160 con respecto a las zonas inundadas, para así detectar los tramos que podrían verse afectados.

Lizano & Lizano (2010) realiza escenarios de inundación para la ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. Para llevar a cabo esto realiza el siguiente procedimiento: 1-Levantamiento de campo mediante toma de puntos con GPS y referido a hitos topográficos del IGN. 2- Procesamiento y corrección de los datos obtenidos en el campo. 3- Definición y generación del MED. 4- Creación de los mapas finales y obtención de áreas inundables según las variables mareográficas.

La metodología utilizada en el presente proyecto es similar a la de Lizano & Lizano (2010), aunque con algunas modificaciones: en este caso no se realiza un levantamiento topográfico puesto que se dispone de un MED *LiDAR*. Las dos metodologías se asemejan en aspectos como: se mide un nivel medio del mar *in situ* para realizar un ajuste de los datos topográficos a este y se analizan diferentes escenarios de elevación del agua.

4.3.1 Medición del nivel medio del mar *in situ*:

La medición de la altura del nivel medio del mar se hizo con respecto al nivel cero de la tabla de mareas, también conocido como promedio de bajamares de sicigias (Lizano, 2006). Se realiza mediante mediciones topográficas de la altura que alcanza tanto la marea alta como la baja, se calcula la altura de varios puntos de interés (Anexo 3). Se eligió el lugar conocido como “El Golfo”, que corresponde con la parte norte de playa Pelada, esto se debe a que el sitio posee una desembocadura, donde se pueden realizar mediciones del nivel del mar con presencia de poco oleaje, lo cual reduce el grado de incertidumbre; otra característica que presenta dicho lugar y que favorece las mediciones es su forma de bahía, lo que hace que el oleaje se vea en parte reducido.

Para este proyecto se realizaron mediciones de la altura topográfica que alcanza el nivel del mar, por lo que durante dos días se midió la altura de la pleamar y la bajamar. Como primer paso, se utiliza el software WXTide32, este programa

presenta predicciones de mareas para diferentes partes del mundo, en este caso se utilizó la estación de Puntarenas como referencia.

Las mediciones de la altura de la pleamar y la bajamar se llevaron a cabo los días 15 y 16 de setiembre, por lo tanto, se consultó la predicción de marea de ese día en el WXTide32, es importante indicar que en este programa los datos de marea también se encuentran referidos al nivel de bajamares de sicigias (Figura 39, Tabla 11). Esta medición se realiza para mejorar la precisión de los modelos de elevación del nivel del mar, además porque podría haber inconsistencias en valor de la altura del MED *LiDAR* en comparación con la realidad, provocadas por factores como: levantamiento, subsidencia, erosión, entre otros.

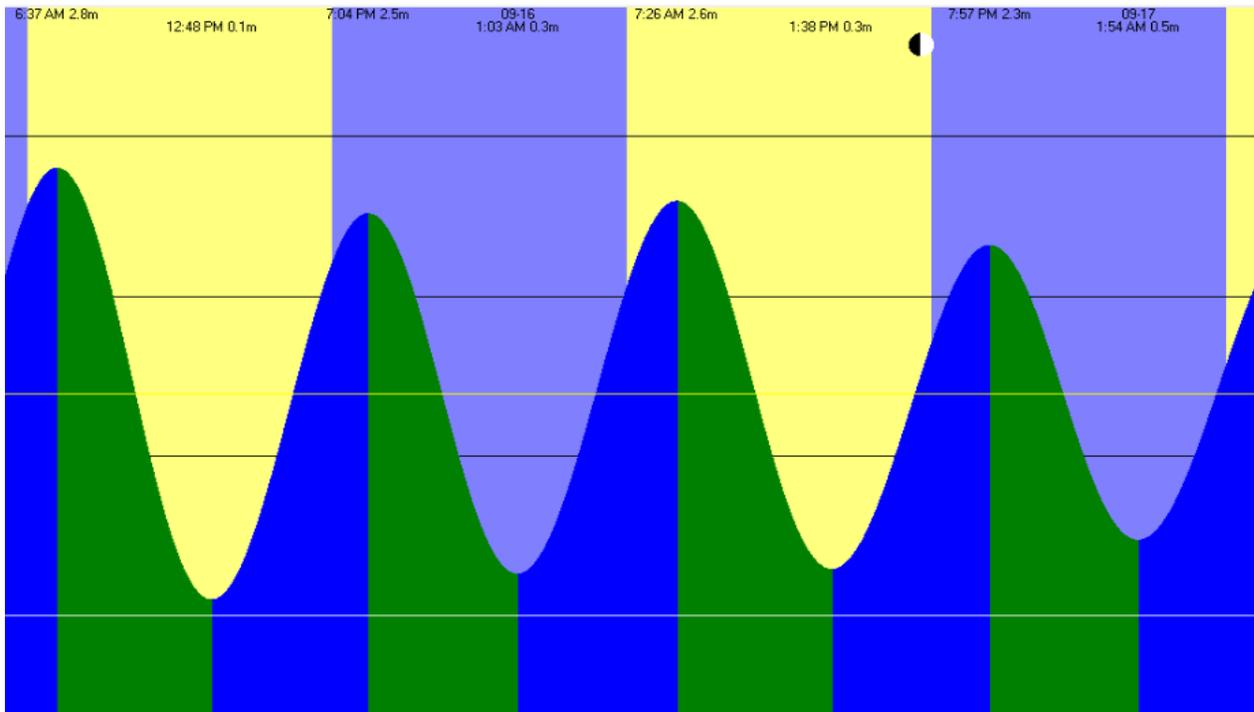


Figura 39. Vista de las predicciones de mareas mostradas por el WXTide32.

Tabla 11. Predicciones de marea utilizadas en la medición de campo.

Marea	Fecha	Hora	Altura
Pleamar	15 de setiembre de 2018	6:37am	2,8m
Bajamar	15 de setiembre de 2018	12:48pm	0,1m
Pleamar	16 de setiembre de 2018	7:26am	2,6m
Bajamar	16 de setiembre de 2018	1:38pm	0,3m

Con respecto a estas predicciones de marea se planea la logística de la medición. Se establece un punto base de la estación y coordenadas arbitrarias. Es necesario estar en el lugar con al menos 40 minutos de anticipación para instalar y configurar la estación. Para las pleamares la medición se realizó cerca de la desembocadura de “El Golfo” de playa Pelada y las bajamares se midieron en la plataforma de abrasión (Tabla 12).

Tabla 12. Coordenadas de las mediciones de la altura de la marea.

Marea	Fecha	Coordenadas	
Pleamar1	15 de Setiembre de 2018	1101697,502 N	316121,978 E
Bajamar1	15 de Setiembre de 2018	1101657,004 N	316034,592 E
Pleamar2	16 de Setiembre de 2018	1101697,718 N	316123,236 E
Pleamar2	16 de Setiembre de 2018	1101658,245 N	316035,095 E

Con respecto a las mediciones de altura de las pleamares y bajamares se midieron las coordenadas y altura exactas del punto ST (1101679,359 N; 316130,3446 E; 3,58 m), que es donde se colocó la estación. Se tomaron también otros puntos de amarre con respecto al nivel medio del mar (NMM) medido en el campo (Tabla 13).

Tabla 13. Coordenadas de los puntos de referencia ajustados al nivel medio del mar (NMM).

Coordenadas		Elevación	Descripción
1101715,687 N	315952,957 E	-0,3694	Roca
1101757,971 N	315930,9493 E	0,6057	Roca2
1101551,39 N	316167,23 E	3,4170	Palmera

El Anexo 3 corresponde con el informe por parte del profesional en topografía que describe paso a paso el procedimiento realizado, este incluye también toda la información obtenida a partir de estas mediciones.

4.3.2 Simulación del ascenso del nivel del mar mediante *software*:

La simulación se realizó con la ayuda del programa *Global Mapper*, del cual Lanamme UCR posee licencia. Este es un SIG que tiene la capacidad de manejar datos vectoriales, raster, crear vistas y realizar conversiones, entre otras funciones

generales de los SIG. En su pantalla principal, en la pestaña *analysis* posee una herramienta llamada “*simulate Water Level Rise/Flooding...*”, la cual genera una vista de las áreas inundadas en el MED, esto a partir de un punto de referencia que en nuestro caso es el nivel medio del mar.

Según la medición topográfica realizada obtenemos un NMM de 1,45 m; esto concuerda con la marea promedio para la costa Pacífica de Centroamérica, que es de 1,41 m y es una aproximación al nivel medio del mar como lo afirma Lizano (2006). Las simulaciones del ascenso del nivel del mar en este modelo son generadas a partir de este nivel de 1,45 m de altura.

A lo anterior hay que sumarle la diferencia que existe entre los valores de altura de las mediciones tomadas en el campo con ayuda de equipo topográfico y los valores de altura obtenidos durante el barrido *LiDAR*. Tomando en cuenta las mediciones hechas en el campo, se obtiene que el promedio de las diferencias es de 0,375 m, donde los valores del MED *LiDAR* poseen alturas menores que las mediciones de campo. Es necesario considerar esta diferencia antes de realizar los modelos de ascenso del nivel del mar y ajustar la altura del MED *LiDAR* a la altura de los datos medidos en el campo, puesto que estos están referidos al nivel medio de bajamares de sicigias.

En cuanto a la resolución de los escenarios generados mediante el *Global Mapper*, se utiliza el valor de 2 m para los ejes X y Y. La resolución afecta el detalle y la rapidez con que se calcula el área inundada. Puesto que se trata de datos *LiDAR*, un valor de resolución menor haría que la simulación tarde mucho tiempo en completarse, esto puede derivar en mayor cantidad de errores y hasta hacer que el programa colapse.

4.3.3 Escenarios analizados

Son muchos los escenarios que se pueden analizar, estos dependen del rango temporal, de las variables que se incluyan y de los fenómenos que se tomen en cuenta. Para el presente estudio se modelaron los escenarios según el ascenso

del nivel del mar debido al calentamiento global. También se hace el análisis añadiendo el efecto causado por eventos como el Fenómeno del Niño (ENOS) y por mareas máximas. Se toman en cuenta las siguientes variables:

- Calentamiento Global (CG):

Es el aporte antropogénico al efecto invernadero, el cual ha modificado la atmósfera con repercusiones en el sistema climático mundial, de manera que la temperatura promedio del planeta ha aumentado significativamente durante un corto periodo de tiempo, principalmente durante los últimos 50 años; esto tiene efectos como derretimiento de los bloques de hielo en los polos, cambio de las corrientes marinas y expansión térmica del océano, debido a una temperatura promedio mayor. Todo esto implica el aumento de volumen de las masas de agua oceánica y, por consiguiente, un ascenso en el nivel del mar (IPCC, 2007).

IPCC (2007) indica predicciones del ascenso del nivel del mar para varios rangos de tiempo (Tabla 14).

Tabla 14. Predicciones para el aumento del nivel del mar debido al cambio climático.

No.	Altura (cm)	Periodo IPCC 2007 (años)
1	30	30
2	100	50-60
3	150	90
4	200	100

Para el análisis del posible daño que el ascenso del nivel del mar tenga sobre la RN-160 se decide evaluar los escenarios a 50 años (1 m) y a 100 años (100 m). Hay que tener en cuenta que este aumento del nivel del mar corresponde a la predicción para el año 2007, por lo que los aumentos de 1 m y 2 m serían una realidad en los años 2067 y 2107 respectivamente.

- El Fenómeno del Niño (ENOS):

Es un fenómeno climático relacionado con el Pacífico Oriental ecuatorial, el cual es erráticamente cíclico con una recurrencia que ronda los 2-7 años (Philander,

1990). Incide sobre la elevación del nivel del mar de manera que, al haber un aumento en la temperatura del océano, este aumenta su volumen, ocupando un mayor espacio, lo que implica que el nivel aumente regionalmente. Lizano (1997) realizó observaciones del nivel de los océanos en periodos de Fenómeno del Niño y determinó que se produjo una elevación de 30 cm en promedio por expansión térmica producto de ENOS (El Niño-Oscilación Sur).

- Mareas máximas (MM):

Lizano (2009) indica que el valor promedio de las mareas máximas es de 309 cm, y la marea máxima registrada para el Pacífico de Costa Rica poseen una altura de 3,29 m, esta ocurre aproximadamente cada 4,65 años, según un análisis basado en las predicciones de marea para los años 2010 a 2099.

Para este estudio se realizan 4 simulaciones de la elevación del nivel del mar, que son las siguientes:

- a) **1 m (CG):** 1 m debido a un aumento del nivel del mar por calentamiento global a 50 años.
- b) **4,6 m (CG+ENOS+MM):** 4,6 m considerando un escenario hipotético donde se combina un aumento del nivel del mar por calentamiento global a 50 años (1 m) junto con un Fenómeno del Niño (30 cm) y una marea máxima (3,29 m).
- c) **2 m (CG):** 2 m debido a un aumento del nivel del mar por calentamiento global a 100 años.
- d) **5,6 m (CG+ENOS+MM):** 5,6 m considerando un escenario hipotético donde se combina un aumento del nivel del mar por calentamiento global a 100 años (2 m) junto con un Fenómeno del Niño (30 cm) y una marea máxima (3,29 m).

Es importante indicar que las evaluaciones mencionadas anteriormente se realizan tomando como referencia el NMM de 1,45 m medido en el campo, además de que hay que considerar también los 0,37 m de diferencia de altura entre el MED *LiDAR* y los datos medidos en el campo.

CAPÍTULO V

5. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del IE-SC, el análisis de susceptibilidad ante erosión costera y los escenarios ante elevación del nivel del mar se presentan en esta sección; así como los mapas respectivos a cada uno de estos análisis.

5.1 Resultados del diagnóstico utilizando el IE-SC

Mediante este trabajo, se logró identificar los segmentos de línea de costa que han sufrido erosión en el litoral en el pasado, o que muestran signos de erosión en el presente, así como su grado de intensidad. Se definen niveles que indican la magnitud de la erosión, los cuales se explican en el apartado 4.1.2. Dicha información es presentada de forma gráfica por medio de mapas y se realiza un análisis con respecto a la infraestructura que es vulnerable a daños, en este caso la RN-160 y los puentes que han sido parcialmente dañados.

Sectores con signos nulos de erosión: Nivel 1

En general, todas las playas poseen sectores donde la erosión no es aparente, porque hay un equilibrio dinámico entre erosión y sedimentación. Las playas que se sitúan más al Norte del área de estudio tienen relativamente menor longitud de línea de costa erosionada, como es el caso de Ostional en su parte Norte, playa Pelada en su mayoría, playa Guiones en su parte central (cerca del río Rempujo), playa Garza en su parte Norte y Central. Al Sur del área de estudio también se presentan zonas de relativa estabilidad como la mayor parte de playa Buena Vista, donde la playa posee un comportamiento normal, sin mostrar signos de erosión (Figura 40), la parte más al Sur de playa Sámara y la punta Norte de playa Carrillo.



Figura 40. Nivel de erosión 1, en playa Buena Vista. Foto tomada el 22 de enero de 2018 durante la marea baja. Coordenadas: 328294,12 E, 1092920,46 N.

Sectores con signos leves de erosión: Nivel 2 y 3

Los niveles 2 o 3 aparecen en todas las playas, son los niveles más abundantes y que en conjunto abarcan mayor longitud de la línea de costa. En estos sitios hay indicios de erosión, desde leve hasta media; se puede observar como el mar empieza a remover los sedimentos no consolidados y empieza a avanzar hacia tierra adentro dejando evidencias físicas como pequeñas terrazas, raíces de árboles expuestas al menos parcialmente, pastos removidos del suelo, etc.

Con respecto al área de estudio, en playa Ostional, los niveles 2 y 3 se presentan como sitios puntuales a lo largo de toda la playa (la mayoría de las veces asociado a desembocaduras de ríos o quebradas).

En playa Ostional se observan en la zona donde se encuentra el acceso principal a la playa raíces levemente expuestas debido a la erosión costera, cercas falseadas, así como infraestructura cercana (viviendas, iglesia, salón comunal y estación para la preservación de las tortugas) a la playa, lo cual califica como nivel 2 (Figura 41A), además una terraza de erosión mayor a 50 cm de altura, sin presencia de desembocadura (Figura 41B). En la parte Norte de la playa se localiza

una terraza de erosión de al menos 1 m, pero esta vez con presencia de desembocadura (Figura 41C).

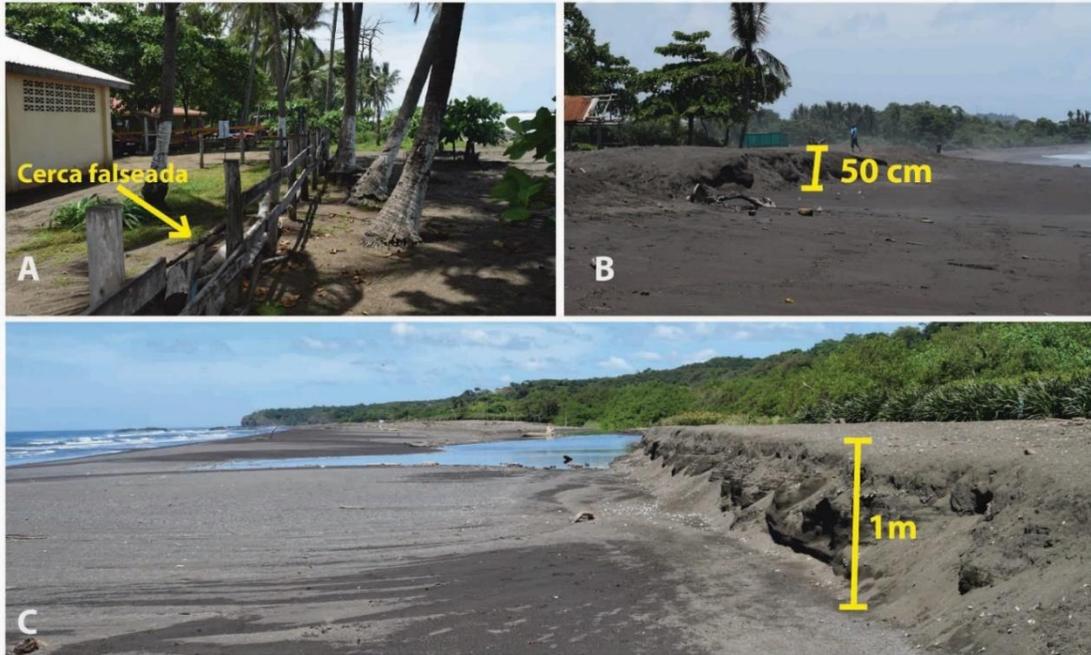


Figura 41. Signos de erosión costera en playa Ostional. A: Cerca falseada y cercanía de la infraestructura a la línea de costa (Fecha: 15/8/2017. Coordenadas: 313195,3 E, 1105846,85 N). B: Terraza de erosión mayor a 50 cm de altura, sin presencia de desembocadura, en Ostional (Fecha: 15/8/2017. Coordenadas: 313320,93 E, 1105730,55 N). C: Terraza de erosión de al menos 1 m, con presencia de desembocadura (Fecha: 8/11/2017. Coordenadas: 312918 E, 1106182,42 N).

En playa Pelada los niveles 2 y 3 únicamente se presentan en la parte más al Norte y en la parte más al Sur de dicho lugar, donde se identifican raíces de palmeras erosionadas y terrazas de al menos 50 cm (Figura 42).



Figura 42. Vista del tipo de erosión presente en playa Pelada (Fecha: 27/8/2017. Coordenadas: 316376,21 E, 1100757,11 N).

En playa Guiones los niveles 2 y 3 son mayoría, abarcan los 6 km de playa con excepción de un segmento que posee nivel 4 en la parte central de playa Guiones. En este sector del área de estudio, los rasgos de erosión más relevantes que se encuentran son: una terraza de erosión con tamaño superior a 1 m, que se ubica junto a un arroyo y fue formada luego del paso de la tormenta Nate en octubre de 2017 (ver figura 43B), este segmento de costa se cataloga con nivel 3. También se encuentra una terraza de aproximadamente 40 cm formada de igual manera luego de la tormenta Nate. La erosión costera por poco destruye algunos de los ranchos de la playa, se observa como la arena en sus bases ha sido removida, dejando una terraza; además, el pasto junto a estos ha sido parcialmente removido (ver figura 43A).



Figura 43. Rasgos de erosión en playa Guiones. A: Ranchos en la playa cerca de ser destruidos por la erosión, se observa cómo se ha creado una terraza de al menos 40 cm, además el pasto ha sido removido parcialmente (Fecha: 23/10/2017. Coordenadas: 317251,44 E, 1099298,55 N). B: Terraza de tamaño superior a 1 m de altura en playa Guiones (Fecha: 17/10/2017. Coordenadas: 316999,2 E, 1099773 N).

En playa Garza, los niveles 1 y 2 se concentran en el sector sur y una franja de menor importancia en la parte central. Se observan principalmente barreras de protección hechas por los dueños de las casas de playa Garza, las cuales son estructuras hechas manualmente, de poca resistencia y de bajo costo, construidas con troncos y latas, estas no han sido afectadas significativamente por el oleaje. (Figura 44A). En playa Barco Quebrado, se presentan los niveles 2 y 3 a lo largo de toda la playa, a excepción de la parte más al Este la cual no presenta erosión. Se presentan algunas casas con pequeños muros de protección ante el oleaje que no han sido afectados significativamente (Figura 44B).



Figura 44. Niveles 2 y 3 en Garza y Barco Quebrado. A: Estructura de protección construida por los dueños de las casas (Fecha: 16/1/2018. Coordenadas: 319433,94 E, 1096164,4 N). B: Casa con pequeño muro de contención (Fecha:15/1/2018. Coordenadas: 324518,96 E, 1094057,09 N).

En el caso de Barrigona, la totalidad de la playa muestra signos de erosión, aunque estos no son severos, por lo que se considera entre los niveles 2 y 3. En playa Buena Vista estos niveles se pueden ubicar cerca de las dos desembocaduras que se localizan en el extremo Este y Oeste.

En Sámara también se encuentran los niveles 2 y 3, a lo largo de toda la playa exceptuando la franja de costa más al Este. Se localizan algunas viviendas frente al océano tienen barreras contra el oleaje construidas con rocas apiladas, para al menos contener en bajo grado el oleaje (Figura 45A). Se ubica una alcantarilla a 200 m hacia el Este del acceso principal a playa Sámara, esta influye en el daño porque drena directamente al mar, aunque el caudal sea bajo si se compara con un río, el agua proveniente de la alcantarilla sumada al oleaje agrava la erosión en las zonas aledañas. Se nota como debido a la alcantarilla se crea una terraza de al menos 50 cm, lo que hace que las palmeras presenten exposición de raíces (Figura 45B). Otro rasgo de importancia que se encontró es la erosión acelerada por una desembocadura en el sector de Matapalo, la cual crea una terraza de altura superior a 1 m y se encuentra cerca de destruir un negocio ubicado frente a la playa. La cerca del negocio ha sido removida parcialmente y las mesas ahora se encuentran junto a la terraza formada (Figura 45C).



Figura 45. Erosión costera en playa Sámara. A: Rocas apiladas para protección de las casas (Fecha: 21/1/2018. Coordenadas: 334694,2 E, 1091618,8 N). B: Alcantarilla en la zona turística de Sámara que cae directamente al mar (Fecha: 5/11/2017. Coordenadas: 332570,75 E, 1092950,4 N). C: Escarpe de erosión que afecta a un restaurante en Sámara (Fecha: 5/11/2018. Coordenadas: 333040,6 E, 1092978,11 N).

En playa Carrillo, la abundancia de palmeras a lo largo de toda la playa evidencia que la mayoría de esta se encuentra afectada por erosión al menos leve, se observan raíces expuestas por toda la franja costera. Se aprecia como hay sectores donde las raíces de palmeras han sido expuestas debido al oleaje y hasta basculadas en algunos casos (Figura 46).



Figura 46. Palmeras basculadas y con raíces expuestas en playa Carrillo (Fecha: 20/1/2018.

Coordenadas: 337061,8 E, 1091736,17 N).

Sectores críticos (de erosión inminente): Nivel 4 y 5

Los niveles 4 y 5 no se presentan en todas las playas, en el caso de playa Nosara, Pelada y Barrigona estos niveles no ocurren; pero donde los hay se encuentran como zonas puntuales y su extensión es corta comparada con otros niveles. Son las zonas que representan mayor peligro de destrucción de infraestructura y requieren de una intervención lo más pronto posible. La mayoría de los lugares que poseen estos niveles se encuentra asociados a desembocaduras y también a la cercanía de las construcciones al mar.

En Ostional, en su extremo Norte, conocido como El Rayo, la RN-160 pasa muy cerca de la línea de marea alta y corre peligro inminente de que empiece a ser socavada, se encuentra a escasos 2 m del nivel de la marea alta (Figura 47A). En este caso la carretera no se encuentra pavimentada, condición que contribuye a la fácil destrucción de esta. Además, hay un pequeño arroyo junto a esta sección de la carretera que podría aumentar la intensidad de remoción de sustrato, tal y como se ha demostrado en otras desembocaduras de la zona.

En playa Guiones, hay dos sectores en particular que son los más afectados por erosión; uno en la parte central y el otro en Guiones Sur. En el sector central, hay viviendas cuyos terrenos han sido parcialmente erosionados, estos han tenido

la necesidad de construir barreras de protección como muros y sacos rellenos de arena para evitar la remoción de sedimento y contener el avance del agua sobre el terreno (Figura 47B). En Guiones Sur, una de las viviendas presenta infraestructura de contención que ya ha sido afectada, incluso el primer muro construido ya fue removido. El segundo muro ya presenta signos de destrucción (Figura 47C).



Figura 47. Ejemplo de sitios con nivel 4 y 5. A: Cercanía al mar del tramo de la RN-160 en el sector Norte de Ostional. La línea amarilla indica el alcance de la marea alta, trazada a partir de los troncos que quedan en la orilla después de la marea alta (Fecha: 15/8/2017. Coordenadas: 311617,7 E, 1107402,6 N). B: Muro de concreto con rocas y sacos rellenos de arena que sirven para contener la remoción de sustrato (Fecha: 19/8/2017. Coordenadas: 317367,15 E, 1099094,1 N). C: Muro de cemento con rocas para contener la erosión. También se observa el muro anterior y que ha sido destruido (Fecha: 28/9/2017. Coordenadas: 317849,15 E, 1097167,2 N).

En playa Garza, en su parte más al Norte, se identifica un segmento de playa que presenta evidencias de erosión considerables, pese a que no está asociado a ninguna desembocadura de río o drenaje por alcantarillas. En este segmento de costa se observa una terraza de erosión que tiene una altura entre 50 cm y 1 m, además de varias palmeras y árboles con las raíces expuestas. Se observa que se construyó originalmente un muro que ya ha sido removido por el oleaje, se construyó un segundo muro que sigue en pie (Figura 48A). La cerca de la propiedad al frente ha ido falseada (Figura 48B).

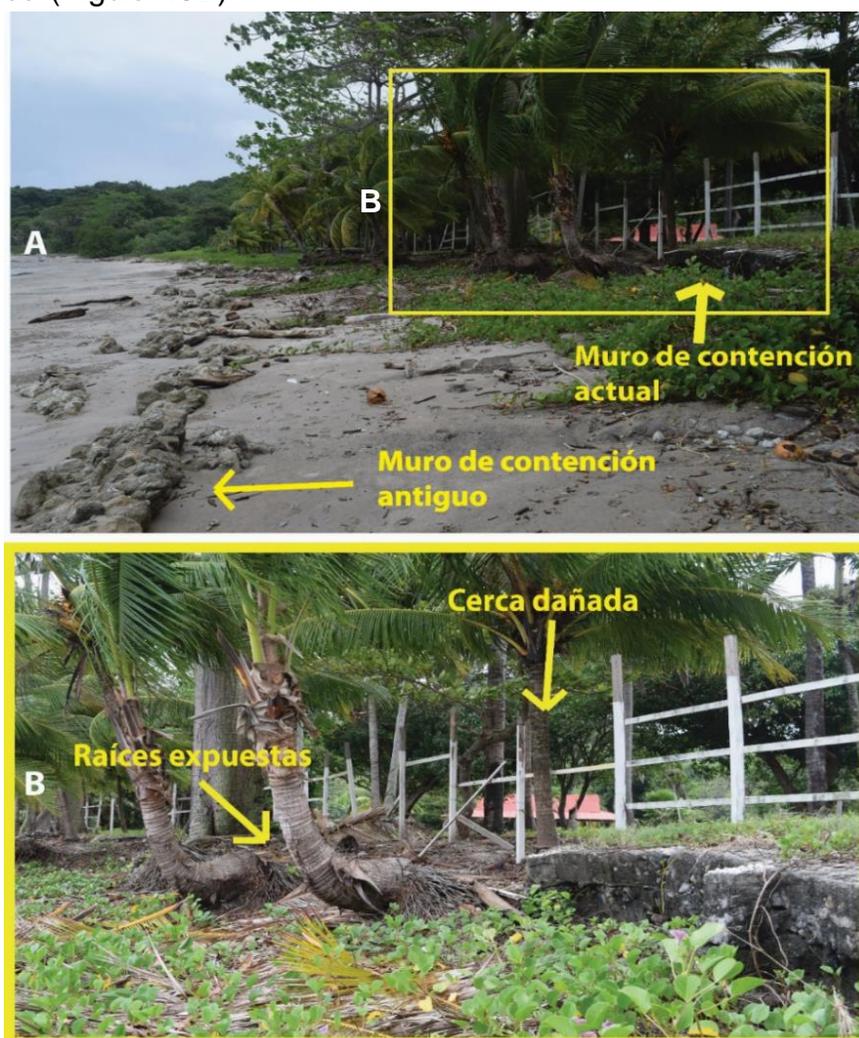


Figura 48. Sector en playa Garza con evidencias de erosión costera considerables. A: A la izquierda se aprecian los escombros de un muro de contención del oleaje construido previamente. B: Foto que muestra el muro de contención (a la derecha), las raíces de las palmeras expuestas y la cerca parcialmente destruida por el oleaje (Fecha: 24/10/2017. Coordenadas: 318837,43 E, 1095895 N).

En Sámara, en el sector más al Norte, en la desembocadura del río Lagarto, se encuentra una línea de palmeras que está protegida por una barrera de contención rústica, construida con bloques métricos de roca en 2008 y reparado en varias ocasiones posteriormente, según el relato de un vecino de la zona. Estos bloques han sido parcialmente removidos por el agua, o se ha lavado el sustrato que los sostiene, haciendo que caigan por gravedad. También las palmeras se han basculado o caído por completo debido a la pérdida del sustrato arenoso (Figura 49 A y B). Esto con frecuencia ocurre en este punto, por lo que personas de la comunidad han tenido que reconstruir parte del muro en varias ocasiones.

En playa Barco Quebrado, se localiza una casa que posee un muro de contención del oleaje hecho con gaviones que ha resultado dañado debido a la acción conjunta del oleaje y el aporte del río; esta casa se ubica contiguo a la desembocadura de la quebrada llamada Barco Quebrado (Figura 49C).



Figura 49. Daños con nivel 4 y 5 en Sámara y Barco Quebrado. A: Barrera de rocas que protege la línea de palmeras, vista general. B: Barrera de rocas parcialmente destruida (Fecha: 20/11/2017. Coordenadas: 332026 E, 1092675,4 N). C: Casa que posee muro de contención dañado debido a la erosión (Fecha: 15/1/2018. Coordenadas: 325237,5 E, 1094078 N).

Playa Carrillo es la que presenta efectos más severos de la erosión costera para el área de estudio. Varios puentes se encuentran parcialmente afectados y algunos tramos de la carretera están cerca de ser falseados debido a la remoción de sedimento. En el caso de los puentes, el material sobre el que se sostienen sus bases ha sido removido, por lo que las fundaciones de la estructura han quedado

expuestas y se ha desestabilizado el puente (Figura 50A y 50B). Incluso se encuentra un puente antiguo que ha sido removido por completo debido a la acción del mar, este todavía se encuentra en el sitio, aunque totalmente fuera de la carretera, tirado hacia el lado de la playa (Figura 50C). Hay al menos dos tramos de la carretera donde el escarpe de erosión se encuentra a menos de un metro del asfalto (Figura 51A). Se localiza también un sector, cerca del parqueo público de Carrillo, donde se ha construido un muro con rocas de gran tamaño (Figura 51B) y otro sector con gaviones, en donde parece que la erosión estaba muy cerca de dañar la infraestructura.



Figura 50. Daños en algunos puentes de playa Carrillo. A y B: Detalle de fundaciones deterioradas debido a la remoción de sedimento de los puentes en playa Carrillo (Fecha: 21/1/2018. Coordenadas: 335611,08 E; 1091700,24 N). C: Puente desarticulado y removido por la acción del mar (Fecha: 21/1/2018. Coordenadas: 336733,46 E; 1091911,28 N).

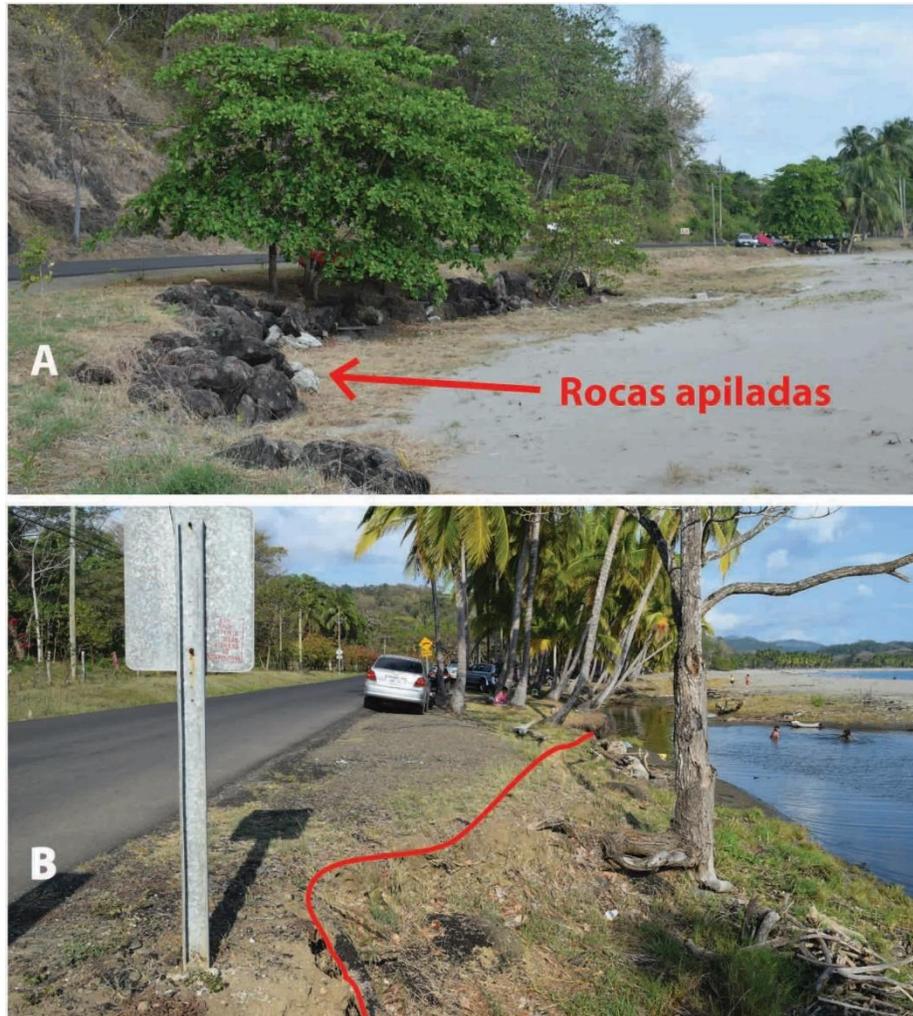


Figura 51. Daños en algunos sitios de Carrillo. A: Muro de contención hecho de rocas grandes apiladas para protección de la carretera ante erosión costera (Fecha: 21/1/2018. Coordenadas: 336587,6 E, 1091940,23 N). B: Escarpe de erosión (línea roja), a menos de 1 m de la RN-160 (Fecha: 21/1/2018. Coordenadas: 335982,23 E, 1091898,15 N).

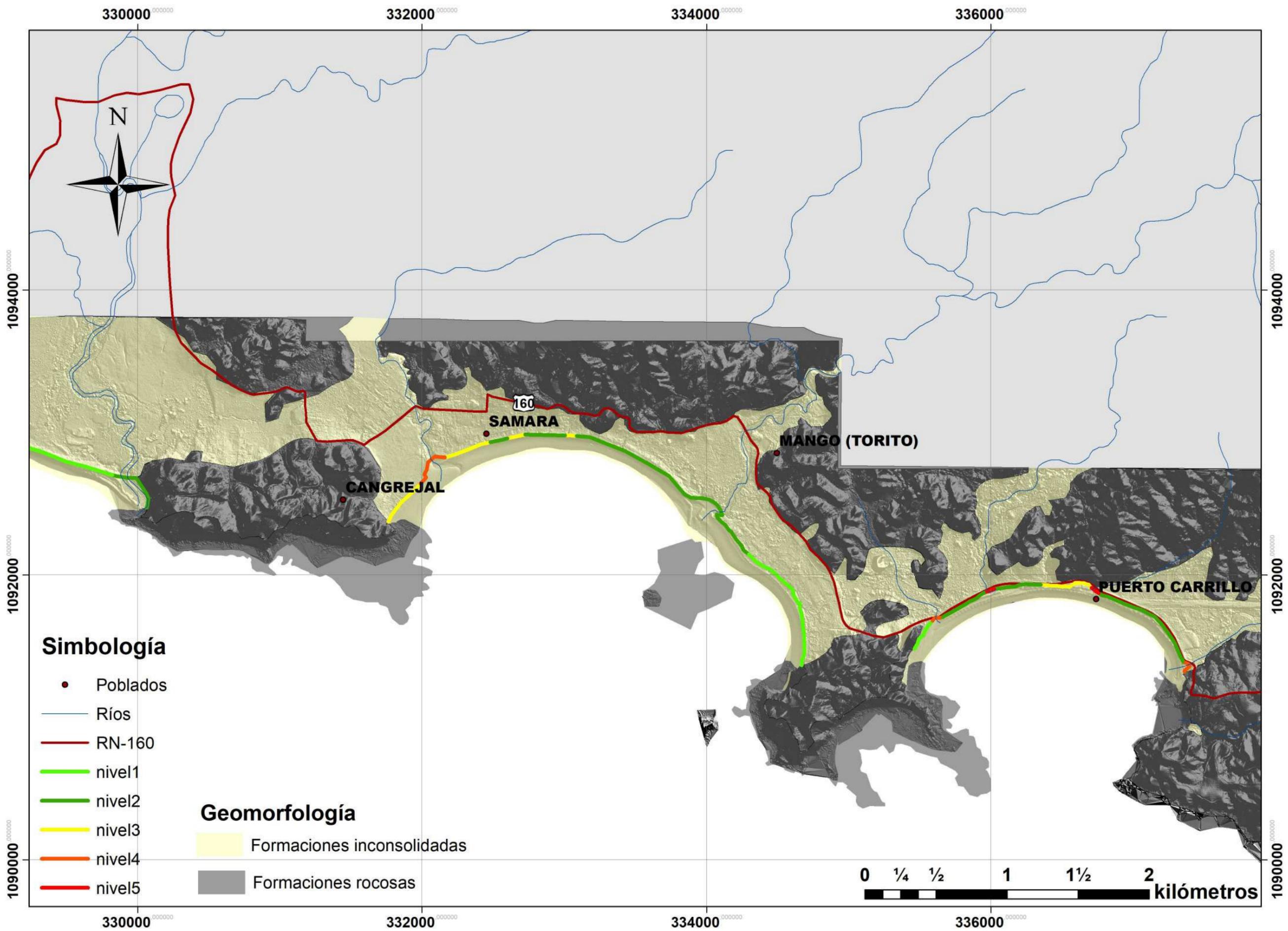
La tabla 15 resume la distribución y la longitud de línea de costa correspondiente a cada nivel del IE-SC. Ha sido elaborada con base en los mapas del IE-SC realizados.

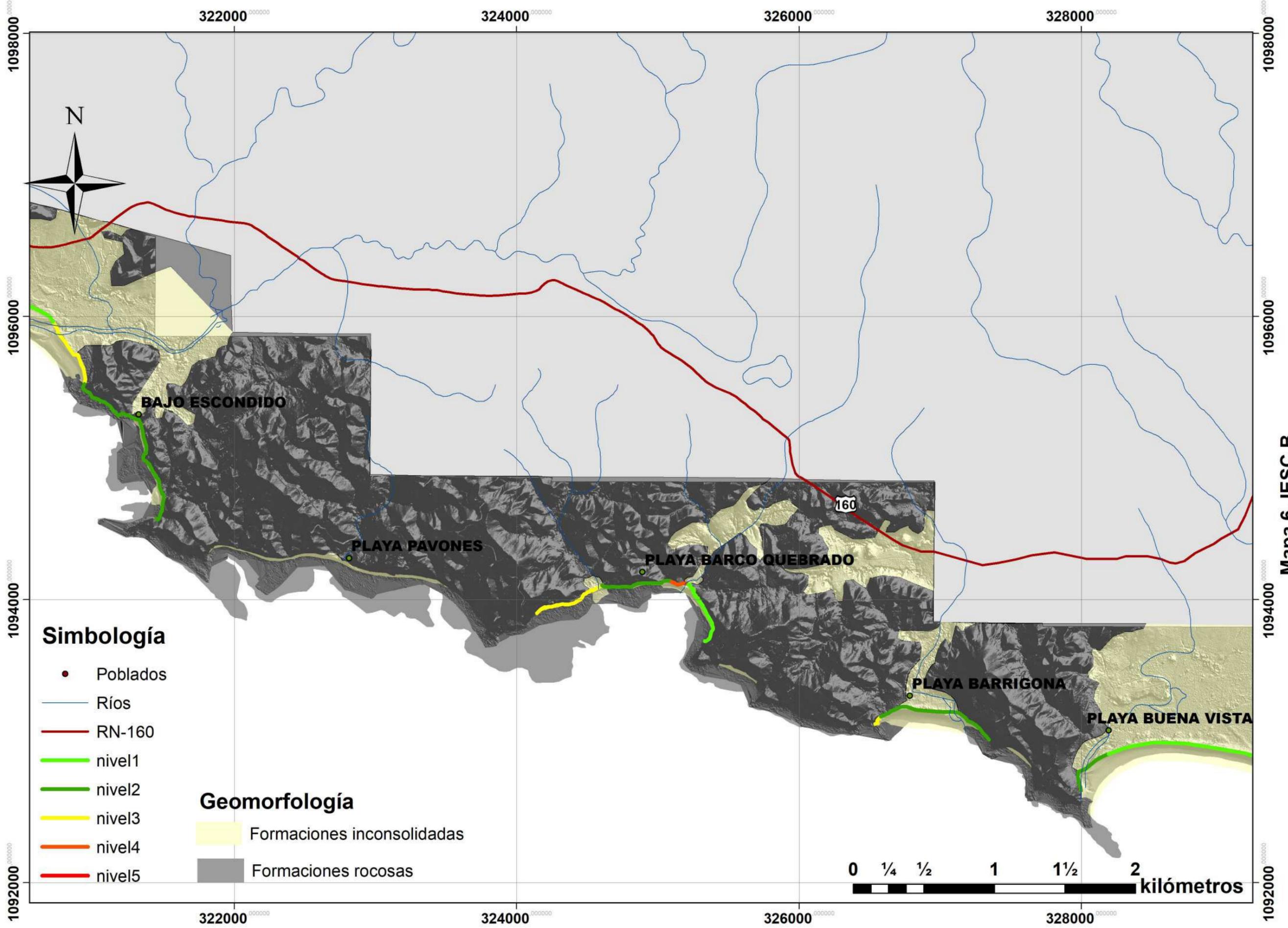
Tabla 15. Resumen de los sitios donde se presenta cada nivel del IE-SC y su longitud en la línea de costa.

Nivel	Sitio	Longitud (m)
1	Ostional	1751
	Nosara	1408
	Pelada	858
	Guiones	681
	Garza	1700
	Barco Quebrado	487
	Buena Vista	1673
	Sámara	922
	Carrillo	228
2	Ostional	1649
	Nosara	728
	Pelada	478
	Guiones	3915
	Bajo escondido	1231
	Barco Quebrado	504
	Barrigona	825
	Buena Vista	780
	Sámara	2010
Carrillo	1500	
3	Ostional	400
	Nosara	957
	Pelada	143
	Guiones	1029
	Garza	820
	Barco Quebrado	521
	Barrigona	100
	Sámara	889
	Carrillo	376
4	Ostional	218
	Guiones	101
	Garza	282
	Sámara	302
	Carrillo	148
5	Carrillo	108

5.1.1 Mapas IE-SC

Como resultado de las observaciones del apartado 5.1, se realizan los mapas correspondientes al Índice de Erosión-Sedimentación Costera (Mapas 5, 6, 7 y 8).





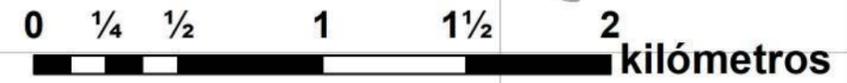
Mapa 6. IESC B

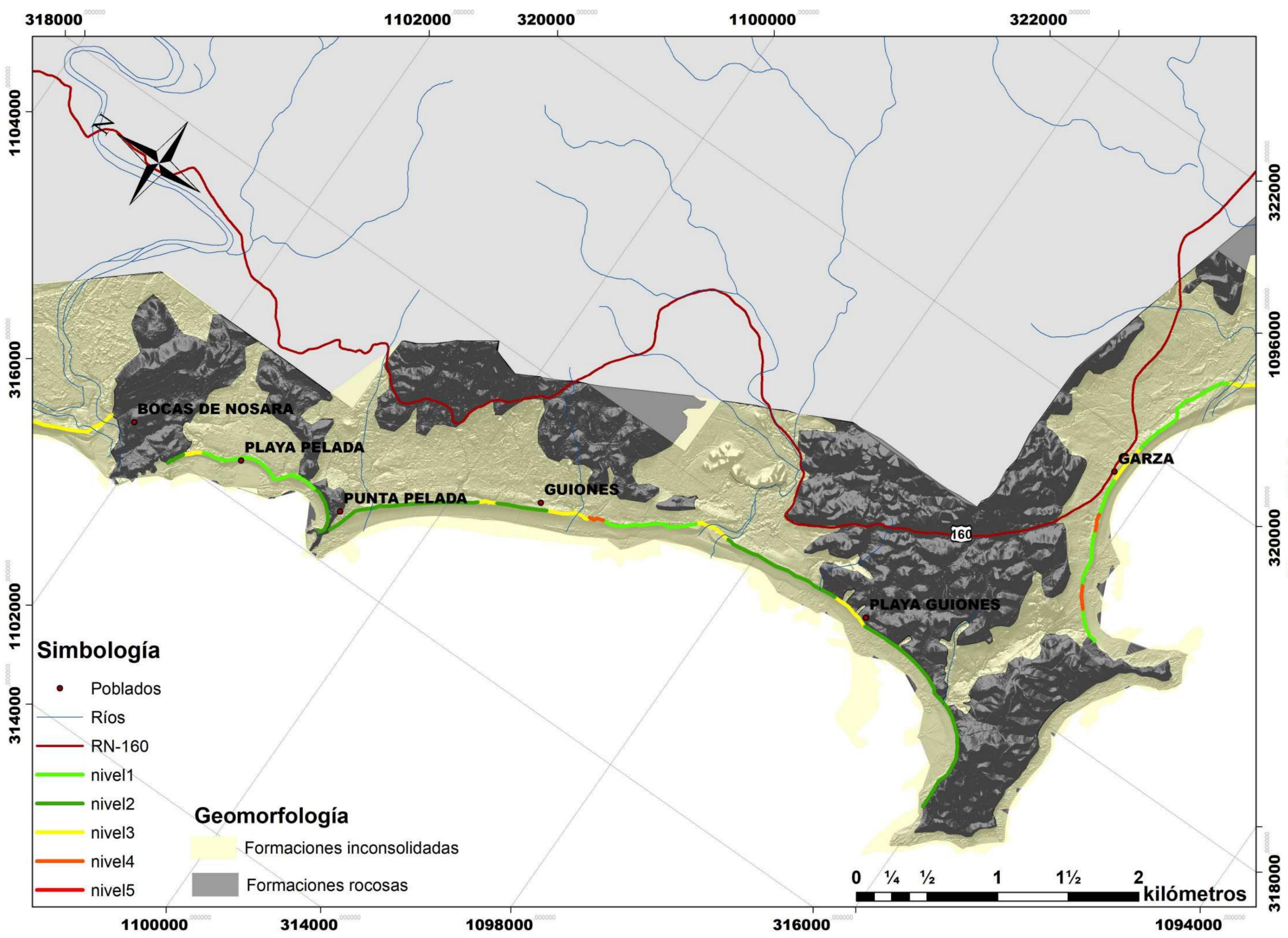
Simbología

- Poblados
- Ríos
- RN-160
- nivel1
- nivel2
- nivel3
- nivel4
- nivel5

Geomorfología

- Formaciones inconsolidadas
- Formaciones rocosas





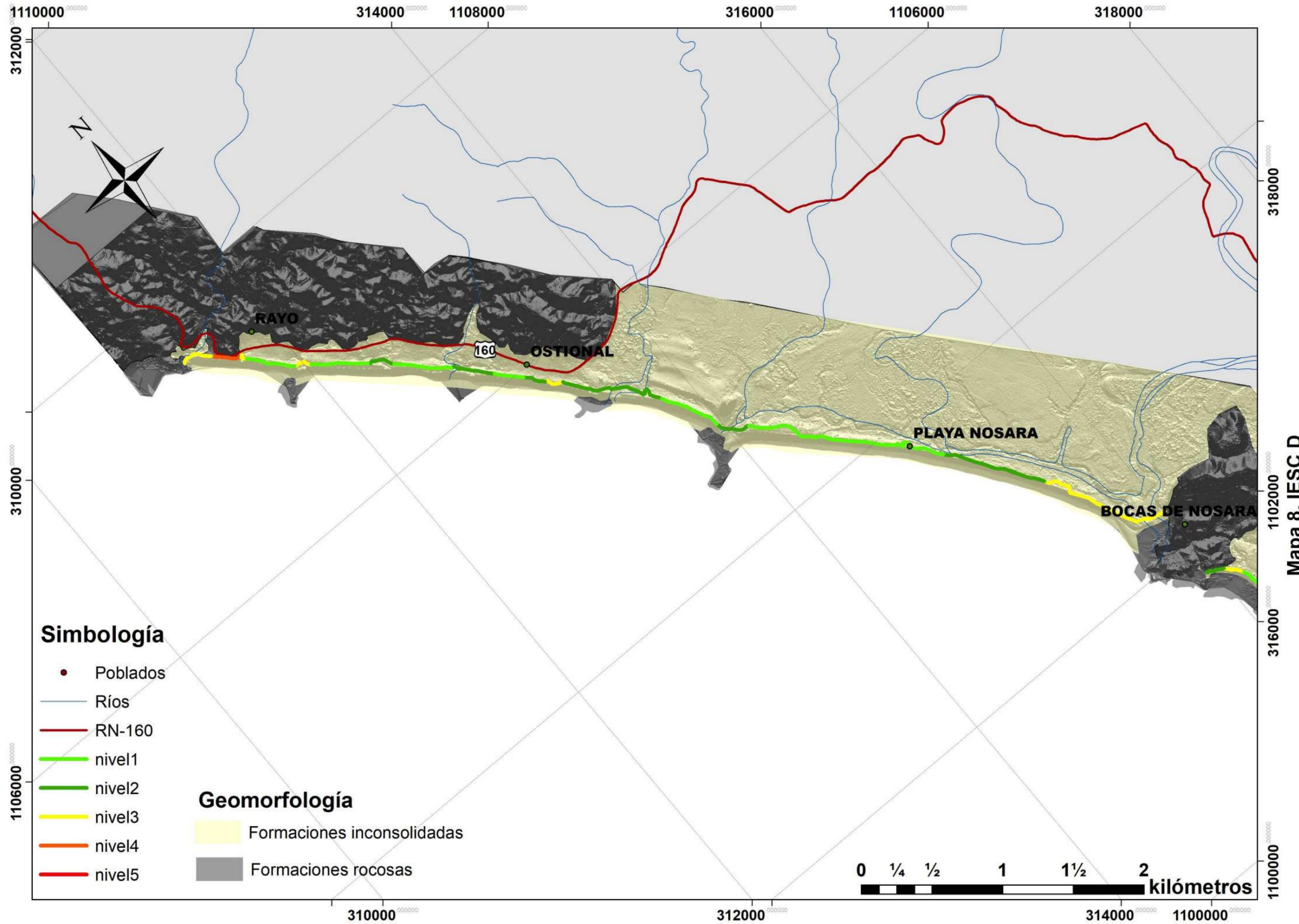
Simbología

- Poblados
- Ríos
- RN-160
- nivel1
- nivel2
- nivel3
- nivel4
- nivel5

Geomorfología

- Formaciones inconsolidadas
- Formaciones rocosas

Mapa 7. IESC C



Mapa 8. IESC D

5.1.2 Estado de los puentes de playa Carrillo

Durante la gira realizada del 25 al 27 de abril de 2018, se identificó el estado de los puentes del tramo de la RN-160 que pasa frente a la costa de playa Carrillo. Esta revisión se realizó con la ayuda del ingeniero civil Ronald Naranjo Ureña, quien es funcionario de Lanamme UCR. La revisión consiste en observaciones a grandes rasgos de características en la estructura que pueden determinar si el puente sufre un daño de consideración y si es necesaria intervención pronta (Figura 52).

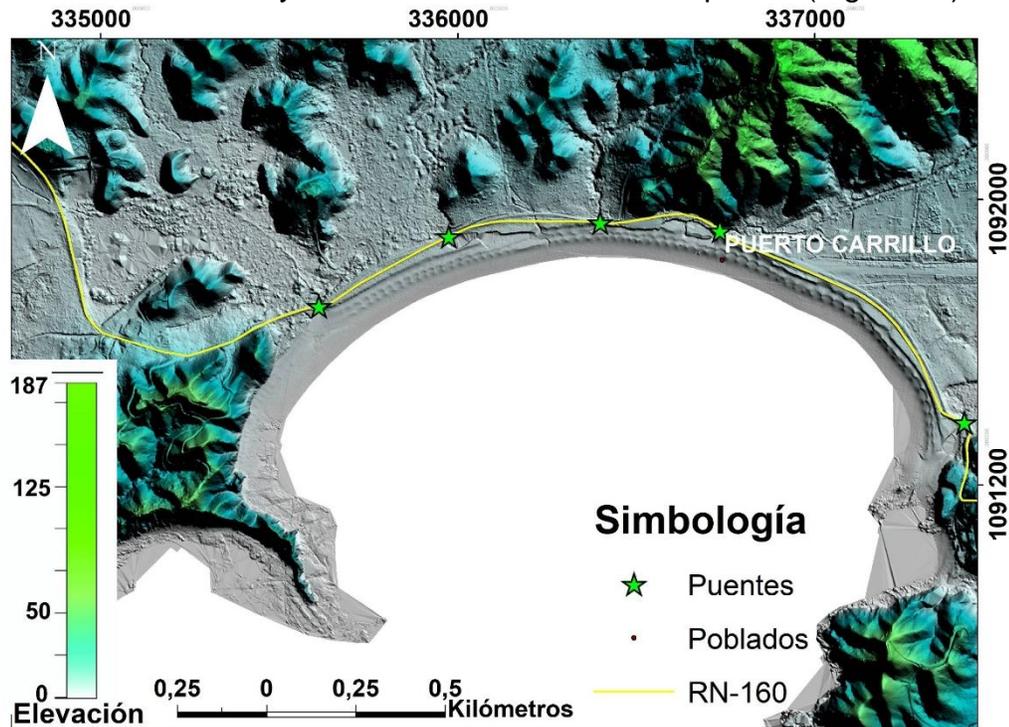


Figura 52. Mapa de ubicación de los puentes analizados en playa Carrillo.

Los puentes analizados están a una distancia menor a 10 metros de la línea de marea alta, algunas veces por delante de esta, además se encuentran en zonas de desembocadura, las cuales son muy dinámicas por su naturaleza. Los ríos que desembocan en este sector del Pacífico de Costa Rica poseen mayor cantidad de agua en la época lluviosa (mayo a noviembre) y puede que no tengan agua en la época seca (diciembre a abril); eventos de tormenta hacen que la cantidad de agua que drena en la costa sea mucho mayor, lo cual aumenta la erosión en las márgenes del río. La constante entrada del mar a las desembocaduras durante la marea alta

contribuye al daño que sufren los puentes, puesto que erosiona la parte inferior y desestabiliza las bases. A continuación, se describe el estado de cada uno:

- Puente 1 (coordenadas: 337416,65 E; 1091372,57 N):

La estructura principal corresponde con un puente tipo Bailey, este se encuentra por encima de un puente permanente antiguo. La cimentación de este se encuentra expuesta pero no ha sido socavada aún. Existe socavación en el relleno de uno de los extremos únicamente (Figura 53A). Uno de los muros no muestra signos de daño.

- Puente 2 (coordenadas: 336733,46 E; 1091911,28 N)

Este puente tiene su cimentación socavada. Los pilotes y su soporte, que es la roca base, están siendo lavados; al menos uno de ellos se encuentra totalmente expuesto (Figura 53B). Se observa un basculamiento en las losas del puente. Además, uno de los rellenos se ha erosionado en parte. El puente anterior había sido erosionado en sus bases, los remanentes se encuentran a menos de 10 m del puente actual.

- Puente 3 (coordenadas: 336398,24 E; 1091933,89 N):

Presenta problemas como: concreto segregado, el acero de la estructura se encuentra viejo, expuesto y oxidado (Figura 53C) hay una grieta de tamaño importante (Figura 53D). Este puente presenta también socavamiento en los rellenos de aproximación, donde hay pérdida de los sedimentos finos, los cuales ya se han lavado. La berma se encuentra por encima del nivel del puente.

- Puente 4 (coordenadas: 335974,24 E; 1091898,71 N)

La parte interior del puente se observa en buenas condiciones. La pieza central del puente presenta delaminación del acero y requiere un reforzamiento (Figura 53E). En el bastión del puente se presenta agrietamiento y se da también el acero expuesto. En la parte inferior del puente se ha perdido mucho acero debido a que está poco profundo en el concreto. Este puente también presenta fallas en el apoyo.

- Puente 5 (coordenadas: 335611,08 E; 1091700,24 N)

Presenta daños importantes tanto en el lado aguas arriba como en el lado aguas abajo del puente. Es evidente la entrada del mar hacia la desembocadura por debajo del puente (Figura 53F). Se encuentra socavación en los bastiones. El agua está dejando expuestos a los pilotes y está lavando por debajo del relleno. Algunos de los bastiones se encuentran agrietados. Las vigas de amarre están fallando y se encuentran caídas. Se debe proteger la socavación por debajo del bastión para evitar que afecte al relleno.



Figura 53. Daños en los puentes de playa Carrillo. Fecha de las fotos: 21/1/2018. A: Daño en el relleno de uno de los extremos del puente 1 (337416,65 E; 1091372,57 N). B: Muestra uno de los pilotes del puente 2 totalmente expuesto (336733,46 E; 1091911,28 N). C: Grieta que atraviesa de lado a lado el puente 3 (336398,24 E; 1091933,89 N). D: Acero expuesto y oxidado en la estructura del puente 3 (336398,24 E; 1091933,89 N). E: Acero de la estructura expuesto en el puente 4 (335974,24 E; 1091898,71 N). F: Bases del puente 5 erosionadas por el ingreso del agua marina y pilares para disminuir erosión (335611,08 E; 1091700,24 N).

5.2 Resultados de Susceptibilidad ante la erosión costera

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al utilizar los ensayos geotécnicos de Los Ángeles y el Análisis Granulométrico., así como los mapas de Susceptibilidad ante erosión costera de la zona de estudio (Mapas 9, 10, 11 y 12).

5.2.1 Resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio:

Se desprenden los siguientes resultados a partir de las pruebas de laboratorio realizadas a los materiales geológicos con el fin de obtener un valor para la clasificación del parámetro de geología:

Ensayo de Granulometría: Con la información obtenida a partir de las curvas granulométricas, contenido de humedad, los límites líquido y plástico y el índice de plasticidad respectivos a cada muestra (Anexo 1) se realiza la clasificación utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras que se explica más adelante en esta misma sección (González de Vallejo *et al.*, 2004) (Tabla 16).

Tabla 16. Clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (González de Vallejo *et al.*, 2004).

Divisiones mayores		Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos. Más del 50% retenido en el tamiz No 200 (0,075 mm)	Grava >50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz No 4 (4,75 mm)	Grava limpia, menos del 5% pasa el tamiz No 200	GW Grava bien graduada grava fina a gruesa
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz No 200	GP Grava pobremente graduada
			GM Grava limosa
		GC Grava arcillosa	
	Arena ≥50% de fracción gruesa que pasa el tamiz No 4	Arena limpia	SW Arena bien graduada, arena fina a gruesa
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz No 200	SP Arena pobremente graduada
			SM Arena limosa
			SC Arena arcillosa
Suelos de grano fino. Más del 50% pasa el tamiz No 200	Limos y arcillas Límite líquido <50	Inorgánico	ML Limo
		Orgánico	CL Arcilla
	Limos y arcillas Límite líquido ≥50	Inorgánico	OL Limo orgánico, arcilla orgánica
			MH Limo de alta plasticidad, limo elástico
		Orgánico	CH Arcilla de alta plasticidad
			OH Arcilla orgánica, limo orgánico
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba

La base del SUCS es que los suelos finos se clasifican según su plasticidad y los suelos gruesos de acuerdo con su granulometría (Das, 2001):

- Los suelos de grano grueso que están compuestos de grava y arena pasan menos de 50% la malla No. 200 (0,075 mm). Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G para grava (*gravel*) y S para arena (*sand*).
- Los suelos de grano fino pasan con 50% o más la malla No. 200. Los símbolos de grupo usan el prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcillas inorgánicas (*clay*) y O para limos o arcillas orgánicas (*organic*). El símbolo Pt se usa para turbas y otros suelos orgánicos.
- Se usan, además, las letras W (*well*) para bien graduado, P (*poor*) para mal graduado, L (*low*) para baja plasticidad ($WL < 50\%$) y H (*high*) para alta plasticidad ($WL \geq 50\%$).

La tabla 17 muestra la clasificación según el SUCS para las muestras de este proyecto:

Tabla 17. Muestras del ensayo de granulometría clasificadas según el SUCS.

Número de muestra	Simbología SUCS	Nombre
M-896-18	SP	Arena mal gradada
M-897-18	SP	Arena mal gradada
M-898-18	ML	Limo
M-899-18	SP	Arena mal gradada
M-900-18	SM	Arena limosa
M-901-18	MH	Limo elástico
M-902-18	SP	Arena mal gradada
M-903-18	ML	Limo
M-904-18	SP	Arena mal gradada
M-905-18	MH	Limo elástico
M-906-18	SP	Arena mal gradada
M-907-18	SP	Arena mal gradada
M-908-18	SM	Arena limosa
M-909-18	SP	Arena mal gradada

Las muestras correspondientes al área de estudio son limos o arcillas. Según la matriz de clasificación (Apartado 4.2.4), la clasificación del parámetro de geología indica que en el grado de susceptibilidad ante erosión número 4 se categorizan las muestras con predominancia de tamaño de grano mayor a 0,074, por lo que las muestras que resultaron ser limos y otras más finas se ubican dentro de esta categoría; las muestras con tamaño de grano mayor a 0,074, es decir las que se clasifican como arenas y otras más gruesas se pueden incluir dentro de la categoría 5 según la matriz de clasificación.

Ensayo con Máquina de los Ángeles:

Posterior a las pruebas de laboratorio realizadas se procede a calcular el Coeficiente de Los Ángeles de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente Los Ángeles} = \frac{A-B}{A} * 100$$

Donde A es la masa inicial de la muestra en gramos y B es la masa final de la muestra (la fracción retenida en el tamiz) en gramos.

Como ejemplo se calcula a continuación el Coeficiente de Los Ángeles para la muestra con el código TE-R-25/4/18-01 la cual corresponde con la formación Complejo de Nicoya:

A: 5000 g

B: 4346,7 g

$$\text{Coeficiente Los Ángeles} = \frac{5000-4346,7}{5000} * 100$$

$$\text{Coeficiente Los Ángeles} = 13,07$$

Siguiendo el mismo procedimiento se obtuvieron los siguientes pesos finales y coeficientes de Los Ángeles para cada una de las muestras representativas de las formaciones (Tabla 18).

Tabla 18. Pesos finales y coeficientes de Los Ángeles para las muestras de roca.

Formación Geológica muestreada	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Coeficiente de Los Ángeles
Complejo de Nicoya	5000	4346,7	13,07
Formación Curú	5000	4223,1	15,54
Formación Piedras Blancas	5000	3614,4	27,71
Formación Punta Pelada	5000	3471,3	30,57
Formación Arío	5000	3247,8	35,04
Formación Puerto Carrillo	5000	3152,9	36,94
Formación Santa Teresa	5000	2576,2	48,48

A cada una de las formaciones presentes en el mapa geológico (Figura 14) se les asigna un grado de susceptibilidad basado en la matriz de clasificación del (Apartado 4.2.4) ya sea 1, 2 o 3; según sea el valor obtenido de Coeficiente de Los Ángeles. La relación entre el Coeficiente de Los Ángeles y el grado de susceptibilidad ante erosión es proporcional, debido a esto las rocas con Coeficientes de Los Ángeles más altos poseen grados de susceptibilidad más altos y viceversa, esto se debe a que dicho coeficiente es un indicador de la resistencia mecánica de un material en función del porcentaje de la muestra que se pierde durante el ensayo, lo cual puede correlacionarse con la resistencia ante erosión ya que esta es un desgaste mecánico que sufre la roca (Tabla 19).

En el presente estudio se definen tres comportamientos: a) rocas con coeficiente menor a 20, las cuales son relativamente las más resistentes y se les asigna un grado de susceptibilidad 1; b) rocas con coeficiente entre 20 y 40 las cuales poseen resistencia intermedia y se les asigna un grado de susceptibilidad 2; c) rocas con coeficiente mayor a 40, las cuales son relativamente las menos resistentes y se les asigna un grado de susceptibilidad 3.

Tabla 19. Relación Coeficiente Los Ángeles-Grado de susceptibilidad ante erosión costera para las formaciones del área de estudio.

Formación Geológica	Coeficiente Los Ángeles	Grado de susceptibilidad ante erosión costera
Complejo de Nicoya	13,07	1
Formación Curú	15,54	1
Formación Piedras Blancas	27,71	2
Formación Punta Pelada	30,57	2
Formación Arío	35,04	2
Formación Puerto Carrillo	36,94	2
Formación Santa Teresa	48,48	3

Se asignan los valores del grado de susceptibilidad ante erosión a los polígonos de cada formación geológica, mediante la modificación de su respectiva tabla de atributos en el SIG, se obtiene el mapa del parámetro de geología (Figura 54), donde se puede apreciar el grado de resistencia ante la erosión relativo a cada unidad geológica del área de estudio.

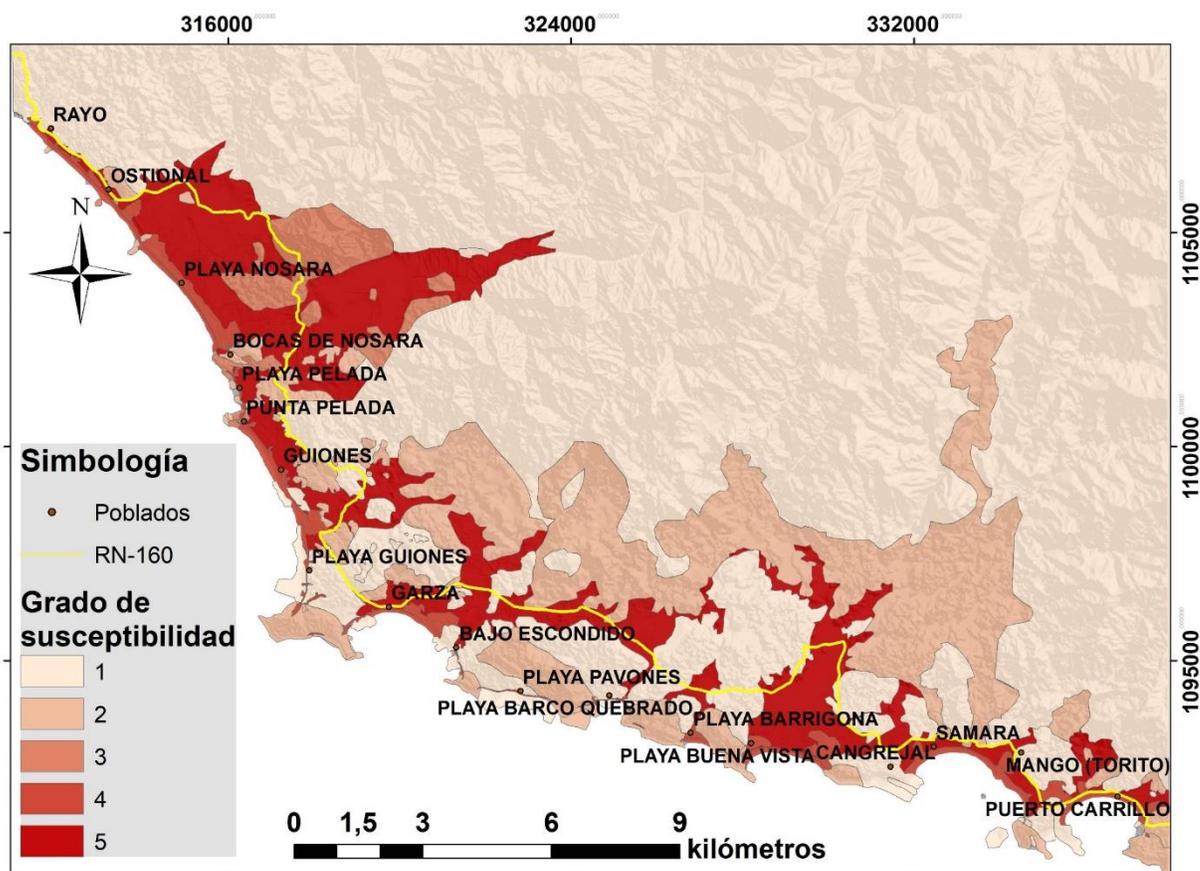


Figura 54. Mapa del grado de susceptibilidad según el parámetro de geología.

5.2.2 Comparación de métodos de ponderación

Se realizaron pruebas con diferentes métodos de ponderación, algunos de los cuales han sido usados por autores anteriores (Apartado 4.2.1) y se comprobó que la modificación de los pesos utilizados para realizar los mapas de susceptibilidad ante erosión costera no implica variaciones importantes en los resultados. Para este trabajo se probaron cuatro métodos de ponderación, posteriormente se eligió el de tres niveles (Tabla 10). Debido a que los métodos mostraron ser muy similares en el resultado, las variaciones entre los resultados obtenidos mediante un método u otro son muy leves y no son significativos para la interpretación de los mapas. El método de tres niveles representa de manera adecuada aspectos que eran esperados, por ejemplo, muestra como sitios más cercanos a la línea de costa muestran susceptibilidades mayores que sitios lejanos, de manera similar sucede con los sitios que se encuentran a una mayor elevación, estos presentan susceptibilidades más bajas que los sitios con altitudes menores.

Se comprueba entonces que la fórmula de ponderación y los pesos para cada variable pueden diferir sin alterar el resultado, por lo que la importancia para la obtención de resultados de calidad recae en la matriz de clasificación de susceptibilidad, los valores que se asignen para cada parámetro y en los datos de entrada que se utilicen.

A continuación, se describen las fórmulas de ponderación y los pesos de cada uno de los parámetros:

- A. Método escalonado: Donde los 9 parámetros poseen un peso del 1 al 9 sin repetir, por lo que los parámetros de mayor importancia poseen pesos mayores y viceversa. Se utiliza una fórmula como la siguiente:

$$\mathbf{CT*1 + RM*2 + TE*3 + GM*4 + AO*5 + AA*6 + ET*7 + DC*8 + GL*9}$$

- B. Tres niveles: Se ubica cada uno de los parámetros en 3 niveles de importancia relativa, donde parámetros como distancia a la línea de costa y geología poseen mayor importancia, otros poseen importancia media y otro

grupo de parámetros como el de acciones antropogénicas y rango de mareas se ubican en el nivel de menor importancia. Corresponde con el método que finalmente se aplicó para este proyecto. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\mathbf{CT*0,5 + RM*0,5 + TE*1 + GM*1 + AO*1 + AA*1 + ET*2 + DC*2 + GL*2}$$

C. Ponderación equitativa: Todos los parámetros tienen valor de 1, sin darle importancia a ningún parámetro en especial, por lo que únicamente se realiza la sumatoria de ellos. La fórmula usada es la siguiente:

$$\mathbf{CT + RM + TE + GM + AO + AA + ET + DC + GL}$$

D. Raíz del promedio: Uno de los promedios geométricos utilizados por Gornitz *et al.* (1991). Se introduce la siguiente fórmula en la calculadora ráster:

$$\mathbf{Raíz ((CT + RM + TE + GM + AO + AA + ET + DC + GL) / 9)}$$

Las diferencias en la tonalidad de los mapas se deben al resultado de la fórmula matemática que se utiliza para calcular el valor de susceptibilidad ante erosión de cada punto en el terreno. Dado que los 9 parámetros son los mismos en cada caso, al ser procesados con fórmulas diferentes (utilizando multiplicadores mayores o menores, siendo promediados o extrayendo su raíz), dichas fórmulas van a ocasionar que el valor del grado de susceptibilidad varíe, aunque no de manera significativa, a pesar de las diferencias en el método de ponderación los cambios en el mapa final son mínimos (Figura 55). Para los mapas que se presentan en este documento, se decide utilizar el método de tres niveles ya que se considera que hay parámetros como el de geología, distancia a la línea de costa y elevación topográfica, que resultan determinantes en la susceptibilidad ante erosión costera y el método mencionado anteriormente hace una buena representación de dichos parámetros.

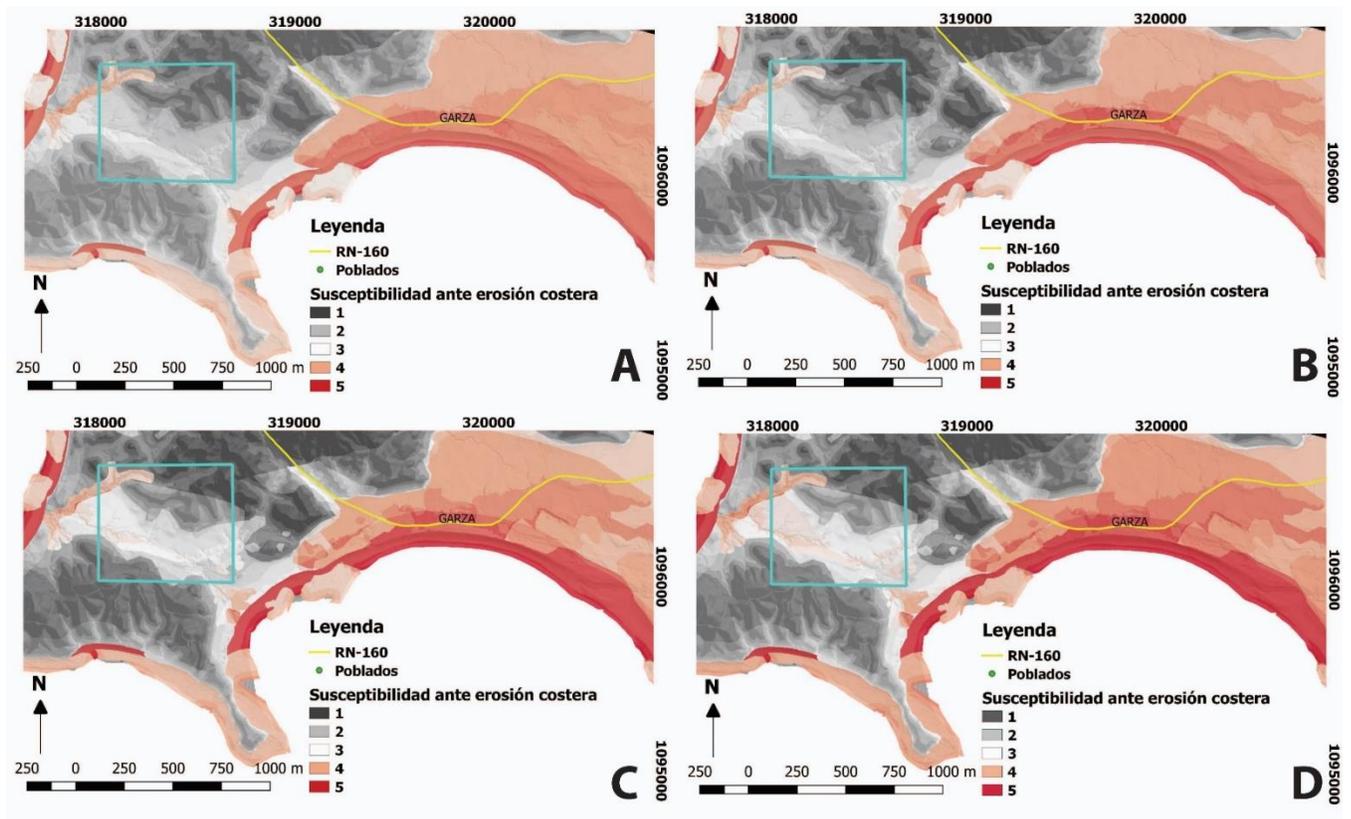
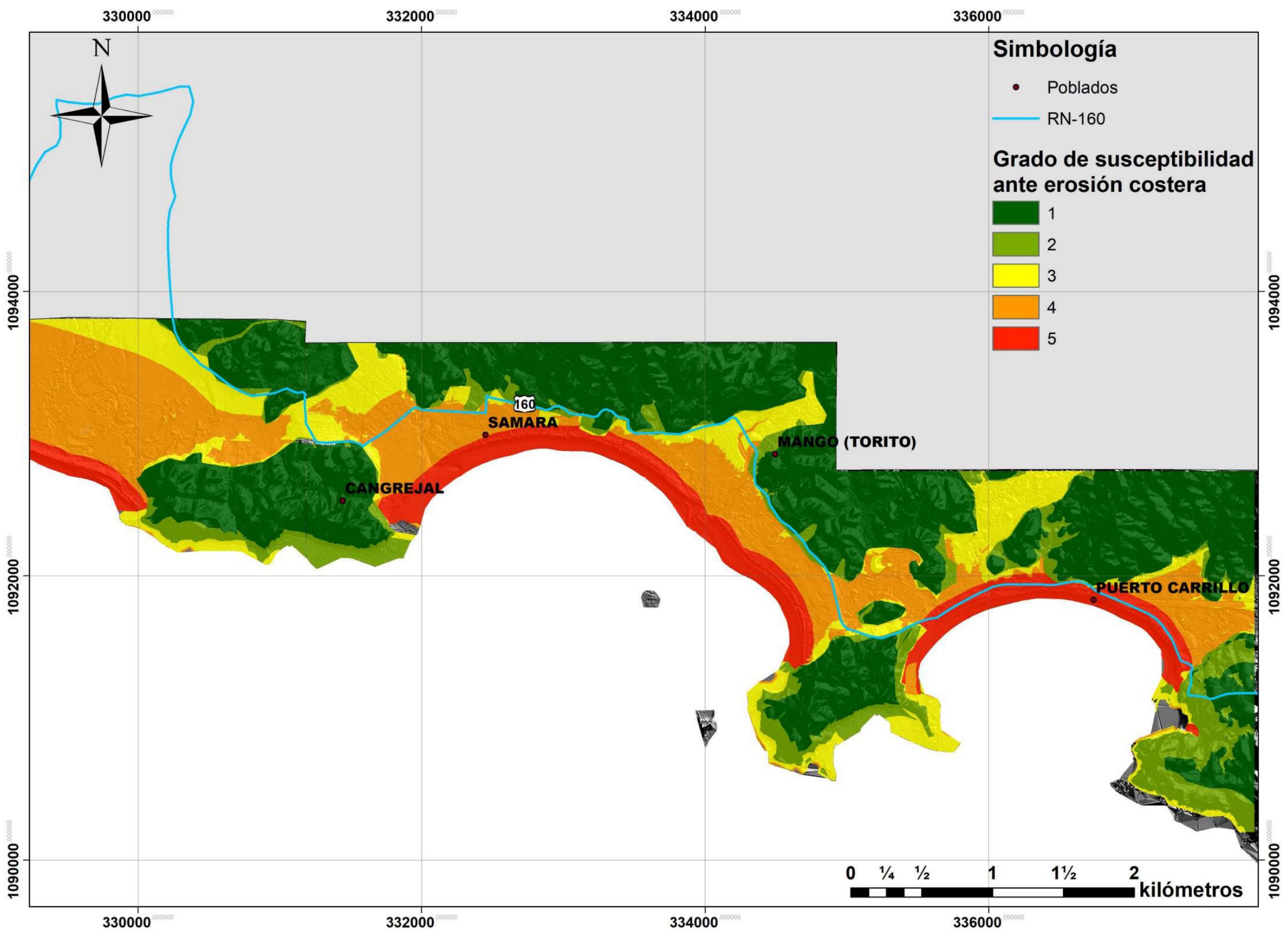


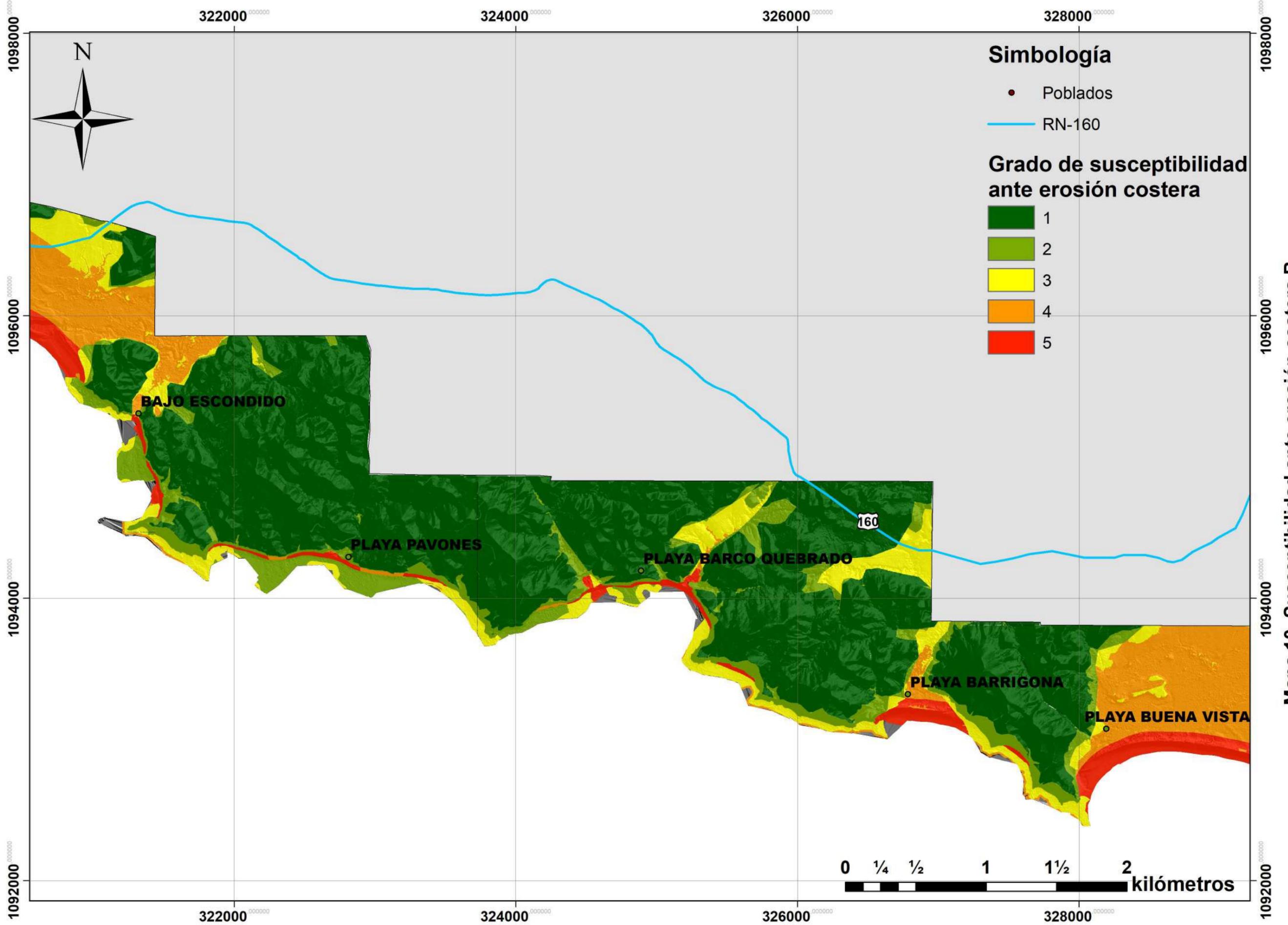
Figura 55. Comparación de diferentes métodos de ponderación. A: Escalonado, B: Tres niveles, C: Equitativo, D: Raíz del promedio. El cuadrado celeste muestra un área de comparación que muestra las pequeñas diferencias de tonalidad entre los métodos.

5.2.3 Mapas de susceptibilidad ante erosión costera

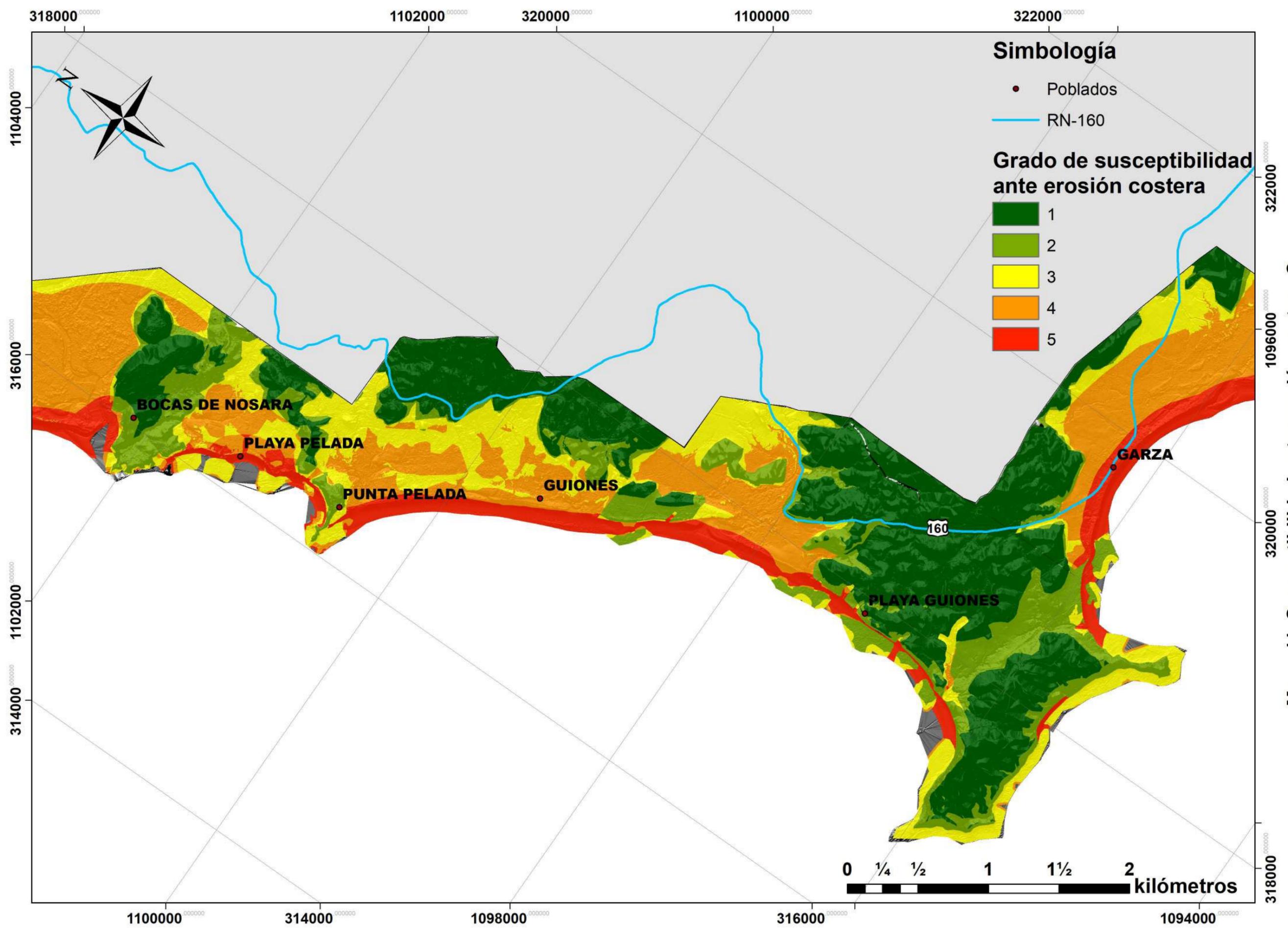
Como resultado del análisis de susceptibilidad ante erosión costera se obtienen los mapas 9, 10, 11 y 12



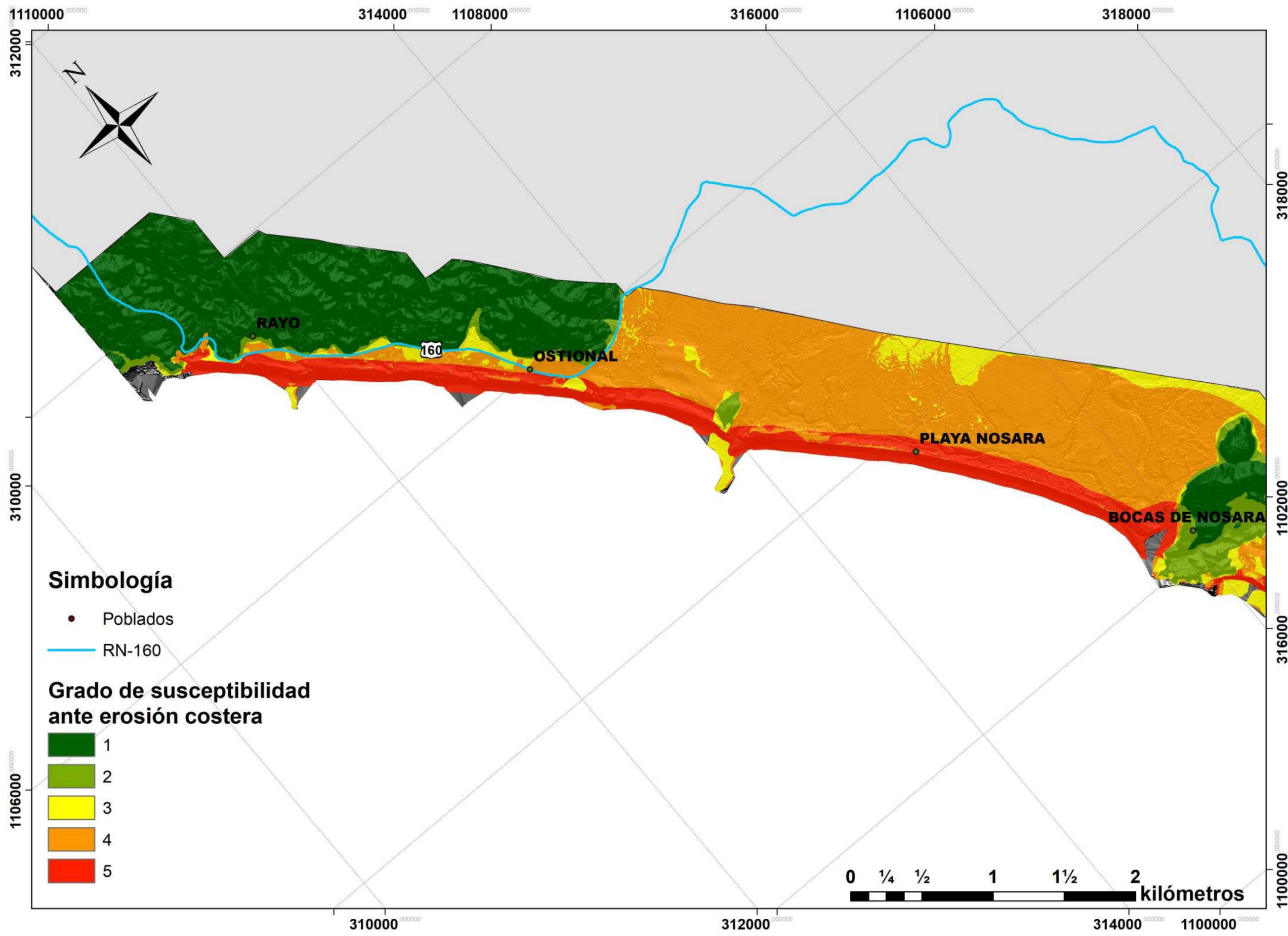
Mapa 9. Susceptibilidad ante erosión costera A



Mapa 10. Susceptibilidad ante erosión costera B



Mapa 11. Susceptibilidad ante erosión costera C



Mapa 12. Susceptibilidad ante erosión costera D

5.2.4 Conteo estadístico de segmentos de carretera

Se realizó un conteo estadístico de la longitud de los segmentos de la RN-160 y del grado de susceptibilidad ante erosión costera que posee cada segmento, esto basado en los mapas 9, 10, 11 y 12.

De la totalidad de carretera que pasa por dentro del área de estudio, fue posible analizar cinco secciones de la RN-160, estas son las que ingresan al área donde hay disponibilidad de datos LiDAR, que también corresponde con el área donde se generaron los mapas de susceptibilidad ante erosión costera.

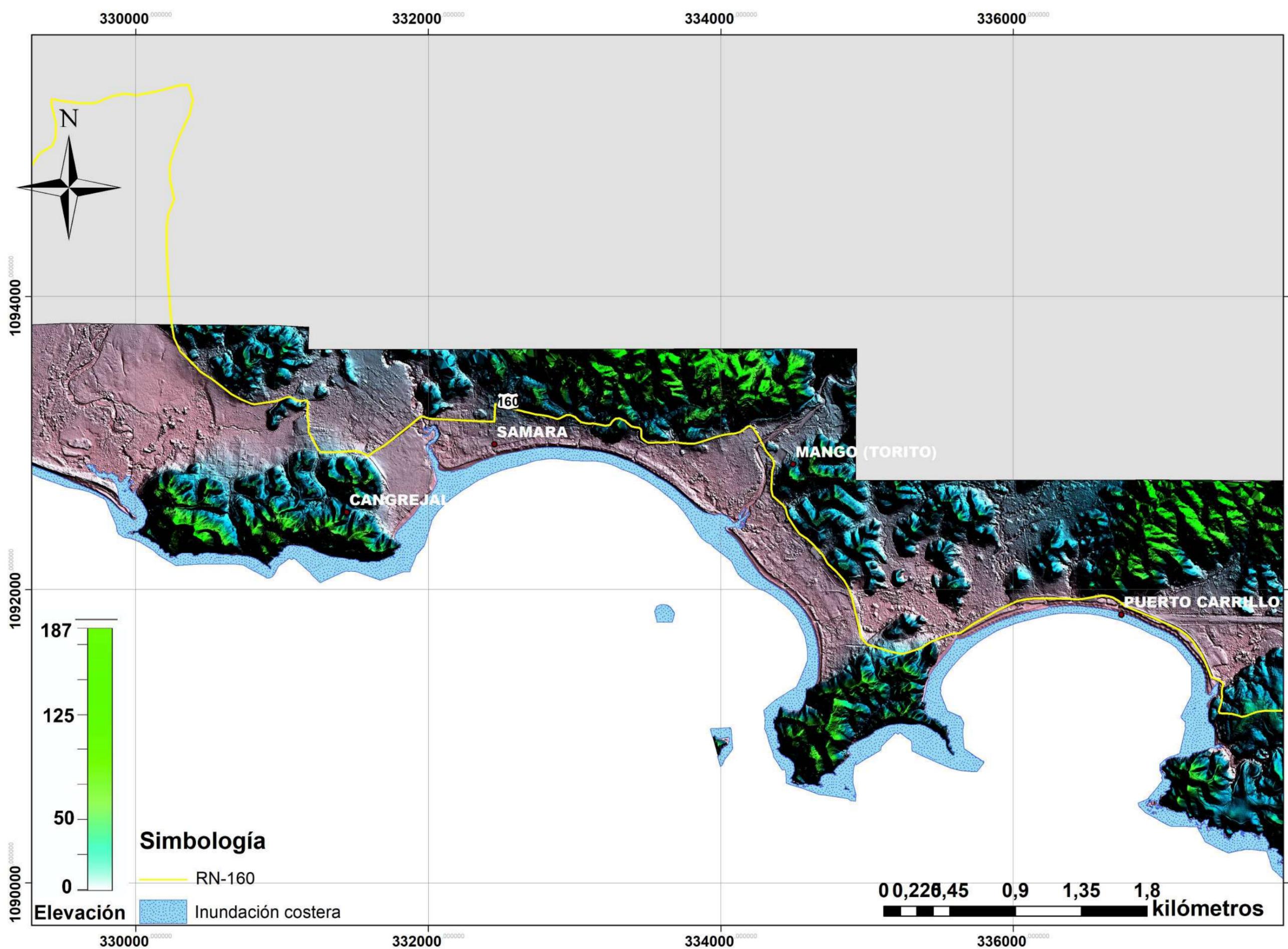
A partir del análisis se determinó la longitud en metros de cada segmento encontrado y se indica el grado de susceptibilidad ante erosión costera por el que pasa cada segmento individual de la carretera. Los datos se subdividen en 5 secciones como se indicó en el párrafo anterior, las secciones se subdividen en los frentes de costa que posee cada sección de la RN-160, se muestran además los porcentajes de la carretera según el grado de susceptibilidad ante erosión costera (Tabla 20).

Tabla 20. Conteo de segmentos de la carretera sobre los mapas de susceptibilidad ante erosión costera.

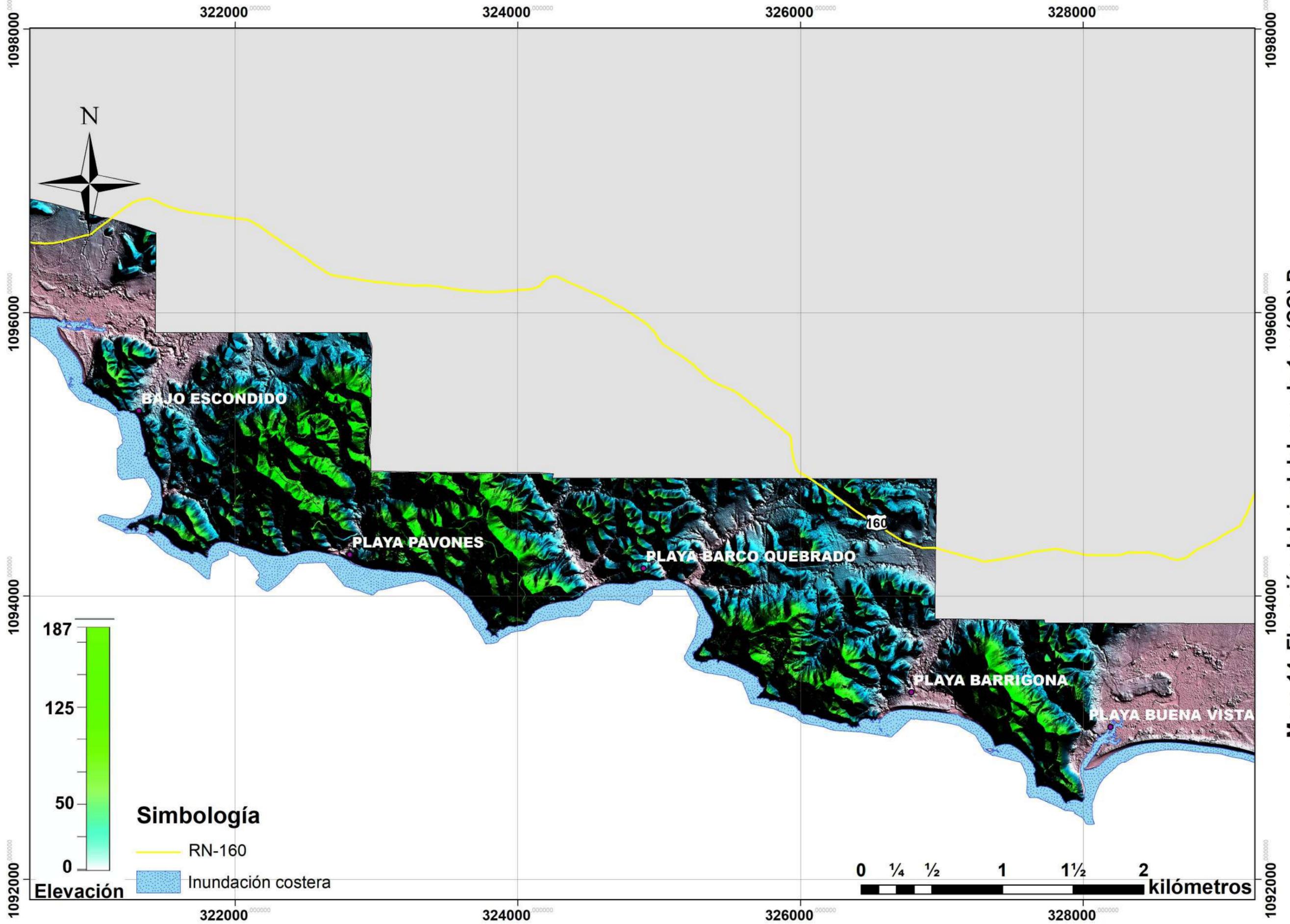
Sección	Frete de costa	1	2	3	4	5	Longitud Total	
1	Carrillo		476	196,5	17,8	930,8	3231	
			172,8	35,5	163,8	45,7		
				69,5	67,6	1055		
	Totales	0	648,8	301,5	249,2	2031,5		
	Porcentajes Carrillo	0	20,0804704%	9,331476323%	7,71278242%	62,8752708%	100%	
	Sámara		245,17	155,8	288,44	93,84	4827,42	
			347,67	89,4	236,34	263,95		
			96,83	10,4	135			
			769,53	262,37	303,97			
			57,1	84,755	375,19			
			361,14	591,9				
				58,625				
	Totales	0	1877,44	1253,25	1338,94	357,79		
	Porcentajes Sámara	0	38,8911675%	25,96107237%	27,7361406%	7,41161946%	100%	
Buena Vista		319,75	62,409	166,15	296,32	1546,44		
		130,54	129,37		111,59			
		93,891			236,42			
	Totales	544,181	191,779	166,15	644,33		0	
Porcentajes Buena Vista	35,18927343%	12,4013217%	10,74403145%	41,6653734%	0	100%		
2	Barco Quebrado	608,95	181,74	34,753	209,18		1034,623	
	Totales	608,95	181,74	34,753	209,18	0		
	Porcentajes Barco Quebrado	58,85718759%	17,5658187%	3,359001298%	20,2179924%	0%	100	
3	Garza			269,11	813,98	986,72	2330,55	
					260,74			
	Totales	0	0	269,11	1074,72	986,72		
	Porcentajes Garza	0%	0%	11,54705971%	46,1144365%	42,3385038%	100%	
	Guiónes sur		799,96	432,66	77,265	95,987	2571,708	
					578,52	66,923		
				92,773	427,62			
Totales	799,96	432,66	748,558	590,53	0			
Porcentajes Guiónes Sur	31,10617535%	16,8238385%	29,10742588%	22,9625603%	0%	100%		
4	Guiónes Norte		640,88	64,775			1726,711	
			71,686	114,97				
			834,4					
	Totales	1546,966	179,745	0	0	0		
Porcentajes Guiónes Norte	89,59032519%	10,4096748%	0%	0%	0%	100%		
5	Ostional		965,11	142,41	57,493	610,61	183,53	4680,267
				184,68	111,97	617,35	39,584	
				132,14		242,52	77,601	
				205,65		580,3		
						269,35		
						218,62		
						41,349		
	Totales	965,11	664,88	169,463	2580,099	300,715		
Porcentajes Ostional	20,6208321%	14,2060271%	3,620797702%	55,1271754%	6,42516762%	100%		
Longitud total analizada							21948,719	
		1	2	3	4	5		
Longitud total por grado		4465,167	4177,044	2942,784	6686,999	3676,725		
Porcentaje total por grado		20,34363372%	19,0309239%	13,40754328%	30,4664659%	16,7514332%	100%	

5.3 Resultados de los escenarios ante elevación del nivel del mar

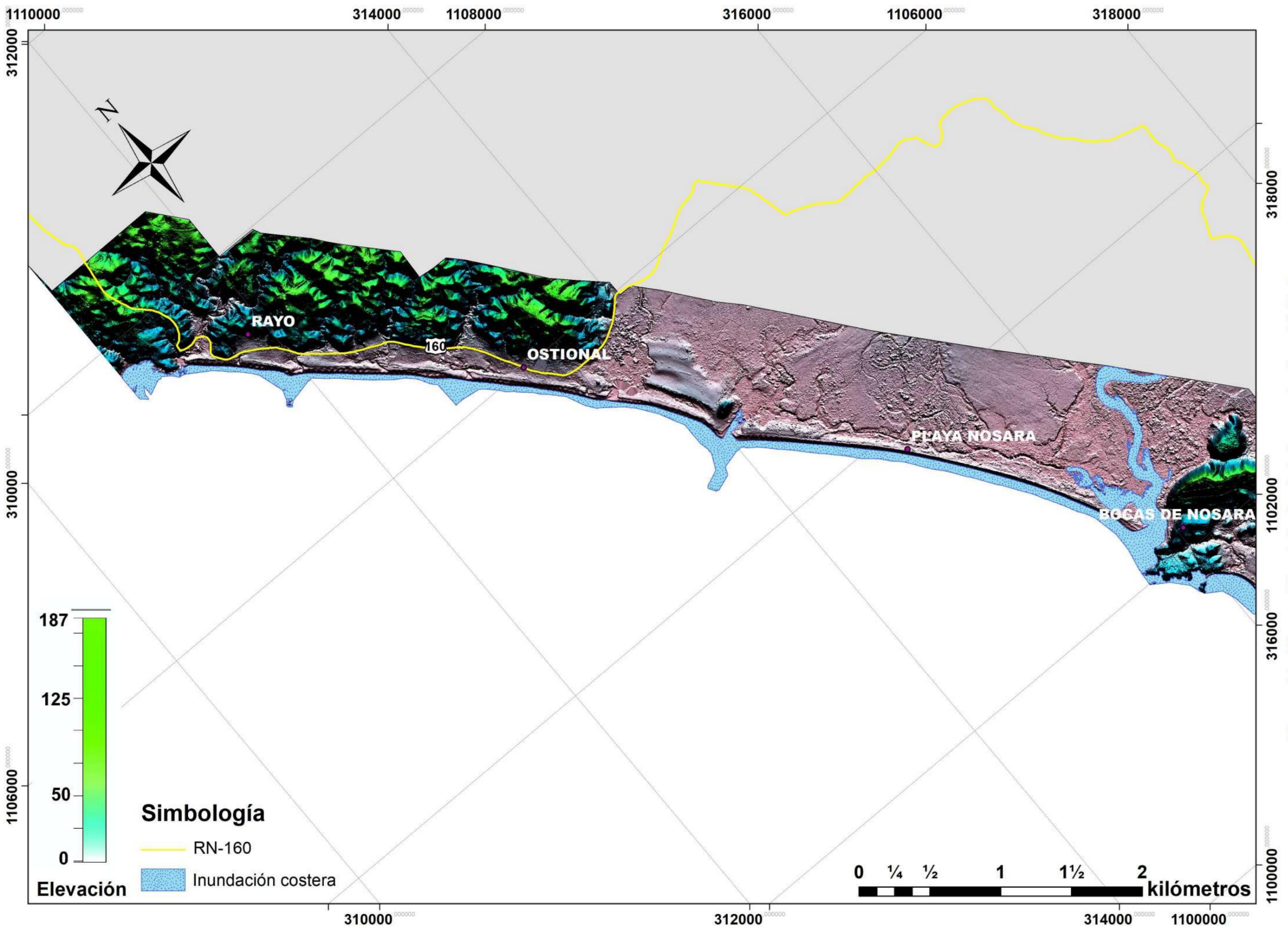
Se realizaron cuatro simulaciones que indican el área de inundación correspondiente a cada uno de los escenarios ante elevación del nivel del mar especificados en el apartado 4.3.3. Se obtienen los mapas con escenarios ante elevación del nivel del mar (Mapas 13 al 28).



Mapa 13. Elevación del nivel del mar de 1 m (CG) A



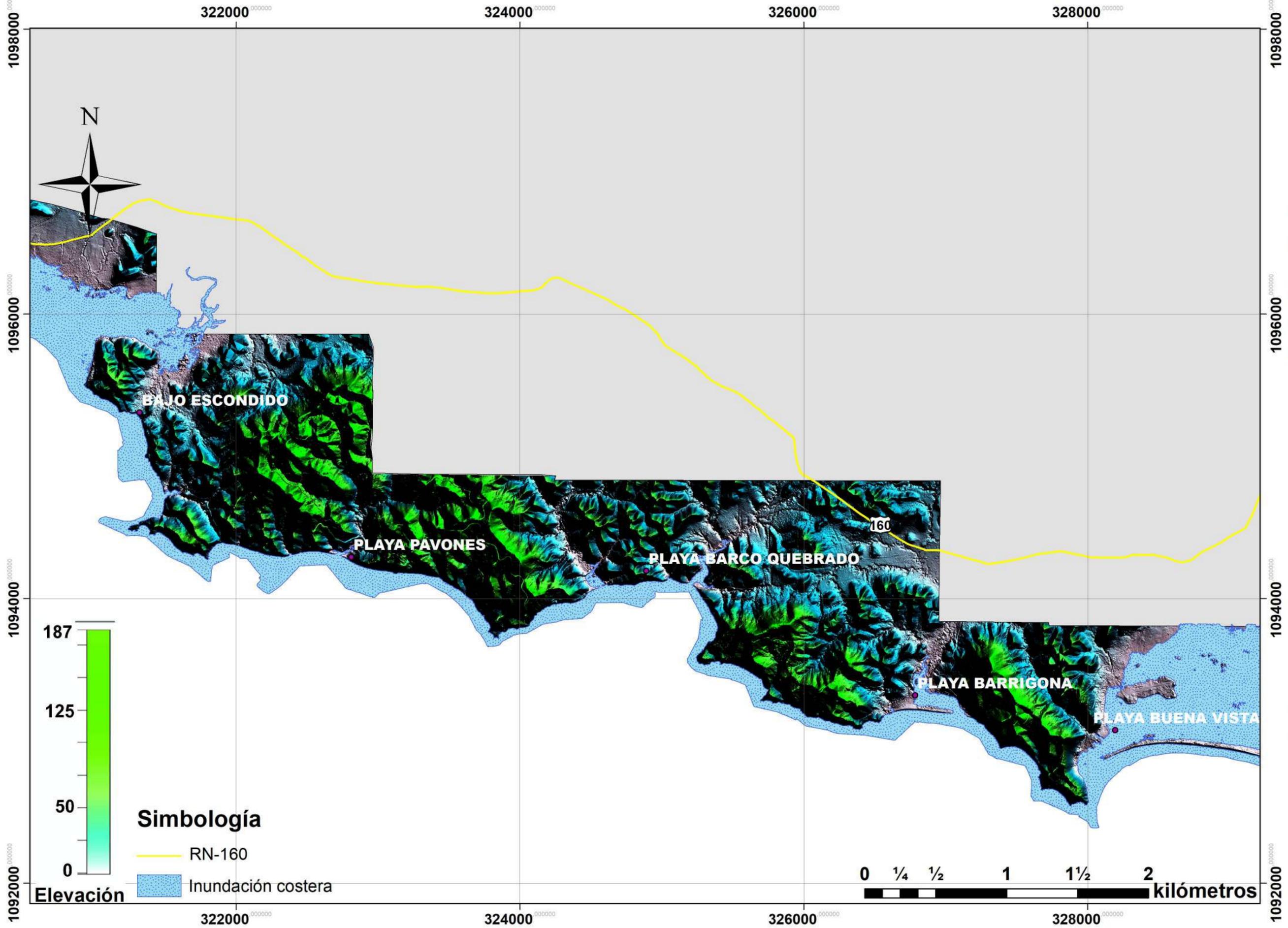
Mapa 14. Elevación del nivel del mar de 1 m (CG) B



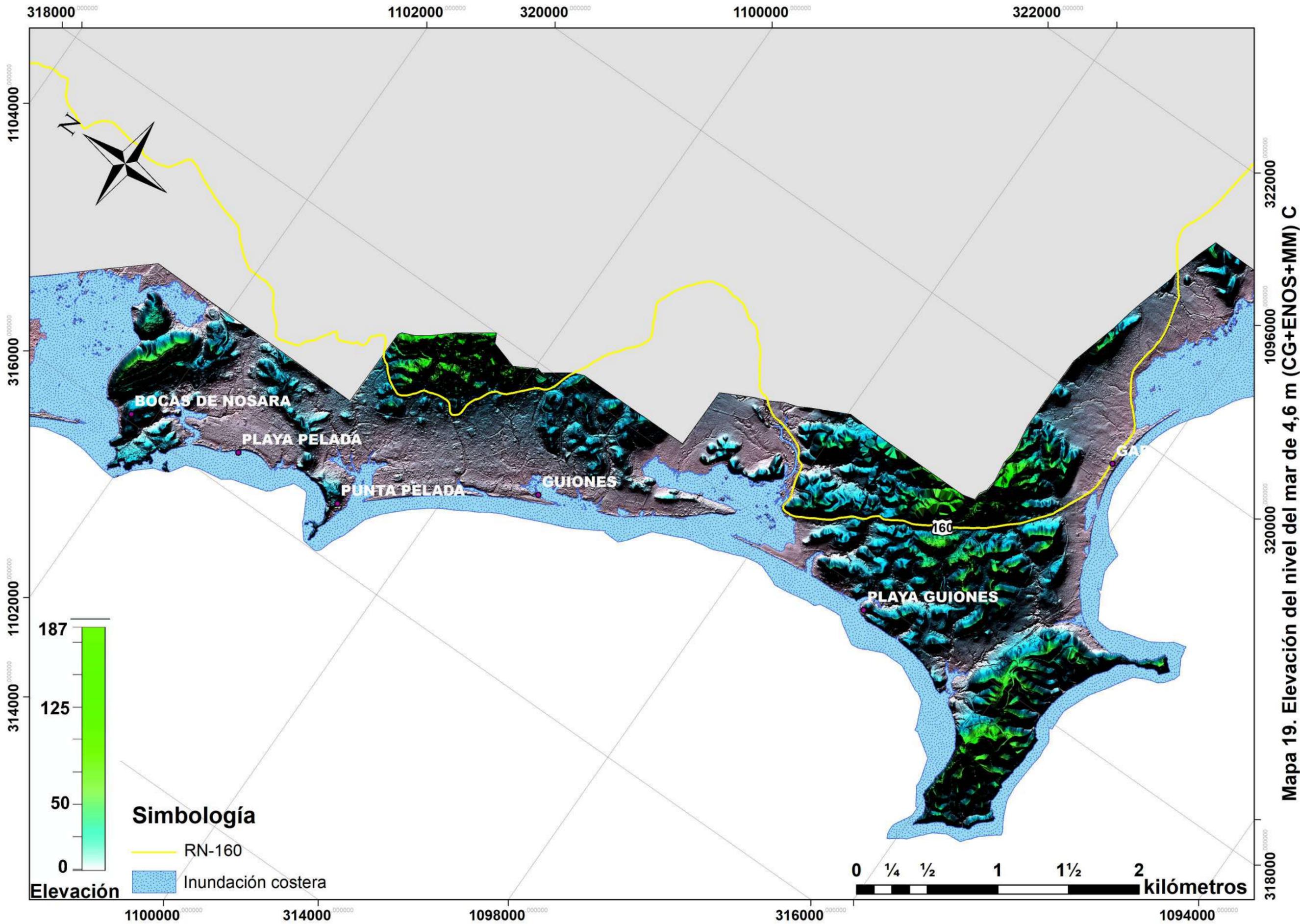
Mapa 16. Elevación del nivel del mar de 1 m (CG) D



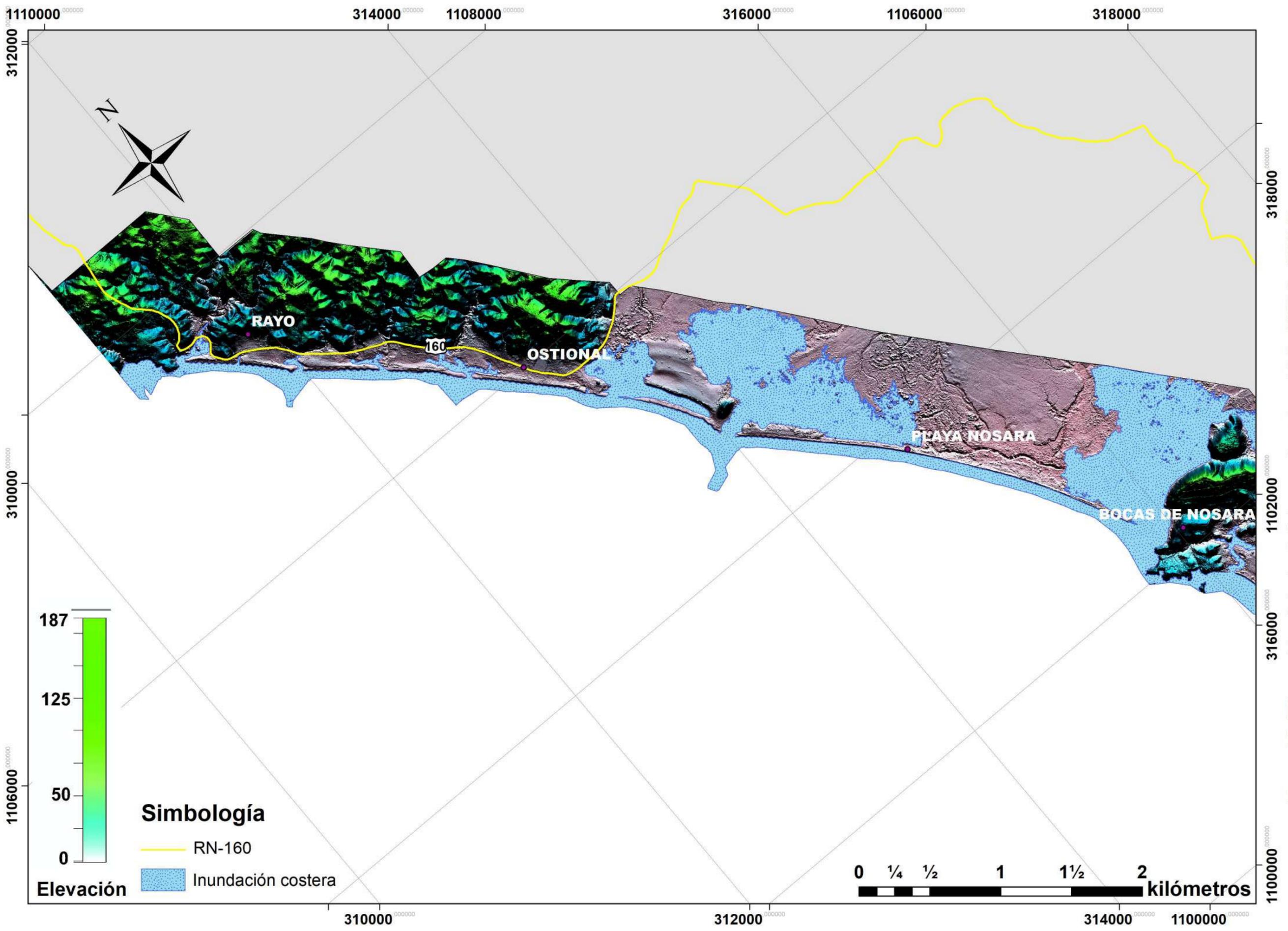
Mapa 17. Elevación del nivel del mar de ,4,6 m (CG+ENOS+MM) A



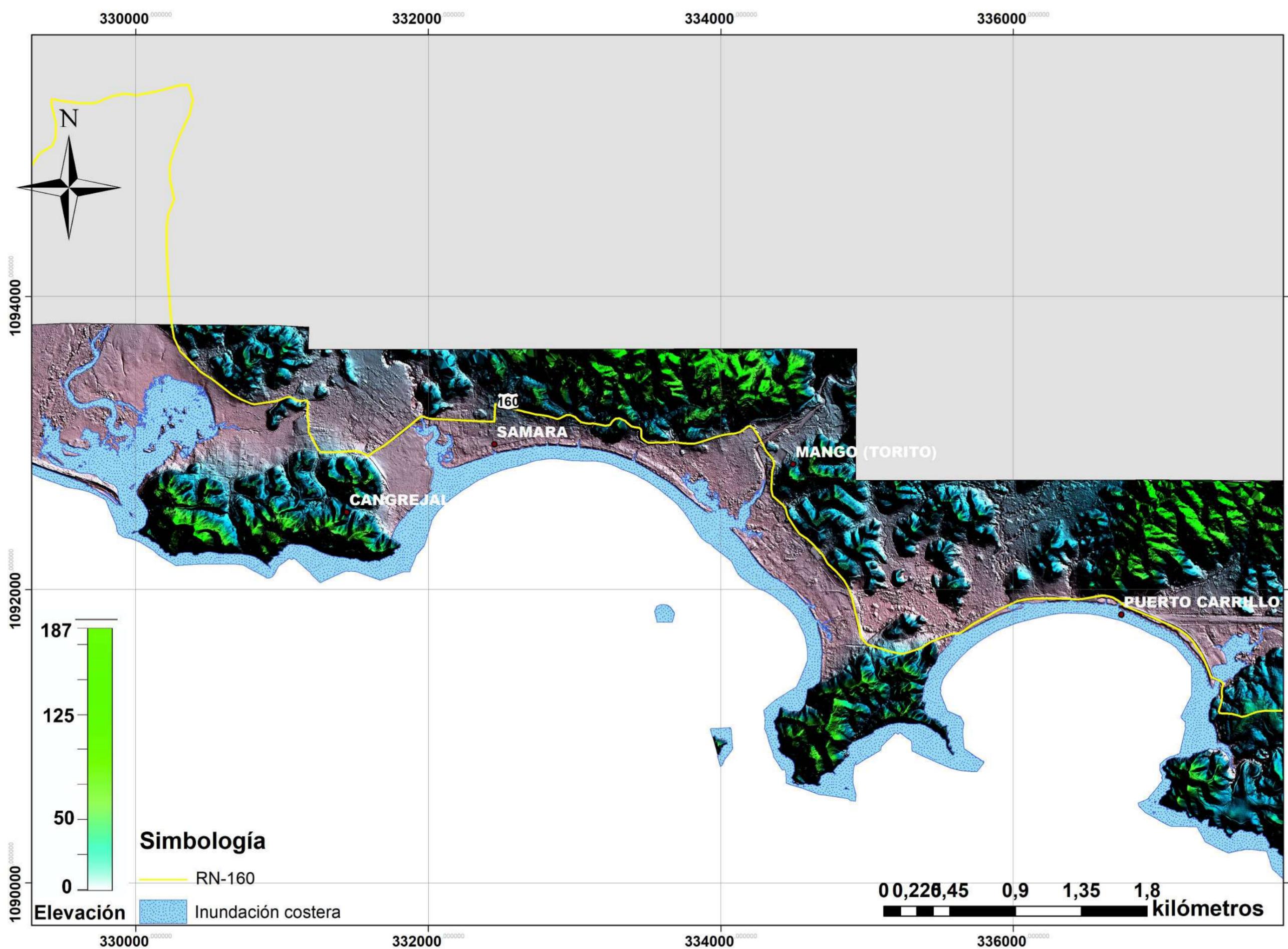
Mapa 18. Elevación del nivel del mar de 4,6 m (CG+ENOS+MM) B



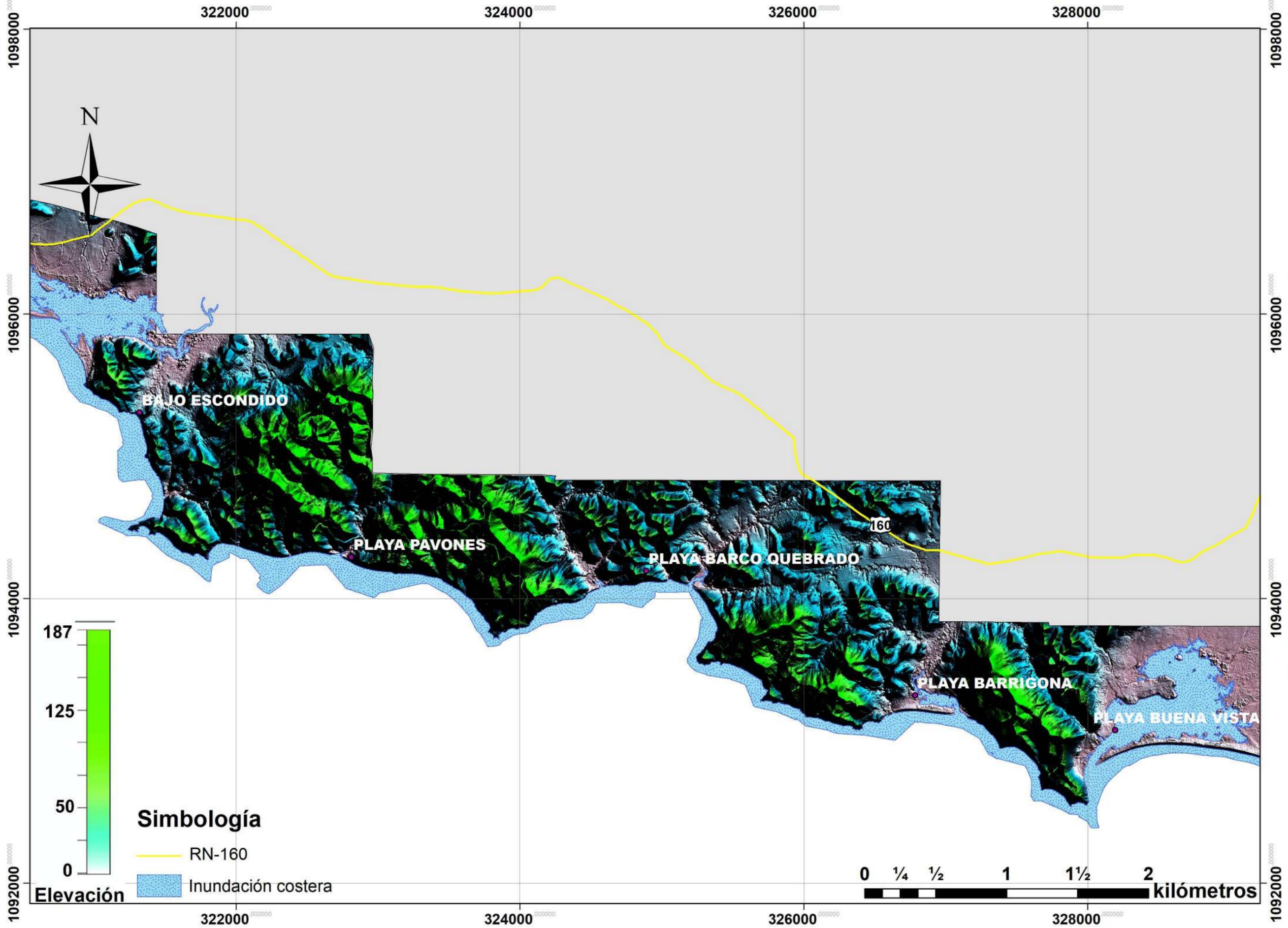
Mapa 19. Elevación del nivel del mar de 4,6 m (CG+ENOS+MM) C



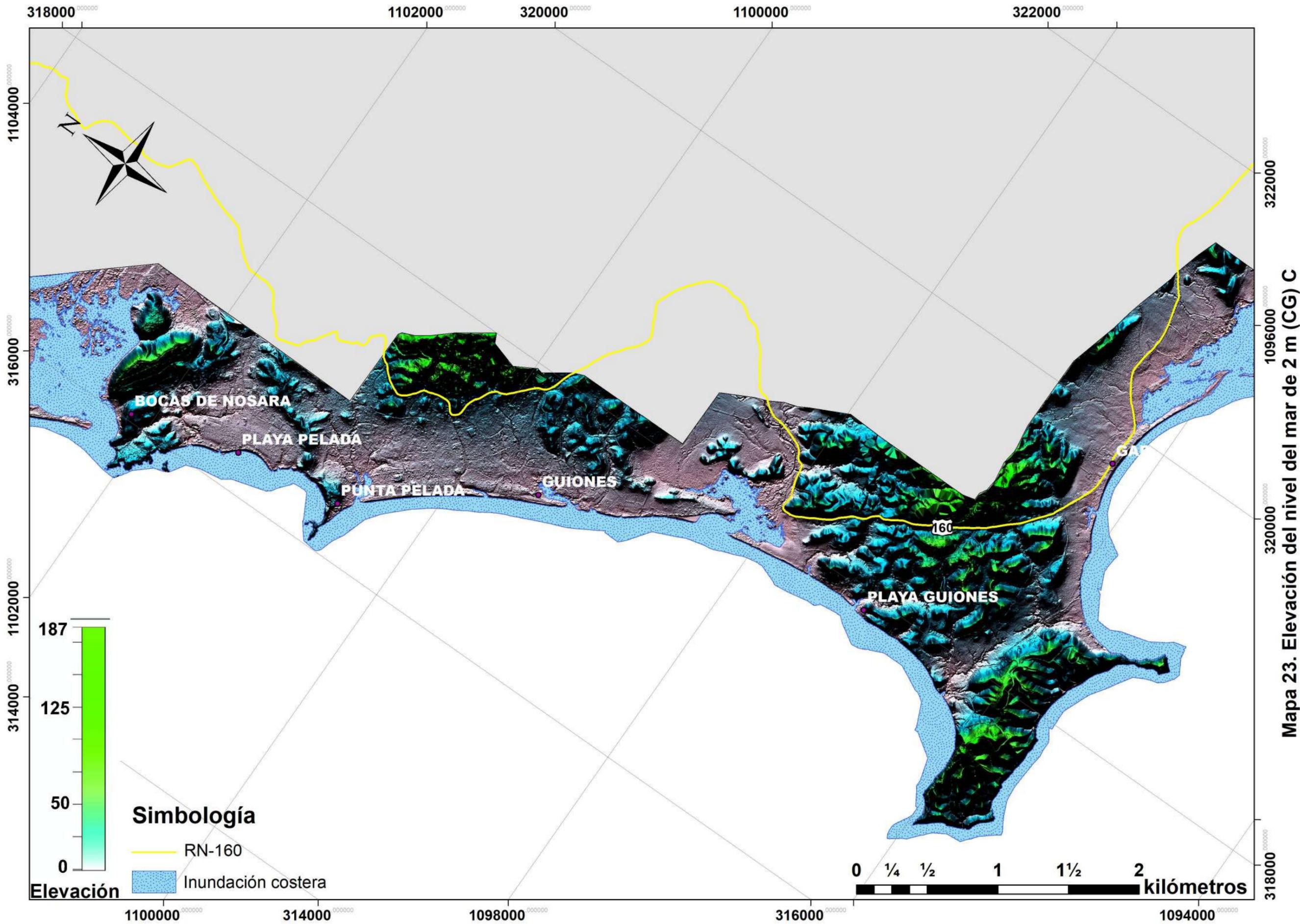
Mapa 20. Elevación del nivel del mar de 4,6 m (CG+ENOS+MM) D



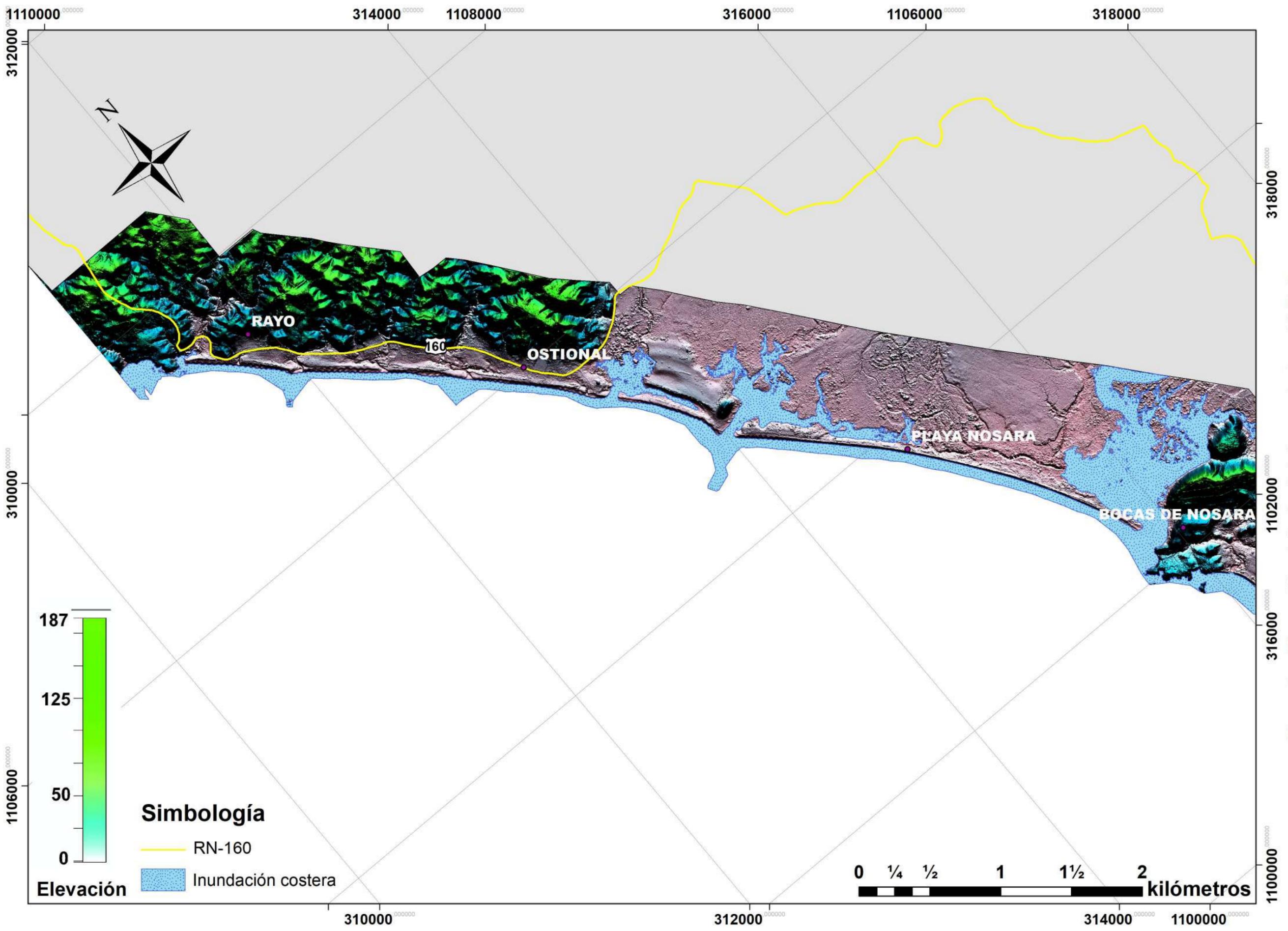
Mapa 21. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG) A



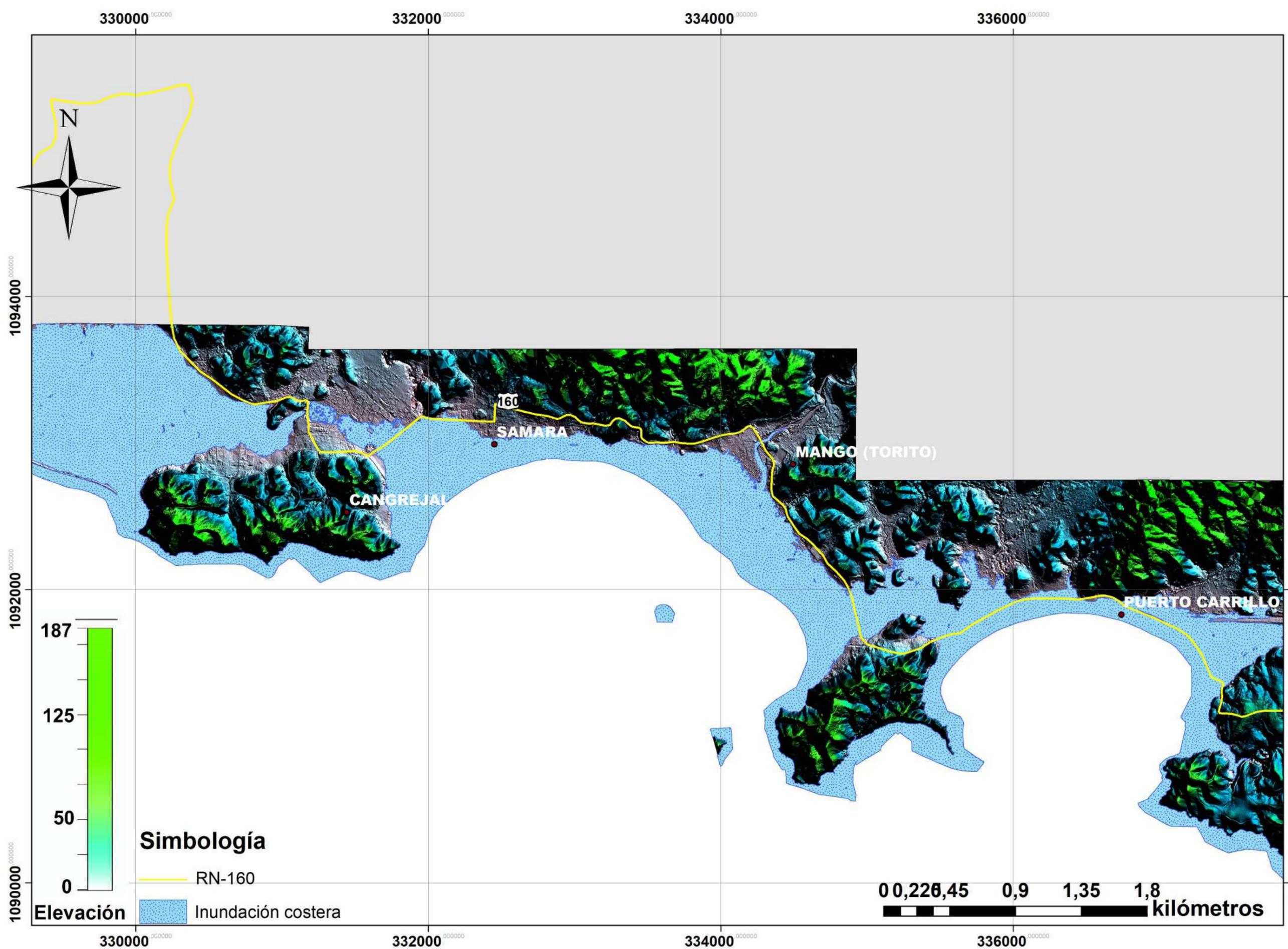
Mapa 22. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG) B



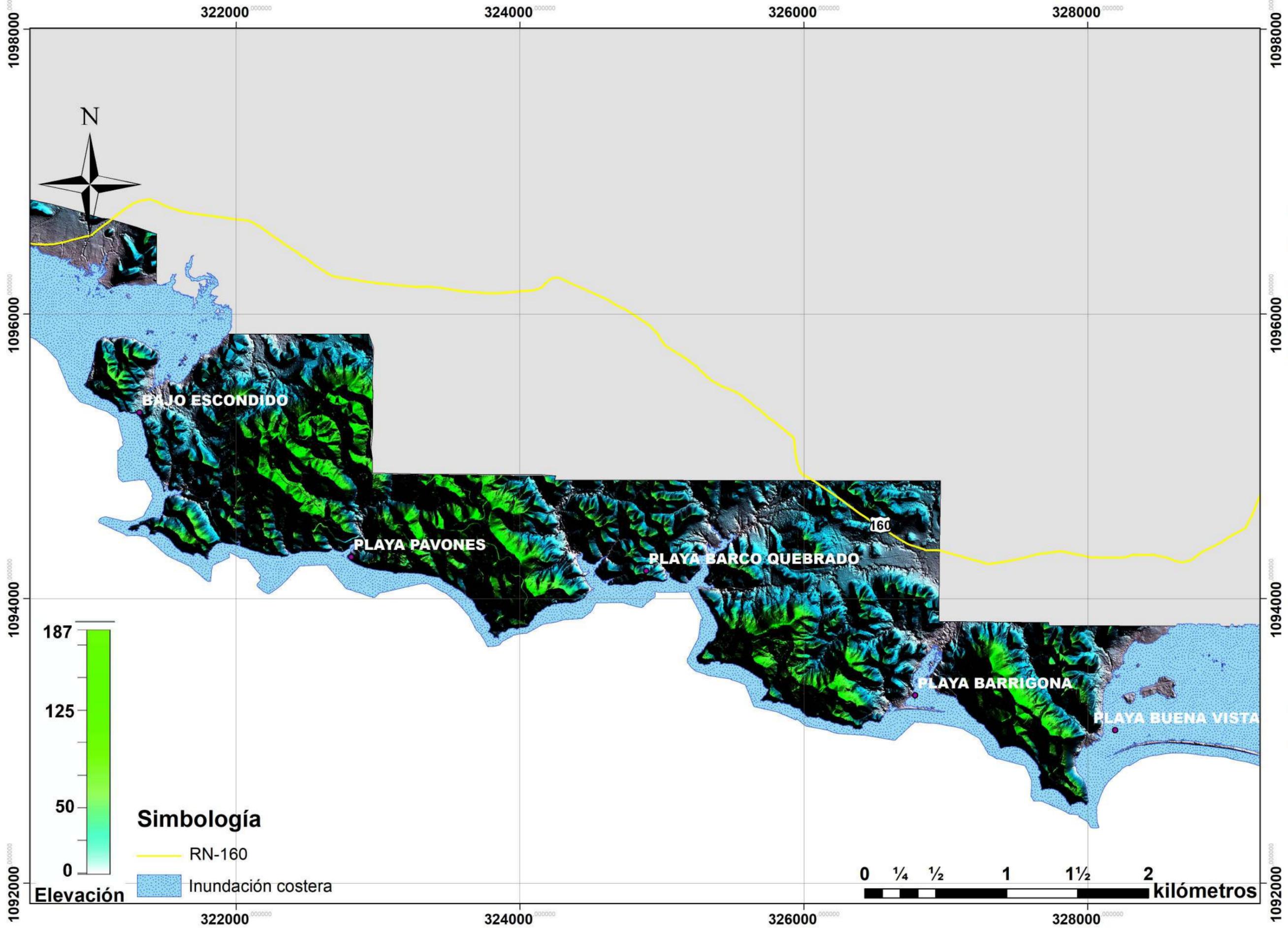
Mapa 23. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG) C



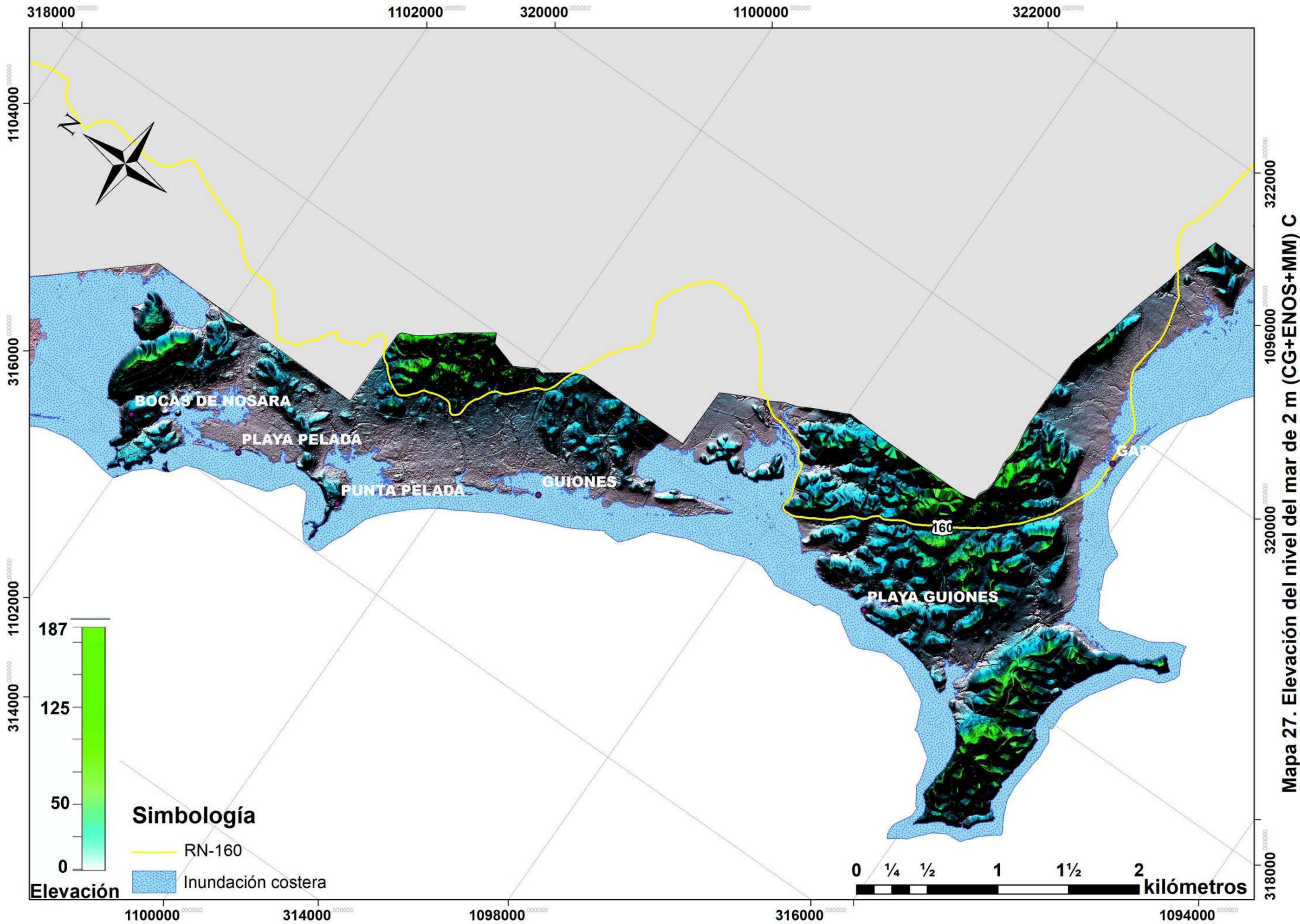
Mapa 24. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG) D



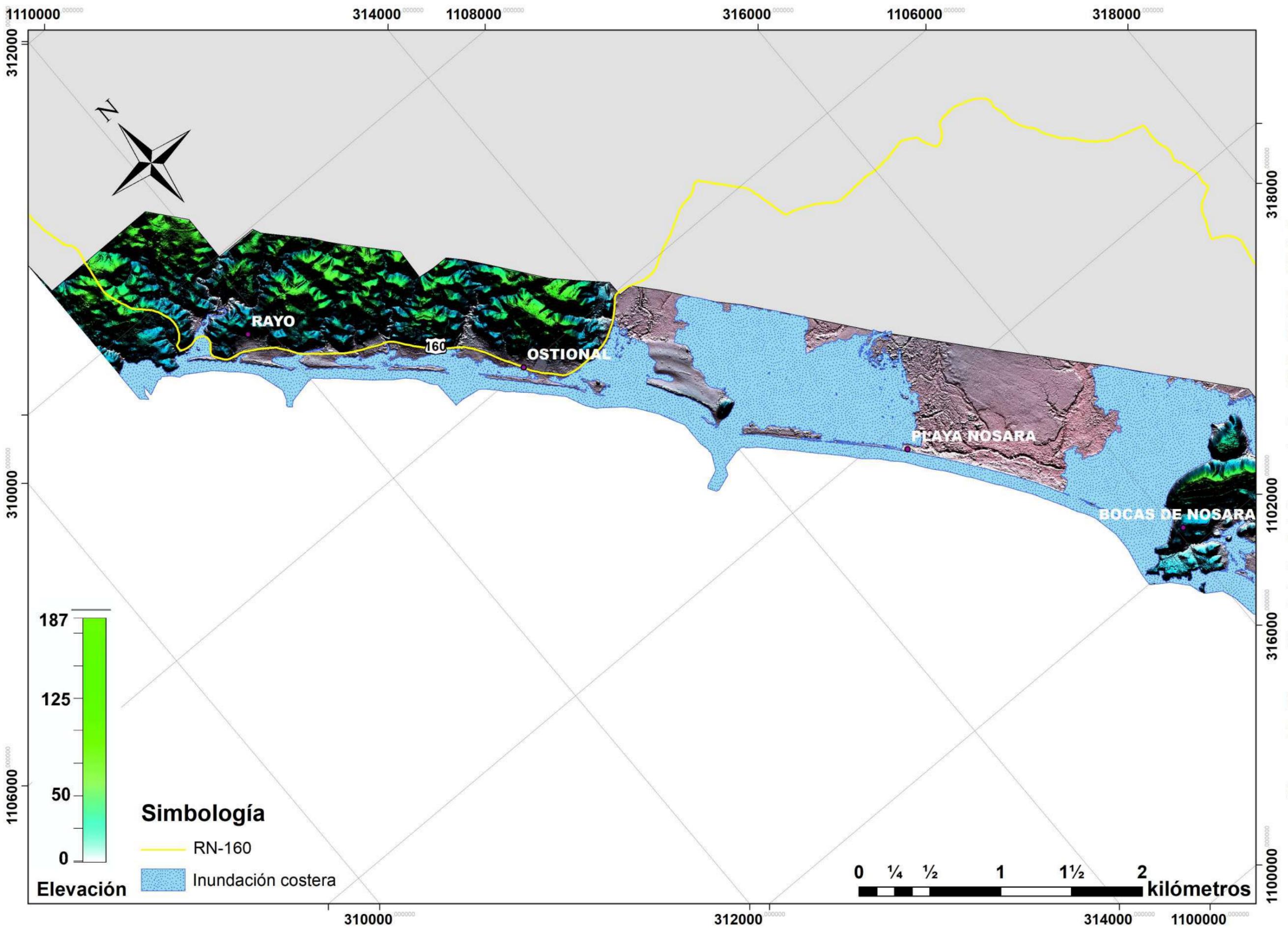
Mapa 25. Elevación del nivel del mar de 5,6 m (CG+ENOS+MM) A



Mapa 26. Elevación del nivel del mar de 5,6 m (CG+ENOS+MM) B



Mapa 27. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG+ENOS+MM) C



Mapa 28. Elevación del nivel del mar de 2 m (CG+ENOS+MM) D

5.3.1 Descripción de los sitios inundados

A partir de los mapas del área de estudio que contienen los escenarios de elevación ante el nivel del mar (Mapas 13 al 28) se describe el alcance de la inundación costera según cada escenario, dividido entre sectores:

- **1 m (CG):** 1m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global (Mapas 13 al 16):

A: Las plataformas de abrasión y playas desde punta Carrillo a playa Buena Vista resultan inundadas prácticamente en su totalidad. El mar ingresa a tierra a través de los ríos Malanoche (hasta 180 m) y Lagarto (hasta 330 m) en Sámara. A partir de la línea de marea alta no hay tierras inundadas.

B: La franja costera desde playa Buena Vista hasta playa Garza posee todas sus plataformas de abrasión y playas inundadas. La inundación ingresa por la quebrada ubicada en la parte Oeste de playa Buena Vista, hasta 430 m tierra adentro y por el río Garza, hasta 330 m tierra adentro. A partir de la línea de marea alta no hay tierras inundadas.

C: La franja litoral que va desde playa Garza hasta playa Nosara posee todas sus plataformas de abrasión y playas inundadas. La inundación ingresa tierra adentro a través del río Rempujo hasta 150 m, y a través del río Nosara hasta 2,5 km. A partir de la línea de marea alta no hay tierras inundadas.

D: Las plataformas de abrasión y playas desde playa Nosara hasta punta Rayo (extremo Oeste de Ostional) resultan inundadas prácticamente en su totalidad. El mar ingresa a tierra a través de los ríos Montaña (hasta 630 m) y Ostional (hasta 180 m), a partir de la línea de marea alta no hay tierras inundadas.

- **4,6 m (CG+ENOS+MM):** 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima (Mapas 17 al 20):

A: Además de los sitios inundados para el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, se empiezan a inundar las planicies

y tierras bajas frente a las costas. En la parte Este de Carrillo, la inundación ingresa hasta 70 m, mientras que en la parte Oeste ingresa hasta los 615 m, abarca incluso la planicie por detrás de punta Indio (cerro que divide Sámara y Carrillo). En Sámara, en su parte Este la inundación alcanza 360 m a partir de la línea de costa. El agua del océano ingresa por los ríos quebrada Carrillo hasta 575 m tierra adentro e incluso se desborda hasta 300 m en cada margen, 520 m tierra adentro por el río Malanoche y 372 m en el río Lagarto, con un desborde de 80 m aproximadamente en cada margen. La RN-160 es inundada en el extremo Oeste de Carrillo, en el extremo Oeste de Sámara y es alcanzada por la inundación en menor grado a la altura de río Lagarto.

B: Además de los sitios inundados para el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, se inundan también sitios como: la planicie frente a playa Buena Vista, es cubierta por el agua por completo hasta 1 km tierra adentro. La inundación ingresa por quebrada Barrigona y quebrada Barco Quebrado, durante 360 m.

C: Además de los sitios cubiertos por mar para el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, se inundan también los siguientes sitios: planicie frente a playa Garza, donde el mar ingresa hasta 1 km tierra adentro; río Rempujo, el mar ingresa 420 m a partir de la línea de marea alta e inunda la planicie contigua; quebrada en la parte central de playa Guiones, ingresa hasta 170 m, además de la quebrada en la parte Oeste de Guiones, donde inunda 300 m; por último, la quebrada al oeste de playa Pelada, donde ingresa por 345 m.

D: Los sitios inundados en el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global continúan inundados. El mar también ingresa por el río Nosara y se desborda hacia la planicie contigua a este, resultando en un área cubierta por el agua de aproximadamente 1 km². De igual manera el mar ingresa por el río Ostional e inunda la planicie contigua a este, resultando en un área de inundación de aproximadamente 1,33 km². El agua también ingresa por

las cuatro quebradas ubicadas frente a playa Ostional, hasta 200 m tierra adentro. La RN-160 es inundada en el sector de quebrada Rayo.

- **2 m (CG):** 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global (21 al 24):

A: Los sitios inundados en el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global continúan se inundan de igual manera. El agua ingresa por quebrada Carrillo hasta 530 m, por río Malanoche hasta 405 m y río Lagarto hasta 568 m. La planicie contigua al río Buena Vista posee un área de inundación de 0,6 km². La RN-160 es alcanzada por la inundación en las cercanías de quebrada Carrillo.

B: Las zonas inundadas en el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global son similares. Se presenta un área de inundación de aproximadamente 0,5 km² en la planicie costera al Este de Buena Vista. El agua ingresa por quebrada Barrigona hasta los 287 m tierra adentro, además ingresa por el río Garza y crea un área de inundación de aproximadamente 0,48 km².

C: Además de las tierras inundadas por mar para el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, se inundan también los siguientes sitios: planicie contigua a río Rempujo, el área de inundación es de 0,192 km². El agua del océano ingresa por dos quebradas ubicadas frente a Guiones, una ubicada en la parte central de la playa y otra en la parte Oeste, con un ingreso tierra adentro de 158 m y 192 m respectivamente. Se inunda también la planicie asociada a río Nosara, presenta un área de inundación de 835 m² aproximadamente.

D: Se inundan las mismas áreas que para el escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global. Además, se inunda una planicie costera frente a playa Nosara, el área de inundación de esta planicie corresponde con 0,355 km², asimismo la planicie aluvial del río Ostional, con 0,1 km² de inundación.

- **5,6 m (CG+ENOS+MM):** 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima (Mapas 25 al 28):

A: Todas las zonas inundadas en los escenarios anteriores también resultan inundadas para este escenario. También los siguientes sitios son cubiertos por el océano: Las planicies frente a playa Carrillo y frente a playa Sámara resulta inundadas por completo, con un área de inundación de 1,172 km² y 1,687 km² respectivamente; El agua ingresa por río Malanoche hasta 723 m tierra adentro; la RN-160 es cubierta por agua por completo en el tramo frente a playa Carrillo, de la misma manera el agua inunda la carretera en un segmento de 350 m al Este de Sámara y otro de 700 m en Cangrejal.

B: Además de las zonas inundadas anteriormente, el mar alcanza sitios como: la planicie frente a playa Buena Vista, donde la inundación cubre 2,6 km², ingresa por quebrada Barrigona y quebrada Barco Quebrado hasta los 488 m y 486 m con respecto a la línea de costa.

C: Todas las zonas inundadas en los escenarios anteriores también resultan inundadas para este escenario. Las planicies frente a playa Garza y frente a Guiones Sur resultan inundadas, abarcan un área de 1,385 km² y 581 m² aproximadamente. Tierras bajas contiguas a las quebradas en la parte central y al Norte de Guiones se inundan y abarcan un área de 0,19 km² y 0,132 km² respectivamente, de igual manera las tierras bajas al Norte de playa Pelada con un área de inundación de 0,14 km². El mar ingresa por el río Rempujo hasta 1 km tierra adentro, en este mismo sector la inundación alcanza un segmento de aproximadamente 900 m de la RN-160.

D: Además de las zonas inundadas anteriormente, las siguientes tierras bajas resultan inundadas: la planicie contigua al río Nosara, una planicie frente a playa Nosara y la planicie frente a playa Ostional, con áreas de inundación de 0,98 km², 1, 25 km² y 0,45 km² respectivamente. El agua del océano ingresa por quebrada Rayo hasta 396 m tierra adentro, además la RN-160 es impactada por la inundación en este sector, afectando un tramo de aproximadamente 110 m.

CAPÍTULO VI

6.1 Discusión de resultados

6.1.1 Índice de erosión-sedimentación costera

De la tabla 15 se obtiene una longitud total analizada con el IE-SC de 29,7 km; también se obtiene la longitud acumulada que presenta cada uno de los niveles, con el siguiente orden: 2, 1, 3, 4 y 5; donde el nivel 2 posee una mayor longitud en el área de estudio y el nivel 5 la menor, la figura 56 contiene un gráfico que muestra dicha tendencia. La figura 57 muestra un gráfico con la longitud acumulada de los segmentos analizados con el IE-SC por cada playa según su categoría.

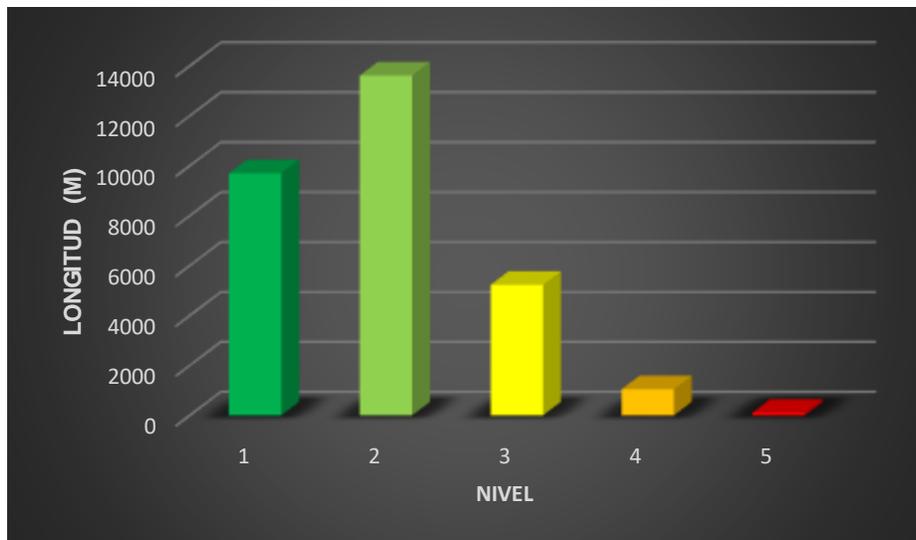


Figura 56. Longitud acumulada de segmentos según los niveles del IESC.

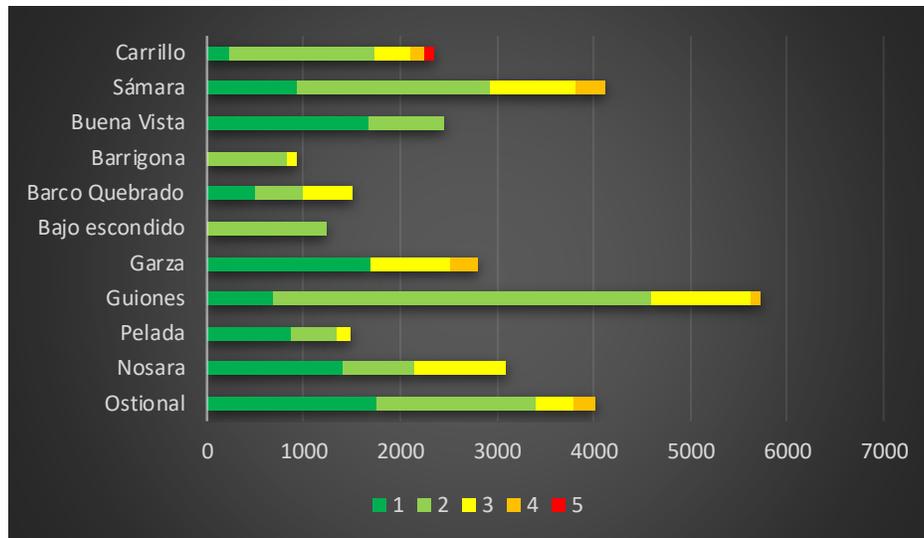


Figura 57. Longitud acumulada de segmentos por cada playa.

Con respecto a la RN-160, playa Carrillo es el sector que ha sido impactado en mayor medida por erosión de alto grado, puesto que posee al menos cuatro sitios con nivel 4 o 5 (aunque no necesariamente son los más extensos), presenta puentes en mal estado y tramos de la carretera que serían afectados en el futuro si las condiciones de ascenso del nivel del mar y erosión costera se mantienen igual que en la actualidad o si empeoran. Además, un segmento de 400 m aproximadamente con nivel 3, ubicado en la parte central de la playa y que podría ocasionar problemas en el futuro.

Se desprende de la figura 57 que las playas con mayor longitud de segmentos con nivel 3 o superior son: Sámara, Garza y Guiones. Por el contrario, los segmentos de la línea de costa que poseen menor longitud de segmentos de costa con daños por erosión del nivel 3 o superior corresponden con: Buena Vista, Barrigona, Bajo escondido y la parte Este de Sámara, los cuales poseen en su mayoría niveles 1 y 2.

Se determinó que las zonas con mayores problemas de erosión para el área de estudio son las zonas con desembocaduras de río y se recomienda a las instituciones encargadas del mantenimiento de la RN-160 prestar especial atención a la infraestructura cercana a estas. La excepción son algunos sitios donde por razones no determinadas el nivel de erosión es relativamente elevado sin la

presencia necesariamente de una desembocadura, esto sucede en la parte N de playa Garza y en el extremo N de playa Ostional.

Eventos de tormenta que impactaron la zona de estudio como la tormenta tropical Nate en 2017 (La Nación, 2017) y las ondas tropicales #40 y #41 en 2018 (La Prensa Libre, 2018), así como precipitaciones intensas y por largos periodos agravan los problemas de erosión en la costa. Esto se debe principalmente a que el agua de lluvia drena directamente al océano (ya sea a través de ríos, drenajes intermitentes, alcantarillas, etc.), por lo que al aumentar el caudal del agua que baja hasta el océano también aumenta la erosión al menos en las zonas contiguas a desembocaduras.

Generalmente, la presencia de un río que desemboca en el océano hace que el nivel asignado aumente en, aproximadamente, un grado con respecto a las zonas aledañas, por ejemplo, un sector con nivel 2 si tiene una desembocadura contigua a este, va a aumentar a nivel 3 en la parte cercana al río, aunque podrían ser hasta dos niveles dependiendo del cauce regular del río y de la infraestructura del lugar, esto se debe a la manera en que son definidos los niveles del IE-SC y a los criterios que se toman en cuenta (Figura 58). Otro dato para destacar es que la erosión en las desembocaduras es más fuerte hacia la margen derecha del río, lo cual puede estar influenciado por las corrientes marinas que predominan.



Figura 58. Aumento de nivel del IE-SC. Se observa como en las cercanías de la desembocadura la terraza posee mayor tamaño (Fecha: 17/8/2017. Coordenadas: 316103,9 E, 1101690,16 N).

La infraestructura que se encuentra en peligro tiene en común dos aspectos: Cercanía a la línea de costa y cercanía a drenajes que caen directamente al océano; ya sean ríos, quebradas, drenajes intermitentes o alcantarillas.

Hay sitios donde, por factores antrópicos, en este caso la presencia de alcantarillas que drenan en mar, se agrava el problema de erosión, esto se da en Sámara, principalmente. Por lo general se da en zonas donde existe mayor población y mayor cantidad de viviendas y negocios. Se recomienda tomar en cuenta la presencia de alcantarillas, canales y drenajes que caen al mar a la hora de construir infraestructura en una zona costera.

La infraestructura de contención de la erosión encontrada no modifica de manera significativa las corrientes marinas o los patrones de erosión debido a que por lo general son de bajo costo, de tamaño reducido o son temporales.

En general, las actividades antropogénicas que se presentan no son a gran escala como sí lo son: represas, construcción de puertos o dragados. Aunque sí se dan algunas actividades antropogénicas de baja importancia pero que causan daños a escala local, por ejemplo, en el poblado de Sámara donde hay alcantarillas que drenan directo al océano, por lo que se puede afirmar que la erosión costera que se presenta en el área de estudio se da principalmente por causas naturales, aunque se sale de los objetivos de este estudio determinar las razones específicas que ocasionan la erosión en un lugar determinado de la costa.

6.1.2 Susceptibilidad ante erosión costera

La asignación del grado de susceptibilidad según cada parámetro, la creación de la matriz de susceptibilidad ante erosión costera y la asignación de los pesos a cada parámetro tienen un alto grado de dificultad en su evaluación, esto debido a la carencia de datos específicos para el área de estudio, por lo que resultan de gran importancia las observaciones realizadas en el campo, el sentido crítico y el correcto conocimiento del lugar evaluado, por quien clasifica.

La ponderación elegida (Tabla 10) muestra coherencia con los mapas de susceptibilidad finales, donde se nota la influencia de aspectos como: la cercanía al océano, la resistencia relativa de las rocas, elevación topográfica. Es posible apreciar como el color (grado de susceptibilidad) en los mapas de susceptibilidad ante erosión costera cambia según se varíen estos valores. Se observa como los lugares muy cercanos a la costa presentan valores muy altos (colores rojizos) de susceptibilidad y los más alejados muestran valores más bajos (colores verdes oscuro).

Se estableció como la resistencia de la roca influye en el resultado; véase por ejemplo el caso de dos formaciones que afloran en punta Pelada a la misma distancia de la línea de costa y que poseen la misma altitud con respecto al nivel del mar, estas son las formaciones Santa Teresa y Punta Pelada. A las anteriores, se les asigna valores de susceptibilidad, según el parámetro de geología, moderados y muy bajos respectivamente, esto a partir del valor de resistencia a la abrasión obtenido en el ensayo con la Máquina Los Ángeles. En el mapa de susceptibilidad final, a pesar de que el valor de otros parámetros como el de distancia a la línea de costa y elevación topográfica sean los mismos, se muestra una variación en el valor de susceptibilidad ante erosión que es causado por la diferencia en la calidad de las rocas.

De los resultados obtenidos a partir del conteo estadístico (Tabla 20), se obtienen algunos gráficos para una mejor comprensión del análisis de susceptibilidad ante erosión costera de la RN-160. En la figura 59 se muestran los porcentajes de la carretera según su grado de susceptibilidad, y en la figura 60 se muestran los segmentos acumulados según cada frente de costa por los que pasa la carretera.

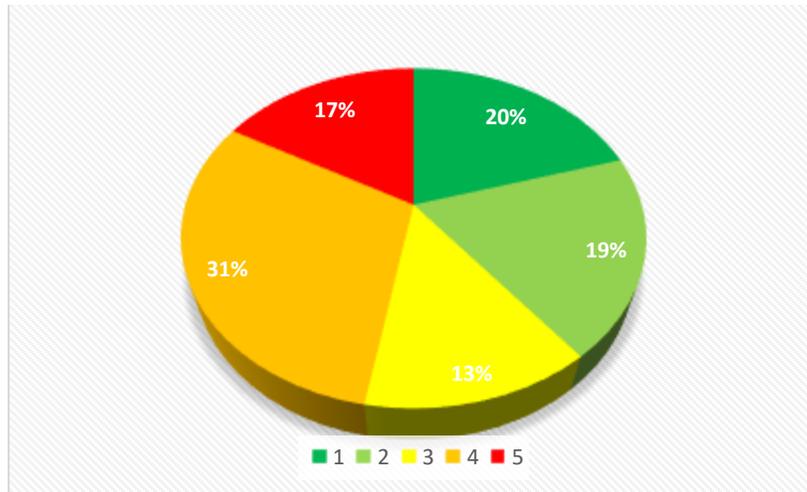


Figura 59: Porcentajes de la RN-160 según su grado de susceptibilidad ante erosión costera.

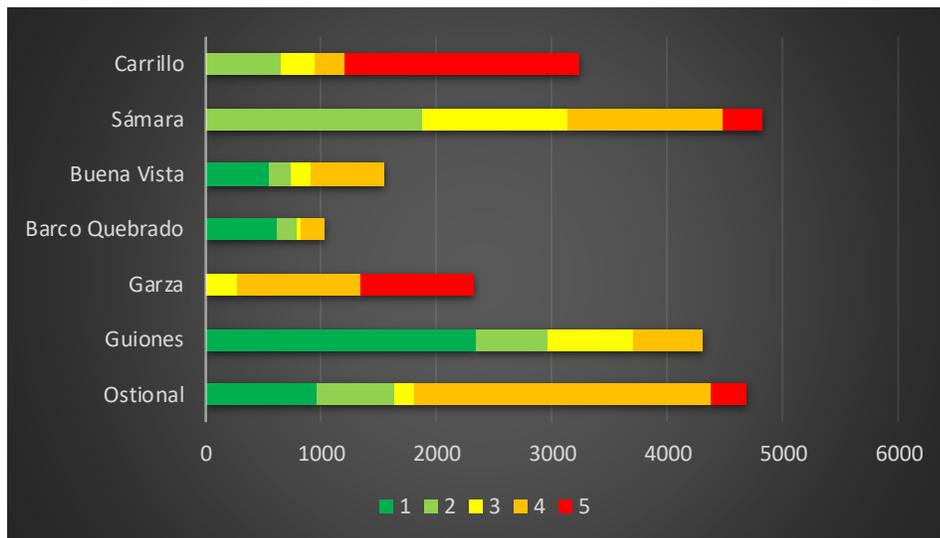


Figura 60. Longitudes de segmentos de la RN-160 susceptibles ante erosión costera por cada frente de costa.

A partir de la tabla 20 y de los gráficos presentes en las figuras 59 y 60 se determina lo siguiente:

- Se analizó un total de 21,95 km de la RN-160.
- El frente de costa (playa) con mayor longitud de carretera analizada fue Sámara.

- La playa con mayor longitud y mayor porcentaje de carretera que pasa sobre el grado 5 de susceptibilidad es Carrillo (2,03 km; 62,9%).
- La playa con mayor longitud y mayor porcentaje de carretera que pasa sobre el grado 4 es Ostional (2,580 km; 55,1%).
- La playa con mayor longitud y mayor porcentaje de carretera que pasa sobre el grado 3 es Sámara (1,253 km; 26%).
- La playa con mayor longitud y mayor porcentaje de carretera que pasa sobre el grado 2 es Sámara (1,88 km; 39%).
- La playa con mayor longitud y mayor porcentaje de carretera que pasa sobre el grado 1 es Guiones en su sector Norte (1,547 km; 89,6%).
- Los frentes de costa de Carrillo y Sámara no tienen ningún sector de la RN-160 que presente el grado 1.
- El frente de costa de Garza no presenta ningún segmento de carretera que posea el grado 1 o 2 de susceptibilidad ante erosión costera.
- Las playas de Buena Vista, Barco Quebrado y Guiones no poseen ningún segmento de carretera que posea el grado 5 de susceptibilidad ante erosión costera.
- De la totalidad del área de estudio, 3,68 km de la RN-160 se encuentran sobre terreno con grado 5 de susceptibilidad ante erosión costera, lo cual representa un 16,75% de la longitud de la carretera analizada.
- 6,7 km de la RN-160 se encuentran sobre terreno con grado 4 de susceptibilidad ante erosión costera, lo cual representa un 30,5% de la longitud de la carretera analizada.
- 2,9 km de la RN-160 se encuentran sobre terreno con grado 3 de susceptibilidad ante erosión costera, lo cual representa un 13,4% de la longitud de la carretera analizada.

- 4,2 km de la RN-160 se encuentran sobre terreno con grado 2 de susceptibilidad ante erosión costera, lo cual representa un 19% de la longitud de la carretera analizada.
- 4,5 km de la RN-160 se encuentran sobre terreno con grado 1 de susceptibilidad ante erosión costera, lo cual representa un 20,3% de la longitud de la carretera analizada.

El área de estudio en general presenta dos comportamientos opuestos con respecto a la susceptibilidad ante erosión costera. Por una parte, los sitios con valores de susceptibilidad más altos coinciden en la mayoría de los casos con zonas que presentan características como: elevaciones muy bajas (menores a 30 m s.n.m) y cercanía al mar (menor a 300 m). Las morfologías asociadas a estos lugares son: planicies aluviales o marinas, desembocaduras, estuarios y playas. Una característica en común de estos sitios es que tienden a presentarse materiales inconsolidados. Por otra parte, tenemos sitios con valores de susceptibilidad más bajos, estos lugares presentan características como: presencia de materiales rocosos, elevaciones topográficas más altas (por encima de 30 m s.n.m.) y muchas veces alta cobertura boscosa; aspectos anteriores son evaluados por el modelo como sitios con susceptibilidades bajas a muy bajas. Los anteriores corresponden con geoformas como: cerros, colinas, acantilados y demás formaciones compuestas por materiales rocosos (Figura 61).

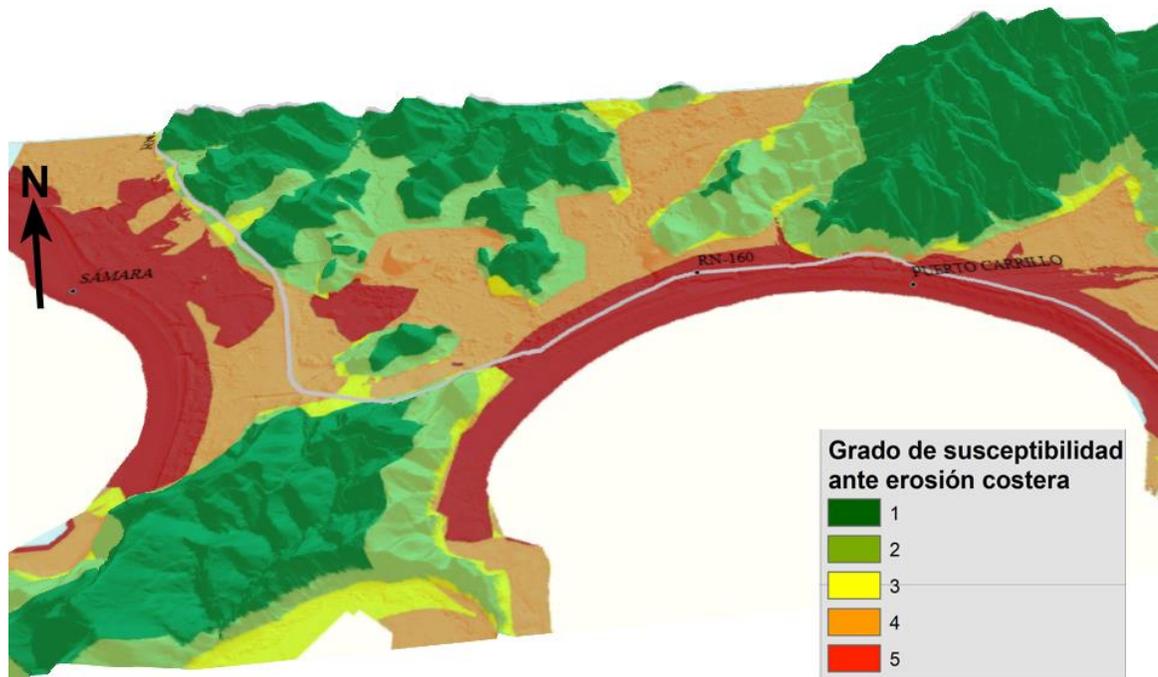


Figura 61. Vista tridimensional del mapa de susceptibilidad superpuesto a la topografía. Se superpone el mapa de susceptibilidad y la RN-160 a la topografía, y que muestra esta tendencia en el frente de costa de playa Carrillo.

Algunos de los parámetros elegidos no influyen significativamente en el resultado. Factores como: acción antropogénica, rango máximo de mareas y altura máxima de olas; presentan valores con clasificación moderada y en general su comportamiento es uniforme a lo largo de toda el área de estudio. Por lo tanto, no son determinantes en la manera en que luce el mapa, pero sí son importantes para tomar en cuenta; en otros casos las variaciones de estos podrían determinar si un área es más o menos susceptible a erosionarse. Otros parámetros, como el de Tasa de erosión, tienden a reducir el grado de susceptibilidad, a pesar de que su comportamiento varía a lo largo del área de estudio, sus valores bajos de susceptibilidad hacen que el resultado final se vea disminuido en valoración. Cabe recalcar que el parámetro de tasa de erosión puede variar mucho dentro de una misma franja litoral debido a dinámica costera local, corrientes marinas, oleaje y aportes de los ríos; a pesar de esto se utilizó un valor que trata de generalizar el comportamiento de este fenómeno.

La sección de la RN-160 al Este del puente sobre quebrada Carrillo se encuentra sobre rocas de la formación Puerto Carrillo, que presentan una resistencia moderada, además la carretera pasa sobre un acantilado muy cerca de la costa. En caso de que las rocas en la base del acantilado sean erosionadas es posible que afecte las bases de la carretera en este sitio.

La metodología en este caso es implementada para la evaluación del peligro sobre una carretera, aunque puede ser utilizada para otros fines como evaluar la infraestructura costera, principalmente la infraestructura turística, la cual abunda en las playas de Costa Rica y es de vital importancia para la economía de las comunidades costeras.

6.1.3 Escenarios ante elevación del nivel del mar

A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron cuatro escenarios donde se inundarían partes de la zona costera (incluidos algunos tramos de la RN-160), dos de ellos en un plazo de 50 años y dos de ellos a 100 años (Tabla 14), estos corresponden al aumento en el nivel del mar de 1 m en 50 años según IPCC (2007), además del escenario si a este aumento se le añade el efecto producido por el fenómeno del niño y una marea máxima; así también al aumento de 2 m en 100 años y si a esto se le añade la contribución al nivel del mar debido al fenómeno del niño y de una marea máxima.

- **1 m (CG):** 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global:

En general el escenario no es catastrófico, la línea de costa a lo largo de toda el área de estudio se mantiene en una posición muy similar a la que posee en la actualidad y se observa que la inundación no toca a la RN-160 en ninguna parte (Figura 62).

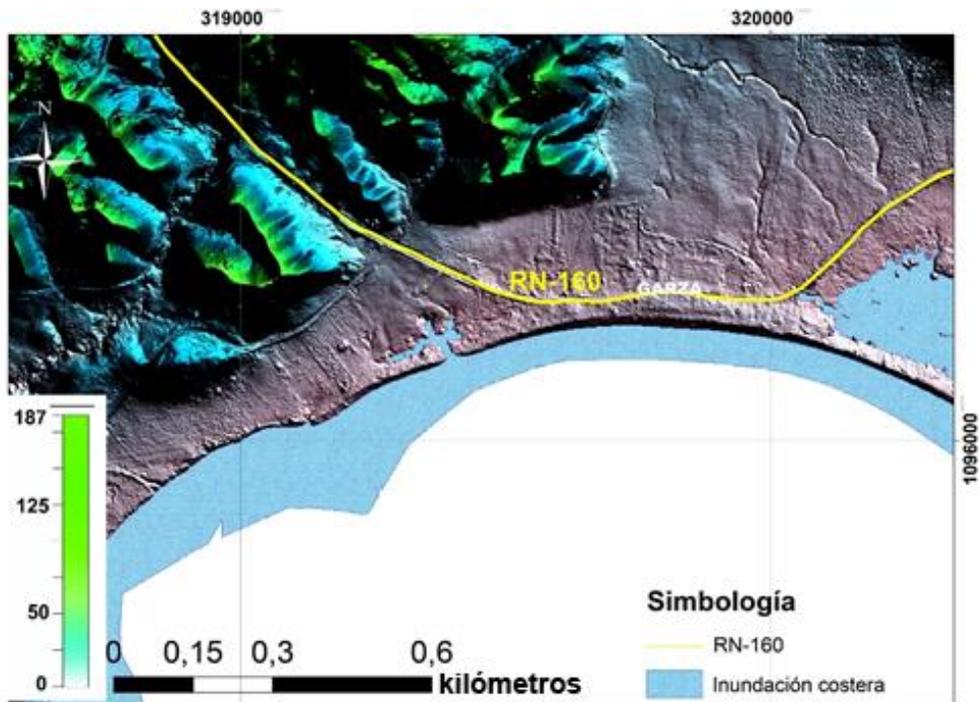


Figura 62. Ejemplo de escenario de 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global.

Es importante resaltar que en este escenario se aprecia como la inundación empieza a ingresar por las desembocaduras de algunos ríos, al menos por los de mayor caudal de la zona como lo son río Malanoche, Lagarto, Rempujo, Garza, Nosara y Montaña (Mapa 13).

Este escenario podría empeorar si se considera que este aumento de 1 m es con respecto al nivel medio del mar, es probable que en la pleamar el agua alcance puntos más cercanos a la carretera o incluso llegue a impactarla, también, puede que empiece a erosionar sus bases.

- **4,6 m (CG+ENOS+MM):** 1 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima:

Este escenario muestra como si se añade el efecto del Fenómeno del Niño y una marea máxima la inundación en las regiones costeras es mucho más significativa. El frente costero de las playas Carrillo, Sámara y Buena Vista se encuentra

inundado en su totalidad y en otras playas como Garza, Guiones, Nosara y Ostional se encuentra parcialmente inundado.

La inundación sobrepasa la carretera en algunos puntos. En playa Carrillo la carretera sería alcanzada por la inundación en la totalidad del frente costero, la inundación llega incluso a la planicie por detrás de punta Indio, el paso de la RN-160 que une Samara y Carrillo. En Sámara el mar no llega a impactar la carretera directamente pero el ingreso del agua marina a través de los ríos Malanoche y Lagarto hace que los tramos de la RN-160 que pasan cerca de dichos ríos queden muy cerca del agua considerando este escenario (Figura 63) (Mapa 17).

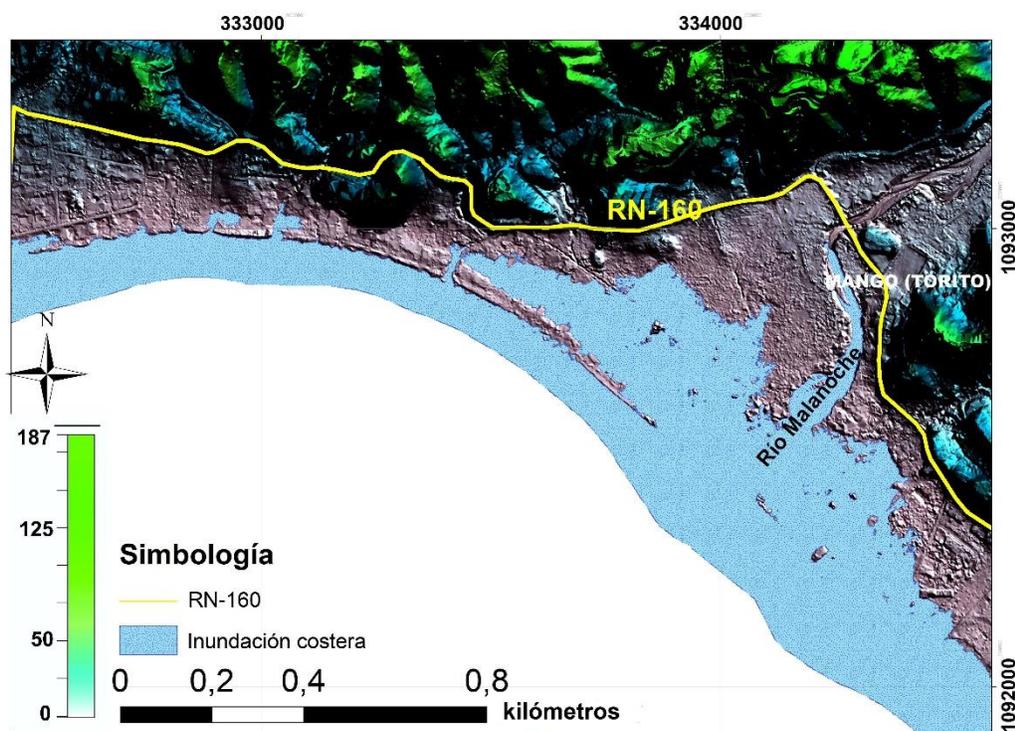


Figura 63. Ejemplo del ingreso del agua del mar a través de un río. En la imagen se muestra el caso del río Malanoche.

Los sitios donde el nivel del mar se acerca a pocos metros de la carretera sin tocarla son: la planicie entre el poblado de Cangrejal y Buena Vista, el frente costero de playa Garza, Guiones Sur debido al ascenso del agua a través del río Rempujo y cerca del poblado de Ostional. En Ostional se identifican cuatro quebradas por donde el mar ingresa y queda muy cerca de la carretera, aunque no la impacta. A

la altura de quebrada Rayo, el mar ingresa por esta y sobrepasa la carretera en un muy pequeño tramo (Mapa 20).

- **2 m (CG):** 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global:

Este escenario en general tiene consecuencias menos severas que el analizado en el párrafo anterior. El frente costero de playa Carrillo se encuentra inundado y la carretera es el límite de la inundación, esto ocasionaría daños en la RN-160. El agua marina ingresa principalmente por la desembocadura en el extremo este de la playa (quebrada Carrillo) (Figura 64), asimismo ingresa por las pequeñas quebradas que desembocan en dicha playa (Mapa 21).

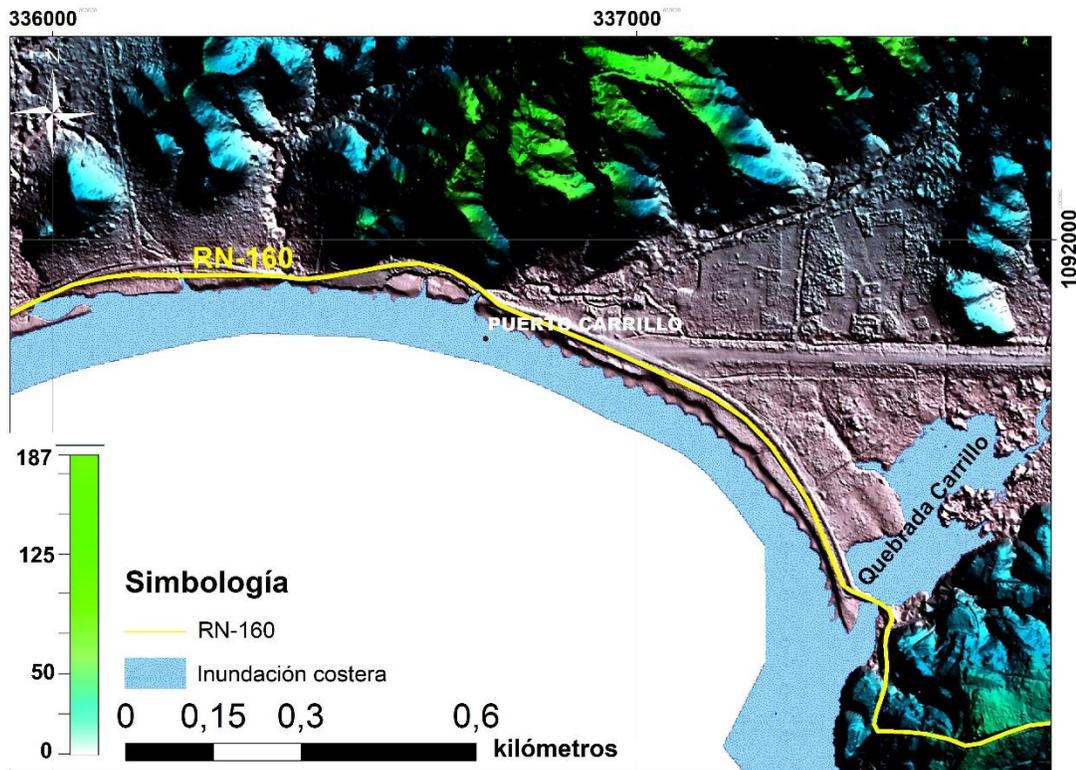


Figura 64. Ejemplo del ingreso del mar a través de una quebrada para el escenario de 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global.

Hay algunos sitios por donde el mar ingresa tierra adentro, principalmente canalizado por las desembocaduras de algunos ríos, aunque se acerca considerablemente a la RN-160 no llega a impactarla. Estos sitios son los ríos Malanoche, Lagarto, Rempujo y Nosara. La inundación se propaga también por

algunas planicies en los siguientes sectores: Buena Vista, Garza, Playa Nosara y Ostional.

La franja costera entre playa Barrigona y Bajo Escondido no sufre afectación alguna y a pesar de que el nivel del mar asciende, la línea de costa se mantiene muy similar a su posición actual (Mapa 22).

- **5,6 m (CG+ENOS+MM):** 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima:

Este escenario es el que presenta consecuencias más severas. Los tramos que presentaron problemas en los escenarios anteriores continúan inundados y más bien la longitud de los tramos afectados aumentó. Además, otros sitios en los que la inundación no había alcanzado a la RN-160, fueron alcanzados en este escenario.

El segmento de la carretera que pasa por playa Carrillo se encuentra por completo inundado, la planicie frente a la playa se encuentra casi por completo cubierta por el agua, así también la RN-160 (Figura 65). La franja al este de Sámara es alcanzada por la inundación debido al ingreso del agua por río Malanoche, y el segmento que pasa por el centro de Sámara se encuentra a escasos metros de ser golpeado por el agua (Mapa 25). Los otros sitios que son alcanzados por el agua según la simulación de este escenario son el oeste de Sámara debido al río Lagarto, la planicie al este de Buena Vista, el tramo de la carretera frente a playa Garza, el sector del Guiones Sur, así como el tramo al Este de playa Ostional. Para el caso de playa Ostional, a pesar de la cercanía de la RN-160 a la línea de costa, la carretera no se encuentra inundada en su totalidad, pero hay tramos que son alcanzados por el nivel del mar, principalmente debido al ingreso del agua por las quebradas que desembocan en dicho frente de costa (Mapa 28).

En frente de costa entre playa Barrigona y Bajo Escondido no muestra tener afectación alguna debido al ascenso del nivel del mar aún en el escenario más

severo que se analizó, esto favorece la protección de la carretera que pasa frente a dicho segmento costero (Mapa 26).

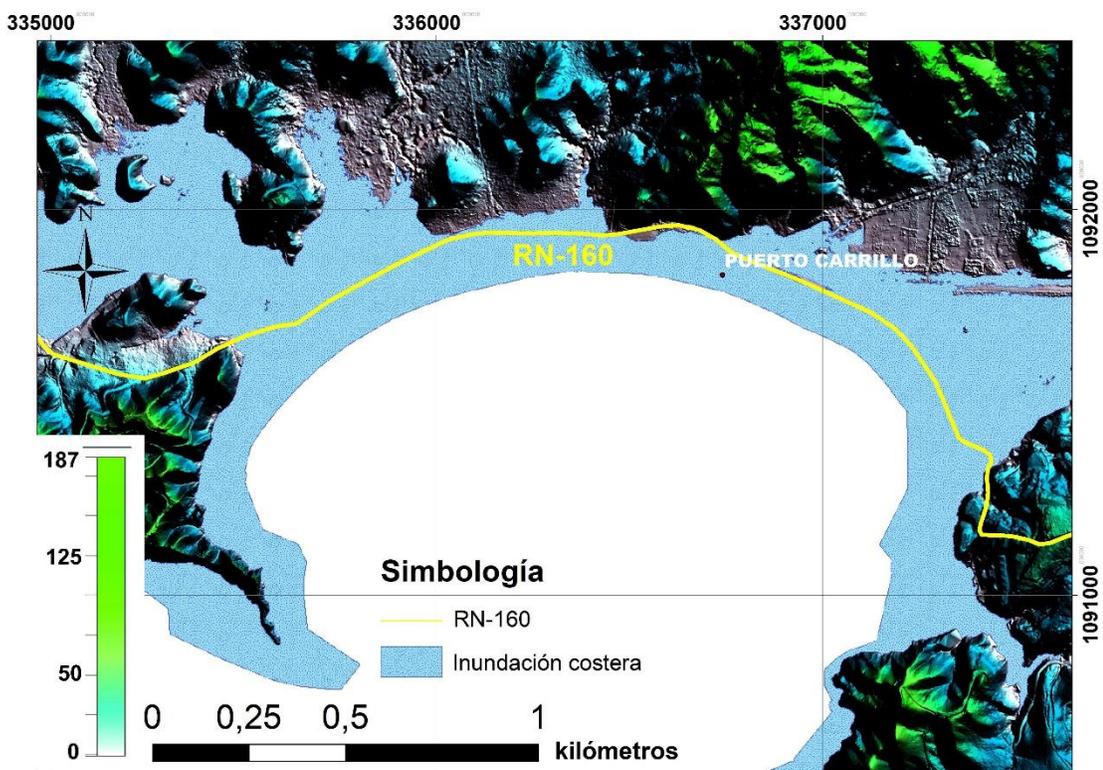


Figura 65. Ejemplo de inundación para el escenario de 2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno del Niño y una marea máxima.

6.2 Conclusiones

- **Sobre el objetivo No.1: Clasificar el área de estudio en unidades geomorfológicas, se concluye:**

1. Del análisis geomorfológico realizado se concluye que en la zona de estudio se presentan tanto formaciones rocosas como materiales inconsolidados. Las morfologías denominadas cerros, plataformas de abrasión y acantilados se clasifican como formaciones rocosas y las llamadas playas, manglares y planicies se clasifican como formaciones inconsolidadas. El origen de las morfologías es variado, donde se puede mencionar: denudacionales, fluviales y marinos. Esto es importante porque permitió abordar el estudio de la erosión sobre estas de manera más específica y precisa, por ejemplo, contribuyó a decidir si se aplica el Ensayo de Granulometría o el de Los Ángeles.
2. La utilización de una base de datos topográfica *LiDAR* como base para el estudio en general y para la clasificación geomorfológica permitió que el grado de detalle del proyecto sea elevado. Esto se debe a que la digitalización de la geomorfología y otros elementos como la línea de costa, la carretera, áreas inundadas debido a la elevación del mar, entre otros; fueron definidos con respecto a dicha base topográfica, por lo que conservan su precisión. Lo anterior hizo posible el análisis de una amenaza como la erosión costera a nivel de tramos específicos de la RN-160, de lo cual no hay registro que se haya realizado anteriormente en Costa Rica.
3. La clasificación del área de estudio en unidades geomorfológicas es un proceso fundamental en la metodología implementada. En el caso de la Susceptibilidad ante la Erosión, la geomorfología corresponde con uno de los

parámetros necesarios para crear los mapas, además de contribuir a la obtención de otros parámetros como el de geología. Para la implementación del IE-SC, el poder ubicar geofomas como playas en un mapa permite definir los lugares donde se va a trabajar este índice. Contribuye además en la logística del proyecto, ya que permite ubicar los sitios donde realizar el trabajo de campo y recolectar las muestras.

Sobre el objetivo No.2: Identificar y caracterizar cualitativa, cuantitativa y espacialmente los procesos de erosión costera y pérdida de sustrato en el tramo Carrillo-Ostional de la RN-160, se concluye:

1. El área de estudio presenta problemas de erosión costera a nivel regional, esto debido a que prácticamente todas las playas estudiadas presentan alguna evidencia de procesos erosivos según lo indica la aplicación del IE-SC. Sin embargo, la intensidad de la erosión en las diferentes playas es variable.
2. Los sectores con signos leves a moderados de erosión (nivel 2 y 3) son los que predominan y se pueden observar a lo largo de toda la línea de costa del área de estudio. Estos sitios a pesar de que no presentan situaciones de peligro para la RN-160 deben de ser monitoreados para prevenir cualquier daño a la carretera en el futuro.
3. Procesos de erosión graves a críticos (nivel 4 y 5) se pueden observar únicamente en algunas playas de la zona de estudio y se presentan de manera puntual en cuatro sitios de playa Carrillo, uno al Este de Sámara, uno cerca del centro de Guiones, dos en la parte Este de Garza y uno en el extremo Norte de Ostional. Estos lugares requieren intervención inmediata de parte de las autoridades a manera de obras de protección ante el oleaje o reparación de los tramos y los puentes.

4. En general los sitios donde la erosión presenta mayor intensidad son las desembocaduras de río y sus cercanías. Durante el trabajo de campo realizado se comprobó que a lo largo del área de estudio las desembocaduras presentan rasgos más severos que las franjas costeras adyacentes. El grado de erosión se ve afectado por cambios estacionales, donde épocas con mayores precipitaciones, tormentas o huracanes provocan que un mayor volumen de agua llegue al océano por los ríos e intensifique la dinámica de la interfase río-océano. La erosión se presenta de manera general con una mayor intensidad en la margen derecha de las desembocaduras del área de estudio.

Sobre el objetivo No.3: Determinar los sitios en el tramo Ostional-Carrillo de la RN-160, donde la carretera puede ser dañada por erosión costera, se concluye:

1. Una vez analizados los mapas de susceptibilidad ante erosión costera, se determina que hay 3 secciones de la RN-160 que presentan mayor peligro de erosión costera: 1) playa Carrillo, 2) playa Garza y 3) playa Ostional. Dichas secciones presentan tramos que se están viendo afectados en la actualidad o sectores que se verán impactados durante los próximos meses o años. A las anteriores hay que sumarle las secciones ubicadas frente a playa Sámara, playa Guiones en su parte Sur y playa Buena Vista, que a pesar de no encontrarse tan expuestos y que su distancia desde la línea de costa no sea tan cercana como sucede con los mencionados al principio (se encuentran a más de 100 m de distancia), presentan características que podrían contribuir con una eventual erosión, como lo son: bajas altitudes (menores a 10 m s.n.m.), sus bases se encuentran sobre materiales no consolidados o rocas poco resistentes.

2. Los tramos de la RN-160 que se encuentran frente a la franja costera de playa Barrigona, playa Barco Quebrado y el sector de Bajo Escondido poseen menor peligro de erosión costera. Lo anterior se debe a la barrera rocosa de cerros frente al mar que los protegen. Estos cerros están conformados por rocas con alta resistencia y por lo tanto baja susceptibilidad ante erosión, como lo son las de la formación Curú, que afloran en este sitio. El tramo frente a punta Guiones también se encuentra protegido por cerros de composición rocosa y elevadas altitudes (entre 30 m y 90 m), por lo que presenta baja susceptibilidad ante erosión a pesar de su cercanía a la línea de costa.

3. Mediante los ensayos de tipo geotécnico que se realizaron a las formaciones rocosas se confirmó que en el área hay materiales que resultan más o menos resistentes en comparación con otros ante la erosión costera. Los análisis granulométricos nos indican cuales depósitos son más fácilmente removibles según el tamaño de grano que estas posean. En este caso se obtiene que las planicies (aluviales, en el caso de nuestra área de estudio) son las que se erosionan más fácilmente, seguido de geoformas como playas y manglares. Por otra parte, los ensayos con la Máquina Los Ángeles nos indican que hay tres tipos de comportamiento de las rocas en el área de estudio, donde las rocas de la formación Complejo de Nicoya y Curú son las más resistentes, las de la formación Santa Teresa las menos resistentes y las restantes poseen resistencia intermedia. Es lógico que, comparativamente, los tramos de la carretera que se sitúan sobre formaciones inconsolidadas sufrirán daños de manera más rápida que los que se sitúan sobre roca firme, aunque la resistencia relativa de las rocas también es un factor que influye en el daño de ciertos tramos.

4. La metodología desarrollada durante esta investigación probó ser de fácil implementación, de relativo bajo costo y de fácil comprensión de sus resultados. Los resultados que se despliegan a partir del análisis de

susceptibilidad de zonas costeras muestran coherencia con lo esperado para esta zona y esto se ve reflejado en los mapas obtenidos, puesto que se puede apreciar visualmente la importancia de los factores de mayor influencia en la ocurrencia de la erosión costera como lo son: elevación topográfica, distancia a la línea de costa y geología.

5. Es posible que existan variaciones a nivel local si para generar los mapas se utilizan datos de entrada de diferente resolución. Esto se debe a que, para los mapas del área de estudio, en algunos de los parámetros como: tasa de erosión y altura máxima de ola, se utilizaron variables a nivel regional, ya que son las que se encuentran disponibles. Lo anterior se debe a la no existencia de estudios que cuantifiquen dichas variables a niveles más locales.

Sobre el objetivo No.4 de esta investigación: Establecer la susceptibilidad ante la erosión costera del tramo Ostional-Carrillo de la RN-160 para diferentes elevaciones de la carretera respecto al nivel del mar mediante modelos de ascenso del mar, se concluye:

1. Los escenarios elegidos son representaciones de circunstancias que se pueden dar en un cierto tiempo para el área de estudio. Hay que tener en cuenta que se dejan por fuera variables que podrían contribuir a la elevación del nivel del mar como lo son: aumento por apilamiento de oleaje, por tsunami, por hundimiento del terreno (subsistencia), entre otros. Si se añaden más variables, el aumento del nivel del mar sería mayor, por lo que los escenarios de inundación tienen probabilidad de ser más severos.
2. Las desembocaduras y cauces de los ríos son sitios por donde se facilita la entrada del agua marina en caso de una subida del nivel del mar. Esta afirmación se fundamenta en que, para todos los escenarios de ascenso del nivel del mar elaborados el agua del mar ingresa tierra adentro por los cauces de río de manera más fácil y recorre más distancia con respecto a la línea de

costa, esto se puede observar en los mapas obtenidos. Es importante tener en cuenta que, según los escenarios de elevación creados, algunas zonas aledañas a ríos, desembocaduras o quebradas resultan inundadas, por lo que hay que prestar especial atención a los tramos de la carretera que pasen cerca de ríos y quebradas, aún si estos se encuentran a una distancia considerable de la línea de costa, ya que son sitios por donde se le facilitaría al agua ingresar.

3. La simulación de la elevación del nivel del mar mediante *software Global Mapper* demuestra que en un periodo de tiempo de aproximadamente 40 años (incluso menos tiempo si se evalúan otros factores como subida del mar por tsunami o apilamiento de oleaje, por ejemplo), habrá tramos de la carretera por debajo del nivel de agua del océano, que no se podrán utilizar más, así también tramos con peligro inminente de destrucción por erosión costera, por lo que parte de esta debería de ser relocalizada ante dicha situación.
4. Se establece que, durante los próximos 90 años, si consideramos únicamente la subida del nivel del mar debido a la variable de calentamiento global, los daños en la carretera no son catastróficos. La carretera se verá afectada de manera severa, únicamente, en playa Carrillo y se anticipan daños también en unos cuantos sitios puntuales; por lo que será necesario una combinación de variables, es decir no solo ascenso del nivel del mar por calentamiento global, para tener un escenario con consecuencias más severas para la RN-160 en el segmento entre playa Carrillo y Ostional.
5. Es importante considerar que los escenarios generados son referidos al nivel medio del mar, por lo que muestran la situación en media marea o marea promedio. En el momento en que ocurre la pleamar, el área inundada sería más grande y con alcance mayor tierra adentro, por lo que se puede decir que el modelo creado subestima las áreas que tienen posibilidades de inundación costera bajo ciertas condiciones.

Conclusiones Generales

1. Mediante la metodología desarrolladas se identificaron los sitios en el tramo Carrillo-Ostional de la RN-160 que presentan daños por erosión costera en la actualidad, así también se detectan procesos de erosión costera cercanos a segmentos de la carretera que pueden afectarla en un corto periodo de tiempo. Así mismo, se identifican los lugares en el terreno por donde pasa la RN-160 en la zona de estudio que poseen susceptibilidad ante erosión costera y también los segmentos que se verían impactados ante un eventual ascenso del nivel del mar.
2. Existen tramos de la RN-160 que deberían de tener pronta intervención de parte de las autoridades correspondientes y encargadas del mantenimiento de esta ruta nacional, ya que presentan el peor escenario tomando en cuenta el resultado de las metodologías empleadas. Esto ocurre en los sectores de la RN-160 que pasan por el frente costero de playa Carrillo, Garza y Ostional. Presentan niveles de 4 y 5 según el IE-SC, sus bases se encuentran sobre terrenos categorizados con valores de 4 y 5 según el análisis de Susceptibilidad ante Erosión Costera, además se verían alcanzados por el mar en casi todos los escenarios de elevación del nivel del mar analizados.
3. Por el contrario, existen tramos de la RN-160 que presentan condiciones favorables para la no ocurrencia de la erosión costera. Debido a las condiciones que presentan, se estima que estos sitios no serán impactados a largo plazo. Estos son los tramos de la RN-160 entre Bajo Escondido y Barrigona, además del sector de Punta Guiones. En el frente costero correspondiente a estos tramos de la carretera se presentan como mayoría los niveles 1 y 2 del IE-SC; las bases de la carretera se encuentran sobre terrenos categorizados con valores de 1 y 2 según el análisis de susceptibilidad ante erosión costera; además son sitios donde la inundación costera no alcanza aún en el peor escenario evaluado (2 m debido al ascenso del nivel del mar por calentamiento global, más el aporte por el Fenómeno

del Niño y una marea máxima). Lo anterior se debe a los cerros ubicados en estos frentes costeros, que a pesar de encontrarse muy cerca de la línea de costa, son compuestos por rocas de alta resistencia a la erosión (Formación Curú principalmente) y funcionan como una barrera natural para la carretera.

4. Los niveles del IE-SC y los criterios para definirlos podrían verse modificados debido a factores que son ajenos a los procesos de erosión costera como: sismos, tsunamis, patrones de erosión comunes a la región estudiada, actividades antrópicas, entre otros. De igual manera la susceptibilidad ante erosión costera puede cambiar si alguno de los parámetros es modificado (por ejemplo, si la tasa de erosión aumenta o disminuye o si se construyen obras de infraestructura que modifiquen la dinámica litoral y a la vez el parámetro de Acción Antropogénica). También los escenarios de elevación ante el nivel del mar se realizan con base en la topografía presente en la actualidad. Por lo tanto, los resultados obtenidos con las metodologías aplicadas se fundamentan en el estado actual de la zona, la geomorfología costera presente en el momento y los datos disponibles al día de realización del estudio. Pero esto puede verse alterado por el tiempo y las circunstancias debido a factores externos.

5. Los daños que pueda sufrir la RN-160 en el tramo Carrillo-Ostional afectarían el transporte y las actividades económicas de muchos poblados rurales y costeros. Todas las poblaciones dentro del área se verían impactadas, así como algunas comunidades que se encuentran fuera del área de estudio debido a que la RN-160 es su principal acceso. Las comunidades fuera del área de estudio que se verían impactadas si se dan problemas en la RN-160 son: San Juanillo, Rosario, Santa Teresa, Delicias, Estrada, Camaronal, Islita, entre otras. Las comunidades anteriormente mencionadas y las que se incluyen dentro del área de estudio dependen, económicamente, del turismo, por lo que daños en la carretera repercuten directamente en dicha actividad económica, entonces los hoteles, restaurantes, operadores de tours, etc.

tendrían dificultades para operar y percibirían menos ganancias. El Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional corre el riesgo de quedar incomunicado, puesto que la RN-160 es la principal vía de acceso e incluso la única carretera en algunos sectores como por ejemplo en la comunidad de Ostional.

6. Se identifican cinco puentes en mal estado que deberían ser intervenidos por las autoridades correspondientes a la brevedad posible. Estos son los puentes que se encuentran en el segmento de carretera frente a playa Carrillo y presentan daños como: cimentaciones expuestas, rellenos socavados, pilares erosionados, agrietamiento en el concreto, estructura metálica expuesta y oxidada debido a la acción marina, etc. Lo anterior se debe a que los puentes fueron construidos a escasos metros de la línea de costa y sobre desembocaduras de ríos, las cuales son zonas muy dinámicas y presentan indicios de erosión costera con frecuencia.
7. Queda demostrado con el presente estudio que para tomar la correcta decisión acerca de los sitios en la RN-160 que deben tener en cuenta las autoridades pertinentes en caso de una intervención o relocalización es necesario conocer tanto los procesos de erosión que ocurren actualmente como los procesos que pueden ocurrir a mediano o largo plazo, para así no cometer errores como reparar tramos que se encuentran en zonas con alta susceptibilidad de erosión y más bien relocalizar dichos tramos.
8. El elemento evaluado en el presente estudio es un tramo de la RN-160; sin embargo, la metodología empleada utiliza variables inherentes al terreno y no depende de las condiciones de la carretera para la obtención de resultados. Lo anterior implica que, sea posible emplear la misma metodología para evaluar la susceptibilidad ante erosión de la infraestructura costera como: Escuelas, centros de salud, acueductos, aeropuertos, hoteles, restaurantes, casas de veraneo, etc.

9. Es posible que a partir de los escenarios de elevación del nivel del mar generados para este estudio se puede generar una nueva línea de costa y predecir los lugares susceptibles ante erosión costera en el futuro; algunos parámetros como: elevación topográfica y distancia a la línea de costa cambiarían con una línea de costa ubicada algunos metros tierra adentro.

6.3 Recomendaciones

- 1) Para quienes vayan a realizar un trabajo similar al del presente estudio, se recomienda tomar la mayor cantidad de fotos posible durante el trabajo de campo del IE-SC; esto permitirá realizar comparaciones del estado de los procesos erosivos en la zona de estudio y detectar variaciones debidas a tormentas, fuertes lluvias o dinámica litoral común. Así también detectar procesos erosivos que no se detectan con una sola observación.
- 2) Mantener las muestras, tanto del Análisis Granulométrico como del Ensayo Los Ángeles, siempre con su debido código y etiqueta, puesto que están en el laboratorio y tienen que pasar una serie de pruebas, deben ser movidas de un lugar a otro, cambiadas de recipiente o introducidas en un horno y en ocasiones deben ser separadas en fracciones; por esta razón se deben mantener siempre identificadas, para así evitar confusiones o pérdidas de muestra.
- 3) Una de las dificultades que existen al evaluar zonas costeras es su forma alargada, motivo por el que resulta difícil su representación en mapas rectangulares. Dos soluciones que se recomiendan ante este problema son:
 - Reducir la extensión del área de estudio, a manera de enfocarse en un sitio muy específico que se pueda representar en un mapa rectangular.

- Sectorizar la zona de estudio en varios mapas de zonas contiguas entre sí para que no se reduzca la extensión del área estudiada.

Para el presente proyecto se optó por la opción de sectorizar la zona de estudio en varios mapas.

- 4) Con este estudio se desea incentivar la realización de investigaciones más detalladas acerca de variables oceanográficas. En este caso, se utilizan parámetros de origen oceanográfico como: Altura Máxima de Ola y Rango Máximo de Mareas. Para el presente proyecto se utilizaron valores a nivel regional puesto que esos son los que se encuentran disponibles para la zona de estudio. En caso de que valores de mayor resolución se encuentren disponibles la precisión de los mapas de susceptibilidad mejoraría y probablemente los resultados varíen en ciertos puntos.
- 5) Realizar otros estudios utilizando la misma metodología, pero en diferentes sitios con características distintas. De manera que se pueda comparar la influencia de las variables utilizadas, por ejemplo, aplicar la metodología para identificar zonas susceptibles ante erosión costera en lugares con tipos de roca distintos. Esto contribuye a la mejora y el desarrollo de la metodología.
- 6) Simular mayor cantidad de escenarios de elevación del nivel del mar utilizando más variables que puedan aportar a la subida del nivel del agua. Esto porque es probable que haya escenarios que causen impactos en la RN-160 mayores o diferentes de los mostrados en este estudio, y que por logística del proyecto se dejaron por fuera.
- 7) Utilizar los datos disponibles para el área de estudio, como la base topográfica *LiDAR*, mapas geológicos, datos de cobertura del terreno, etc., así como la información obtenida mediante el presente estudio, como: geomorfología, mapas de susceptibilidad ante erosión, etc., para evaluar la

erosión costera sobre la infraestructura turística y las comunidades rurales, las cuales se presentan a lo largo de toda el área de estudio.

- 8) Los responsables del mantenimiento de la RN-160 deberán monitorear las actividades antrópicas que puedan ocasionar cambios en la geomorfología costera y que puedan derivar en variaciones del IE-SC y de los parámetros utilizados en el estudio de Susceptibilidad ante Erosión Costera. Creación de nueva infraestructura como: puertos, obras de protección costera, represas hidroeléctricas, hoteles, alcantarillas que caen directo al océano, etc. tienen el potencial para modificar la geomorfología de un lugar determinado y la dinámica litoral de una línea de costa dada. Esto es un aspecto importante de considerar para un estudio de este tipo.

CAPÍTULO VII

7.1 Referencias

ALVES, F.L., COELHO, C., COELHO, C.D. & PINTO, P., 2011: Modelling Coastal Vulnerabilities – Tool for Decision Support System at Inter-municipality Level. 966-970.

AMBIENTICO, 2014: Cambio Climático, ecosistemas y economía costera en Costa Rica. Revista Mensual sobre la Actualidad Ambiental No. 246. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 44 págs.

ANDRADE, J. M., 1996: Análisis de la vulnerabilidad de la zona costera ante el ascenso del nivel del mar por un cambio climático global. Costa del Pacífico de Costa Rica. 34 págs. Proyecto Centroamericano sobre Cambio Climático-Comité Regional de Recursos Hidráulicos [Informe final].

ASTORGA, A., 1987: El Cretácico Superior y el Paleógeno de la vertiente Pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: Origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas con el margen convergente de Centroamérica. 250 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis de Licenciatura].

ASTORGA, A., FERNÁNDEZ, J.A., BARBOZA, G., CAMPOS, L., OBANDO, J., AGUILAR, A., & OBANDO, L.G., 1989: Cuencas sedimentarias de Costa Rica: Evolución Cretácico Superior-Cenozoica y Potencial de hidrocarburos. Circumpacific Council. San José, Costa Rica.

BANDINI-MAEDER, A., FLORES, K., BAUMGARTNER, P., JACKETT, S. & DENYER, P., 2009: Late Cretaceous and Paleogene Radiolaria from the Nicoya Peninsula, Costa Rica: a tectonostratigraphic application. *Stratigraphy*. 5(1): 3-21.

BARRANTES, G., VALVERDE, J., PIEDRA, L., QUESADA-ROMÁN, A., CASTILLO, M., SANDOVAL, L. F. & AROZARENA, I., 2017: Cambios en la línea de costa en playa Cieneguita, Limón, Costa Rica. 17^o Congreso Latino-Americano de Ciências do Mar (COLACMAR 2017).

BAUMGARTNER, P. O., MORA, C.R., BUTTERLIN, J.J., SIGAL, J., GLACON, G., AZEMA, J. & BOURGOIS, J., 1984: Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del Litoral Pacífico de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 1, 57-136.

BAUMGARTNER-MORA, C., BAUMGARTNER P. O. & TSCHUDIN, P., 2007: Late Oligocene larger foraminifera from Nosara (Nicoya Península, Costa Rica) and inward (Carriacou, Lesser Antilles), calibrated by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope stratigraphy. *Revista Geológica de América Central*, 38, 33-52.

BEDIA, J., 2004: Creación de un modelo digital de elevación para la predicción de futuros escenarios de inundación en el estuario del Río Loughor (Sur de Gales). <http://www.joaquinbedia.es/MDT.htm/>
Wolverhampton University, School of Applied Sciences, Reino Unido [Proyecto de graduación de bachillerato (honours)].

BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013: Análisis de vulnerabilidad de las zonas oceánicas y marino-costeras de Costa Rica frente al cambio climático. San José, Costa Rica. 103 págs.

CALVO, C., 1987: Las calizas neríticas de la vertiente Pacífica del norte de Costa Rica y sur de Nicaragua: Épocas y sistemas, asociados con la apertura y evolución del margen convergente de la América Central Meridional. 165 págs Universidad de Costa Rica, San José [Tesis de Licenciatura].

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), 2011: Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática. En conjunto con IH-UC (INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA - España). Santiago de Chile.

CIFUENTES-OSSA, M. A., ROSERO-HENAO, L. V., & JOSEPHRAJ-SELVARAJ, J., 2017: Detección de cambios de la línea costera al norte del distrito de Buenaventura mediante el uso de sensores remotos. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. 46(1), 137-152.

CIH (Centro de Investigaciones en Hidráulica), 2001: El incremento del nivel medio del mar. Causas y efectos sobre el hombre y el medio ambiente, en Ing. Hidráulica y Ambiental, No. 3, XXII. Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). La Habana, Cuba. [Informe Académico].

COELHO, C., D'ALBUQUERQUE, M. & VELOSO-GOMES, F., 2006: Aplicação de uma Classificação de Vulnerabilidades às Zonas Costeiras do Noroeste Português. 12 págs.

CUBIT, J., DE YEE, G.B., ROMÁN, A., BATISTA, V., 2011: El valor de los manglares y arrecifes en la costa de Colón, en Agonía de la naturaleza: ensayos sobre el costo ambiental del desarrollo panameño. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panama. 48 págs.

DAS, B., 2001: Fundamentos de ingeniería geotécnica. (I. Bernal Carreño, Traducción) Edit. Thomson Learning. Distrito Federal, México.

DAWES, C., 1986: Botánica Marina. Edit. Limusa. Distrito Federal. 673 págs.

DENGO, G., 1962: Estudio Geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. Instituto geográfico Nacional. 112 págs.

DENYER, P. & GAZEL, E., 2009: The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin, tectonics and relations. *Journal of South American Earth Sciences*. 28, 429-442.

DENYER, P. & BAUMGARTNER, P., 2006: Emplacement of Jurassic-Lower Cretaceous radiolarites of the Nicoya Complex (Costa Rica). *Geologica acta: an international earth science journal*, Vol. 4, Nº 1-2. ISSN 1695-6133. 4, 203-218.

DENYER, P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2014: Cartografía Geológica de La Península de Nicoya. Universidad de Costa Rica, San José.

ESPINACE, R. H., 1979: Laboratorio de mecánica de suelos. Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 140 págs.

EUROSION, 2005: Vivir con la erosión costera en Europa, Sedimentos y espacio para la sostenibilidad. Comisión Europea. ISBN 92-894-9918-4. 40 págs.

FHWA (Federal Highway Administration), 2014: Highways in the Coastal Environment: Assessing Extreme Events. Hydraulic Engineering Circular No. 25 – Volume 2. U.S. Department of Transportation.

FITTON, J. M., HANSOM, J. D. & RENNIE, A. F., 2016: A national coastal erosion susceptibility model for Scotland. Ocean and Coastal Management. 132 págs. 80-89. (doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.08.018).

FLORES, K., 2003: Propuesta tectonoestratigráfica de la región septentrional del Golfo de Nicoya, Costa Rica. 176 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Licenciatura].

FLORES, K., DENYER, P. & AGUILAR, T., 2003: Nueva propuesta estratigráfica: Geología de las hojas Matambú y Talolinga, Guanacaste, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. 28, 131-138.

FORBES, D. L., TAYLOR, R.B., SOLOMON, S.M., CRAYMER M., MANSON, G.K., DYKE, A.S. & HODGSON D.A., 2003: Crustal motion, climate change and coastal morphodynamics in the western Canadian Arctic. Geological Survey of Canada, Dartmouth.

GONZALEZ DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C.; 2004: Ingeniería Geológica. Edit. Pearson/Prentice Hall. Madrid, España. 744 págs.

GORNITZ, V.M., WHITE, T.W. & CUSHMAN, R.M., 1991: Vulnerability of the U.S. to future sea-level rise. In Proceedings of Seventh Symposium on Coastal and Ocean Management. Long Beach, CA, U.S.A. 2354-2368.

GORNITZ, V., 1991: Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeografía, Palaeoclimatología y Palaeoecología*. 89, 379-398, doi:10.1016/0031-0182(91)90173-O.

GORNITZ, V. M., DANIELS, R. C., WHITE, T. W., & BIRDWELL, K. R., 1994: The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 12*. 327-338.

GUTIÉRREZ, M., 2008: Geomorfología. Edit. Pearson/Prentice Hall, Madrid, España. 898 págs.

GUZMAN, W., POSADA B.O., GUZMÁN G. & MORALES D., 2008: Programa Nacional para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia. PNIEC: Plan de Acción 2009-2019. INVEMAR. 72 págs.

HEDGE, A.V. & REJU, V.R., 2007: Development of coastal vulnerability index for Mangalore Coast, India. J. Coast. Res. 235 págs. 1106e1111.
<http://dx.doi.org/10.2112/04-0259.1>.

HENAINE, M., 2010: Diseño y Construcción de Máquina los Ángeles. Universidad de las Américas, Puebla, México [Tesis Licenciatura].

HOERNLE, K., HAUFF, F. & VAN DEN BOGAARD, P., 2004: 70 m.y. history (139–69 Ma) for the Caribbean large igneous province. Geology. 32, 697-700.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 2001: Los glaciares colombianos, expresión del cambio climático global. Bogotá, Colombia.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional), 2008: Clima, Variabilidad Y Cambio Climático En Costa Rica: 75.

http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Evaluación del Grupo de Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 114 págs.

KAMPHUIS, J.W., 2000: Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering- Volume 16. World Scientific. New Jersey. 437 págs.

LINKIMER, L., ARROYO, I., MORA, M., VARGAS, A. SOTO, G.J., BARQUERO, R., ROJAS, W. TAYLOR, W. & TAYLOR, M., 2013: El Terremoto de Sámara del 5 de setiembre del 2012. 134 págs. Red Sismológica Nacional [Informe interno].

LIZANO, O.G., 1997: Las Mareas Extraordinarias de 1997 en la Costa del Pacífico de Costa Rica. Tópicos Meteorología y Oceanografía. 4 (2), 169-179.

LIZANO, O.G., 2006: Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. Ciencia y Tecnología. 24, 51-64.

LIZANO, O.G., 2007: Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. Ciencia y Tecnología. 25, 43-56.

LIZANO, O. G., 2013: Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales. 6-27.

LIZANO, O. G., 2014: Algunos impactos costeros en Costa Rica debido al calentamiento global. Revista Ambientico No. 246, Artículo 4. 23-28.

LIZANO, M.A. & LIZANO, O.G., 2010: Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. InterSedes, Universidad de Costa Rica, XI. 21, 215- 229.

LIZANO, O.G. & SALAS, D.M., 2001: Variaciones geomorfológicas de la Isla Damas, Quepos en los últimos 50 años. "Ecosistemas Acuáticos de Costa Rica". Revista Biología Tropical No. 49 (Supl. 2). 171-177.

MAC DONALD, D. F., 1920: Informe final geológico y geográfico de Costa Rica. Revista De Costa Rica No. 2. 28-32, 50-57, 106-111, 139-148.

MCLAUGHLIN, S. & COOPER, J.A.G., 2010: A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? Environmental Hazards No. 9. 233e248. <http://dx.doi.org/10.3763/ehaz.2010.0052>.

MARSHALL, J. & ANDERSON, R., 1995: Quaternary uplift and seismic cycle deformation, Península de Nicoya, Costa Rica. Geological Society of America Bulletin No. 107. 10.1130/0016-7606(1995)107<0463:QUASCD>2.3.CO;2.

MAUL, G.A., 1993: Climatic Change in the Intra-Americas Sea. UNEP. Gran Bretaña. 389 págs.

MITECO (Ministerio de Transición Ecológica), 2017: Directrices sobre actuaciones en playas. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España. 41 págs.

MORA, C.R., 1985: Sedimentología y Geomorfología del Sur de la Península de Nicoya (Provincia de Puntarenas, Costa Rica). 148 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Licenciatura].

MORA, F.D., 2014: Políticas de adaptación al cambio climático en zonas costeras alternativas para las comunidades en Costa Rica. Perspectivas-FES Costa Rica.

OROZCO, E. G., 2007: Zonificación Climática de Costa Rica Para La Gestión de Infraestructura Vial. Universidad de Costa Rica, San José [Proyecto de Graduación].

ORTIZ-MALAVASI, E., 2012: Cambios geformológicos en el litoral Caribe y Pacífico de Costa Rica. Caso del Complejo Déltico de Sierpe. Instituto Tecnológico de Costa Rica-Editorial Tecnológica de Costa Rica.

ORTIZ-MALAVASI, E., 2014: Atlas digital de Costa Rica 2008 - TEC (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA) [DVD-ROM].

PHILANDER, G. S., 1990: El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, Inc. U.S.A.

PNUMA, 2007: Informe anual del PNUMA. Nairobi, Kenya. 120 págs.

POSADA, B.O. & HENAO, W., 2008: Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13. Santa Marta, Colombia. 200 págs.

RIVIER, F., 1983: Síntesis Geológica y Mapa Geológico del Area del Bajo Tempisque Guanacaste, Costa Rica. Instituto Geográfico de Costa Rica [Informe semestral]. 7–30.

ROBASZYNSKI, F. & CARON, M., 1995: Foraminifères planctoniques du Crétacé: commentaires de la zonation Europe-Méditerranée. Bulletin de la Société Géologique de France. 166(6): 681-692.

RUIZ, P.; GARRO, J.F. & SOTO, G., 2014: El Uso de Imágenes Lidar En Costa Rica: Casos de Estudio Aplicados En Geología, Ingeniería, Y Arqueología. Revista Geológica de América Central. 51(1), 7–31.

SHAW, J., TAYLOR, R. B., FORBES, D., RUIZ, M. H. & SOLOMON, S., 1998: The Sensitivity of the Coasts of Canada to Sea Level Rise. 10.4095/210075.

SINTON, C. W., DUNCAN, R. A. & DENYER, P., 1997: Nicoya Peninsula: A single suite of Caribbean oceanic plateau magmas. Journal of Geophysical Research. 102(B7): 15507-15520.

SPALDING, M., MCLVOR, A., TONNEJCK, F.H., TOL, S. & VAN EIJK, P., 2014: Mangroves for coastal defense. Guidelines for coastal managers & policy makers. Published by Wetlands International and The Nature Conservancy. 42 págs.

SPRECHMANN, P., 1984: Manual de Geología de Costa Rica, I: Estratigrafía. Edit. Universidad de Costa Rica, San José. 320 págs.

SUÁREZ, J., 2001: Control de erosión en zonas tropicales. Primera Edición. Edit. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, Capítulo 4. 135-163.

TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l'actual en Amerique Centrale: L' exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites. 335 págs. Universite Pierre et Marie Curie [Tesis PhD].

THIELER, E.R., & HAMMAR-KLOSE, E.S., 1999: National Assessment of Coastal Vulnerability to Future Sea Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. 1 pág. U.S. Geological Survey [Open-File Report]. 99-593.
<http://pubs.usgs.gov/of/of99-593/>

VAN ZUIDAM, R.A., 1986: Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers, The Hange. New York. 442 págs.

VOORHIS, A.D., EPIFANIO, C.E., MAURER, D., DINTEL, A.I. & VARGAS, J.A. 1983: Hydrobiologia. 99, 225-237.

WILDBERG, H., 1984: Der Nicoya-Komplex, Costa Rica, Zentralamerika: Magmatismus und Genese eines polygenetischen Ophiolith-Komplexes.-Münster. Forsh. Geol. Paläont. 62, 1-123.

YAMADA, K., NUNN, P. & MIMURA, N., MACHIDA, S. & YAMAMOTO, M., 1995: Methodology for the assessment of vulnerability to sea level rise and climate

change for South Pacific countries. Journal of Global Environmental Engineering. 1, 101-125.

Referencias hemerográficas

AL DÍA, 2012: Fuerte oleaje obligó a desalojar a vecinos de 10 casas en Caldera. Publicado el 5 de julio de 2012. Consultado el 13 de febrero de 2017.

http://www.aldia.cr/ad_ee/2012/julio/05/nacionales3233621.html

BBC MUNDO, 2016: Las islas del Pacífico que desaparecen bajo las aguas. Publicado el 10 de mayo de 2016. Consultado el 15 de enero de 2017.

http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/05/160510_ciencia_islas_salomon_desa_parecido_gtg

ECOWATCH, 2018: Which Countries Have Lost the Most to Sea Level Rise?. Publicado el 10 de setiembre de 2018. Consultado el 22 de noviembre de 2018.

<https://www.ecowatch.com/sea-level-rise-countries-vulnerable-2602886224.html>

EL TIEMPO, 2018: El nivel del mar podría aumentar un metro al finalizar el siglo. Publicado el 11 de octubre 2018. Consultado el 18 de noviembre de 2018.

<https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/efectos-del-cambio-climatico-en-el-aumento-del-nivel-de-mar-280212>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2013: Un aumento en el nivel del mar puede tener efectos catastróficos para el

Caribe. Publicado el 11 de noviembre de 2013. Consultado el 28 de octubre de 2018.

<http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/512970/>

LA NACIÓN, 2016a: Mar amenaza escuela, hotel y dos casas en Esterillos. Publicado el 23 de setiembre de 2016. Consultado el 21 de enero de 2017.

http://www.nacion.com/nacional/Mar-amenaza-escuela-casas-Esterillos_0_1587041299.html

LA NACIÓN, 2016b: Playas del Pacífico están en riesgo por alcantarillas e incremento del nivel del mar. Publicado el 13 de octubre de 2016. Consultado el 15 de octubre de 2018.

<https://www.nacion.com/el-pais/servicios/playas-del-pacifico-estan-en-riesgo-por-alcantarillas-e-incremento-del-nivel-del-mar/ATJSDHYOZJF7VKWWSFK7TVOMYY/story/>

LA NACIÓN, 2017: Tormenta Nate deja ocho muertos, 500.000 personas sin agua, 7.200 en albergues y 24 vías cerradas. Publicado el 5 de octubre de 2017. Consultado el 8 de agosto de 2018.

<https://www.nacion.com/sucesos/desastres/tormenta-nate-deja-ocho-muertos-500-000-personas-sin-agua-7-200-en-albergues-y-24-vias-cerradas/ME4E6OJMAJH6LB4ZMT7KA5U7WQ/story/>

LA PRENSA LIBRE, 2018: Lluvias dejan cifras devastadoras. Publicado el 18 de octubre de 2018. Consultado el 13 de setiembre de 2018.

<http://www.laprensalibre.cr/Noticias/detalle/141712/1517/lluvias-dejan-cifras-debastadoras>

LA VOZ DE GUANACASTE, 2017: Guanacaste: la provincia más afectada por la depresión tropical. Publicado el 5 de octubre de 2017. Consultado el 8 de agosto de 2018.

<https://vozdeguanacaste.com/guanacaste-la-provincia-mas-afectada-por-la-depresion-tropical/>

MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), 2018: Trabajos de mejoramiento en ruta 160 entre Garza y Nosara con 30% de avance. Publicado el 1 de febrero de 2018. Consultado el 16 de julio de 2018.

https://www.mopt.go.cr/wps/portal/Home/noticias!/ut/p/z0/fczLDoIwFATQX9GFy-beUoqwJD4lStS4wm5MxRtSxRax8fH3mhijK3czyZwBBSUoq6-m1t44q5tX36hom68y5PMQiyxajzFNikJOlyjCXMAM1P_B68EczmeVgmp1TWxPF1NbKFeu87rpTe6eOusGuHDeVEaP3KltyOtfVznr6e6hbN-GPsa-zeWbAuTxAHnCCStBrApizkIxIcYJecAiEcbIJdFQSmiPave4pf0nFM9aCA!!/

PARQUES NACIONALES DE ESPAÑA, 2018: Marisma Doñana. Publicado el 12 de julio de 2018. Consultado el 18 de noviembre de 2018.

<https://www.parquesnacionalesdespana.org/marismas-de-donana/>

SEMANARIO UNIVERSIDAD, 2016: Calentamiento global dispara erosión en playas de Limón. Publicado el 20 de enero de 2016. Consultado el 26 de setiembre de 2018.

<https://semanariouniversidad.com/pais/calentamiento-global-dispara-erosion-en-playas-de-limon/>

Leyes

LEY No. 6919, Ley de Conservación de la Fauna Silvestre. República de Costa Rica, 1983.

LEY No. 8114, Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias. República de Costa Rica, 9 de julio de 2001.

LEY No. 4786, Reforma Ley de Creación del Ministerio de Transportes, República de Costa Rica, 1971.

7.2 Anexos

- 1- Informe del laboratorio de granulometría
- 2- Norma ASTM para la prueba de Abrasión los Ángeles
- 3- Informe de mediciones topográficas para los escenarios de ascenso del nivel del mar

Anexo 1: Informe del laboratorio de granulometría



Informe de Ensayo

RC-80 v.09 (Sistema de Gestión de Calidad, LanammeUCR. Norma INTE ISO/IEC 17025:2005)

ST-537-18

1. Información del cliente:

Nombre: Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional / Geól. Paulo Ruíz Cubillo

Proyecto: Tramo Ostional-Carrillo

Domicilio: LanammeUCR, San Pedro de Montes de Oca, San José.

2. Método de ensayo:

IT-GC-05 (ASTM D 4318) (*)

Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo.

(ASTM D 6913) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices).

IT-GC-01 (ASTM D 422) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (vía húmeda).

IT-GC-04 (ASTM D 854) (*)

Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua.

IT-GC-02 (ASTM D 2216) (*).

Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas.

ASTM D-1140 (*)

Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm (Nº 200) en suelos mediante lavado.

ASTM D 2487 (**)

Práctica estándar para clasificación de suelos con propósitos ingenieriles (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)



(*) Ensayo acreditado. Ver alcance en www.eca.or.cr.

(**) Ensayo no acreditado.

3. Información de las muestras o especímenes de ensayo:

No. de identificación:

Descripción:

M-896-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #1. Código: TE-S-25/4/18-01. Ubicación: Lat N 10,012316°, Long W 85,72033°. Playa: Ostional/Desembocadura.
M-897-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #2. Código: TE-S-25/4/18-02. Ubicación: Lat N 9,997005°, Long W 85,70422°. Playa: Ostional.
M-898-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #3. Código: TE-S-25/4/18-03. Ubicación: Lat N 9,997522°, Long W 85,703687°. Playa: Ostional/Llanura.
M-899-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #4. Código: TE-S-26/4/18-01. Ubicación: Lat N 9,866791°, Long W 85,482377°. Playa: Carrillo/Desembocadura.
M-900-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #5. Código: TE-S-26/4/18-02. Ubicación: Lat N 9,880975°, Long W 85,520873°. Playa: Sámará.
M-901-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #6. Código: TE-S-26/4/18-03. Ubicación: Lat N 9,877927°, Long W 85,533809°. Playa: Sámará/Llanura.
M-902-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #7. Código: TE-S-26/4/18-04. Ubicación: Lat N 9,879902°, Long W 85,567672°. Playa: Buena Vista/Desembocadura.
M-903-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #8. Código: TE-S-26/4/18-05. Ubicación: Lat N 9,884838°, Long W 85,5668°. Playa: Buena Vista/Planicie.
M-904-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #9. Código: TE-S-26/4/18-06. Ubicación: Lat N 9,882728°, Long W 85,57654°. Playa: Barrigona.
M-905-18	1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #10. Código: TE-S-26/4/18-07. Ubicación: Lat N 9,912843°, Long W 85,636536°. Playa: Garza/Planicie.



No. de informe: I-0777-18

- M-906-18 1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #11. Código: TE-S-26/4/18-08. Ubicación: Lat N 9,909641°, Long W 85,642316°. Playa: Garza.
- M-907-18 1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #12. Código: TE-S-26/4/18-09. Ubicación: Lat N 9,921836°, Long W 85,660968°. Playa: Guiones.
- M-908-18 1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #13. Código: TE-S-26/4/18-10. Ubicación: Lat N 9,922571°, Long W 85,66027°. Playa: Guiones/Planicie.
- M-909-18 1 Bolsa con suelo, identificada como: Muestra #14. Código: TE-S-26/4/18-11. Ubicación: Lat N 9,951272°, Long W 85,674378°. Playa: Pelada.

Aportada por:

Geól. Paulo Ruíz Cubillo

Fecha de recepción:

2018/05/03

Fecha de realización del ensayo:

2018/05/07-2018/06/14

4. Información del muestreo:

Fecha de muestreo:

Muestras: De la M-896-18 a la M-898-18
Fecha de muestreo: 2018/04/25

Muestras: De la M-899-18 a la M-909-18
Fecha de muestreo: 2018/04/26

Ubicación de muestreo:

Muestra: M-896-18
Lugar de muestreo: Playa Ostional/Desembocadura.

Muestra: M-897-18
Lugar de muestreo: Playa Ostional.

Muestra: M-898-18
Lugar de muestreo: Playa Ostional/Llanura.

Muestra: M-899-18
Lugar de muestreo: Playa Carrillo/Desembocadura.

Muestra: M-900-18
Lugar de muestreo: Playa Sámara.

Muestra: M-901-18



No. de informe: I-0777-18

Lugar de muestreo: Playa Sámara/Llanura.

Muestra: M-902-18

Lugar de muestreo: Playa Buena Vista/Desembocadura.

Muestra: M-903-18

Lugar de muestreo: Playa Buena Vista/Planicie.

Muestra: M-904-18

Lugar de muestreo: Playa Barrigona.

Muestra: M-905-18

Lugar de muestreo: Playa Garza/Planicie.

Muestra: M-906-18

Lugar de muestreo: Playa Garza.

Muestra: M-907-18

Lugar de muestreo: Playa Guinoes.

Muestra: M-908-18

Lugar de muestreo: Playa Guiones/Planicie.

Muestra: M-909-18

Lugar de muestreo: Playa Pelada

Procedimiento de muestreo:

Muestreo de agregado realizado por personal técnico de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de acuerdo a la norma ASTM D-75. Personal responsable de la muestra: Geól. Paulo Ruíz Cubillo.

Condiciones ambientales:

No aplica pues en el laboratorio los especímenes se acondicionan.



5. Resultados:

Tabla 1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de las muestras.

MUESTRA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICIDAD
896-18	NP	NP	NP
897-18	NP	NP	NP
898-18	47	32	15
899-18	NP	NP	NP
900-19	NP	NP	NP
901-18	53	33	20
902-18	NP	NP	NP
903-18	46	33	13
904-18	NP	NP	NP
905-18	59	38	21
906-18	NP	NP	NP
907-18	NP	NP	NP
908-18	50	34	16
909-18	NP	NP	NP

Nota:

-NP: Material no plástico.

-La muestra fue acondicionada por el método de preparación en seco.

-El límite líquido se determina según el método A (método multipunto) de la norma ASTM D 4318.

Tabla 2. Contenido de Humedad de los suelos y rocas de las muestras.

MUESTRA No.	HUMEDAD NATURAL (%)
896-18	18,6
897-18	4,3
898-18	22,5
899-18	2,2
900-18	7,6
901-18	15,6
902-18	20,3
903-18	25,4
904-18	7,7
905-18	18,7
906-18	6,7
907-18	26,4
908-18	18,5
909-18	6,6

Tabla 3. Gravedad específica del suelo.



No. de informe: I-0777-18

MUESTRA	MÉTODO	G _T	G _S
896-18	B	2,906	2,904
897-18	B	2,936	2,934
898-18	B	2,705	2,703
899-18	B	2,852	2,850
900-18	B	2,716	2,715
901-18	B	2,613	2,611
902-18	B	2,782	2,781
903-18	B	2,583	2,581
904-18	B	2,858	2,856
905-18	B	2,550	2,549
906-18	B	2,845	2,844
907-18	B	2,784	2,782
908-17	B	2,625	2,623
909-18	B	2,844	2,842

Tabla 4. Resultados del ensayo para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μ m (N° 200) en suelos mediante lavado.

MUESTRA	MASA SECA INICIAL (g)	MATERIAL MAS FINO QUE 75 μ m (%)
896-18	501,0	0,8
897-18	716,8	1,3
898-18	277,3	76,2
899-18	460,6	0,4
900-18	624,5	20,0
901-18	646,0	69,0
902-18	530,8	1,0
903-18	345,0	70,1
904-18	264,0	0,4
905-18	401,6	62,5
906-18	522,2	0,5
907-18	400,8	1,8
908-18	313,9	44,6
909-18	446,5	0,6

Método A: Agua solamente



Tabla 5. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-896-18.

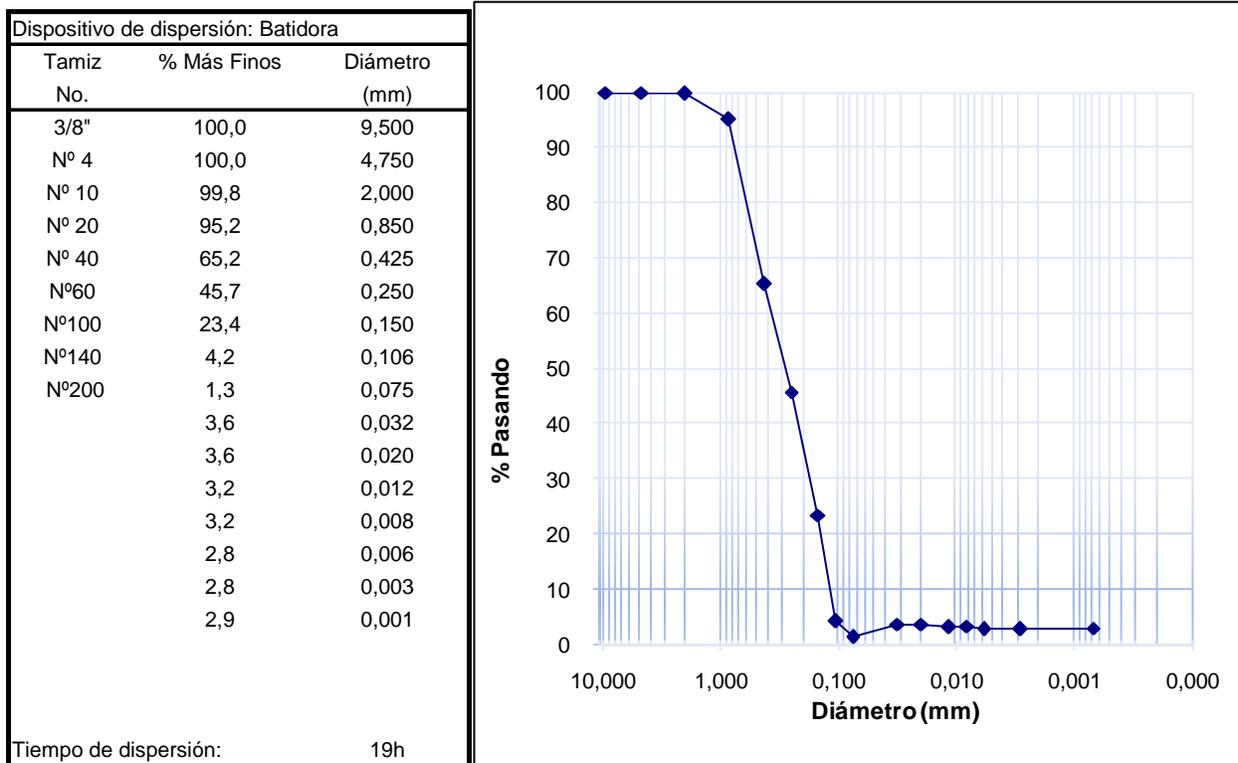


Tabla 6. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-897-18.

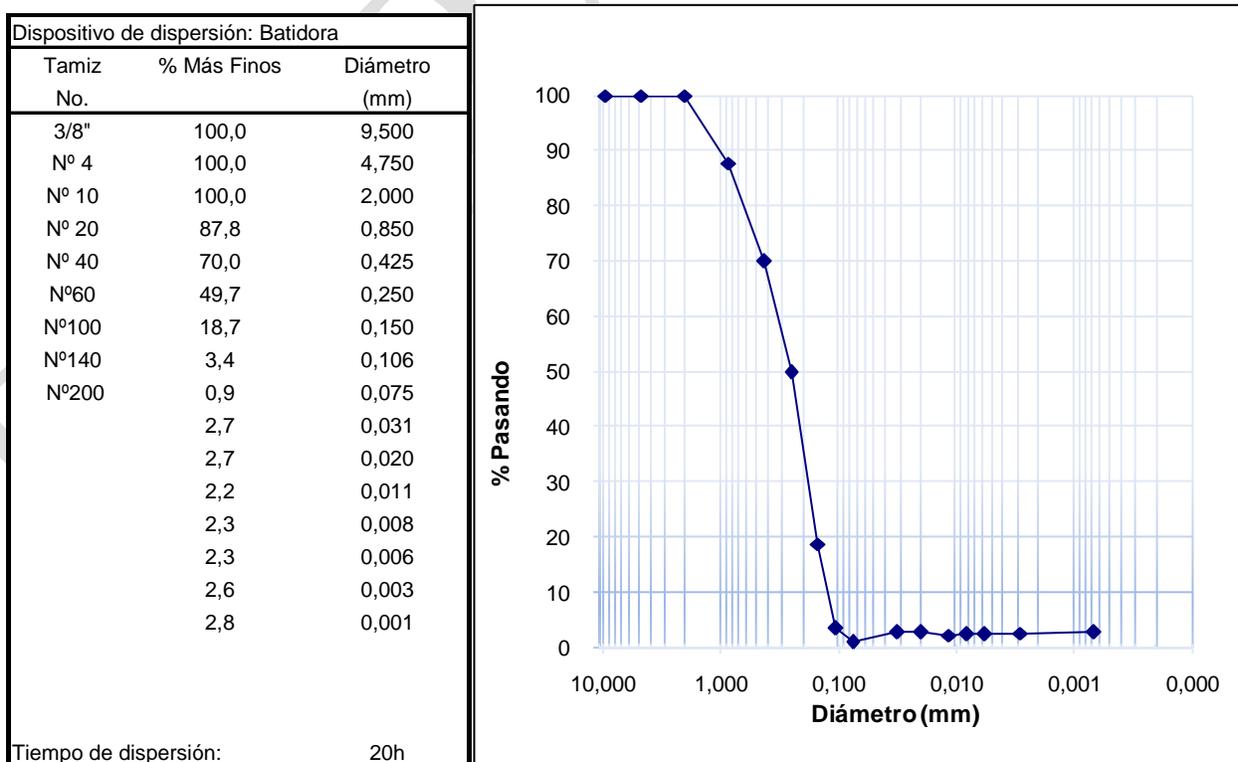


Tabla 7. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-898-18.

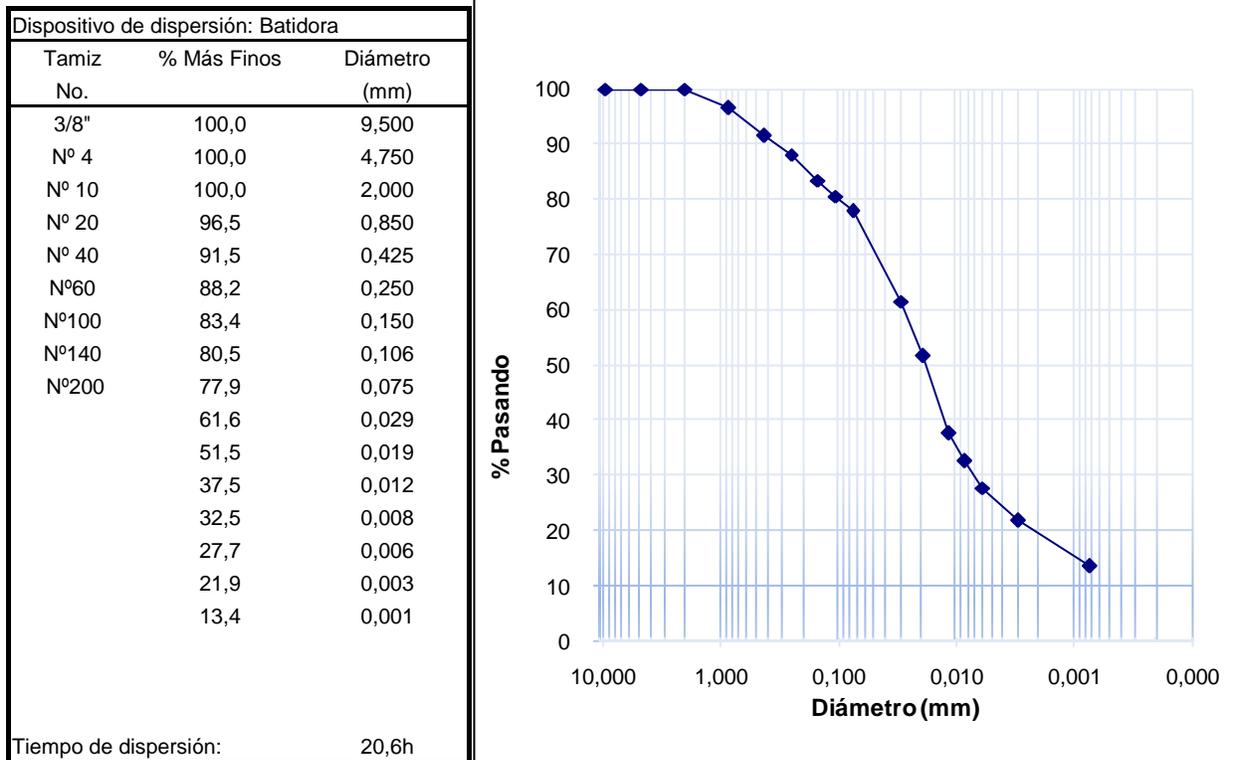


Tabla 8. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-899-18.

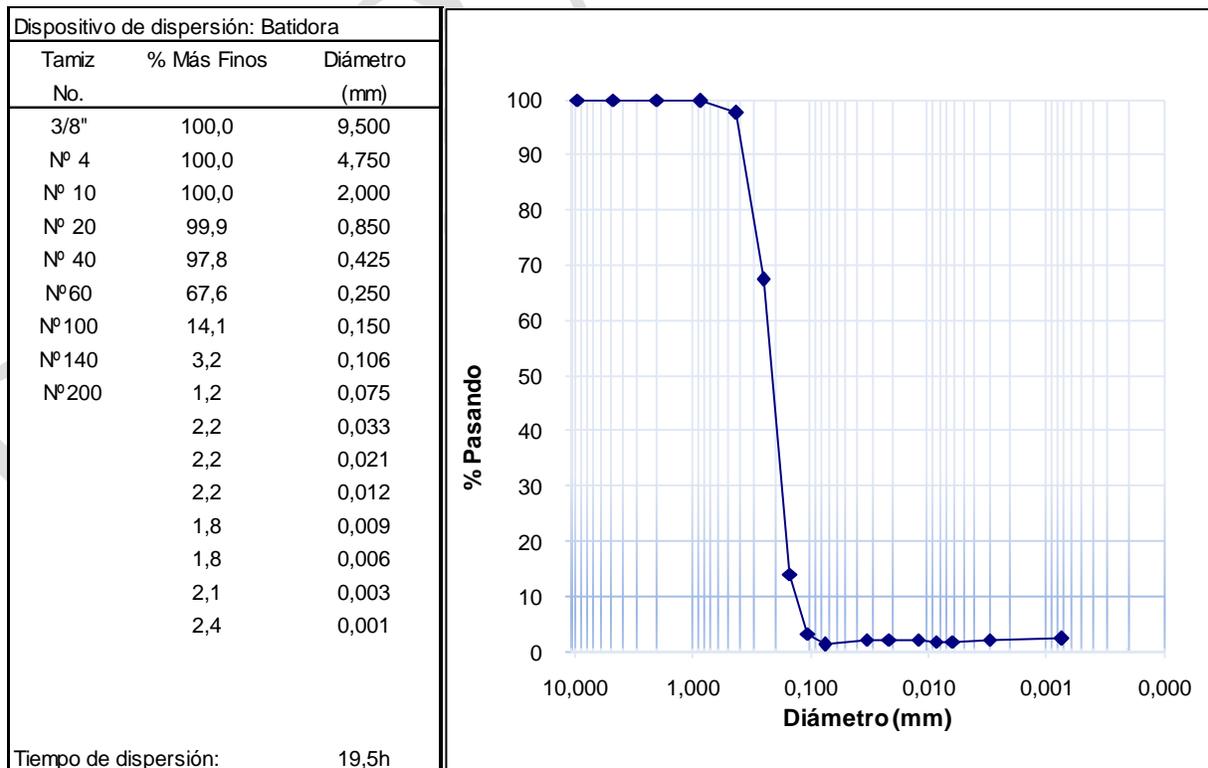




Tabla 9. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-900-18.

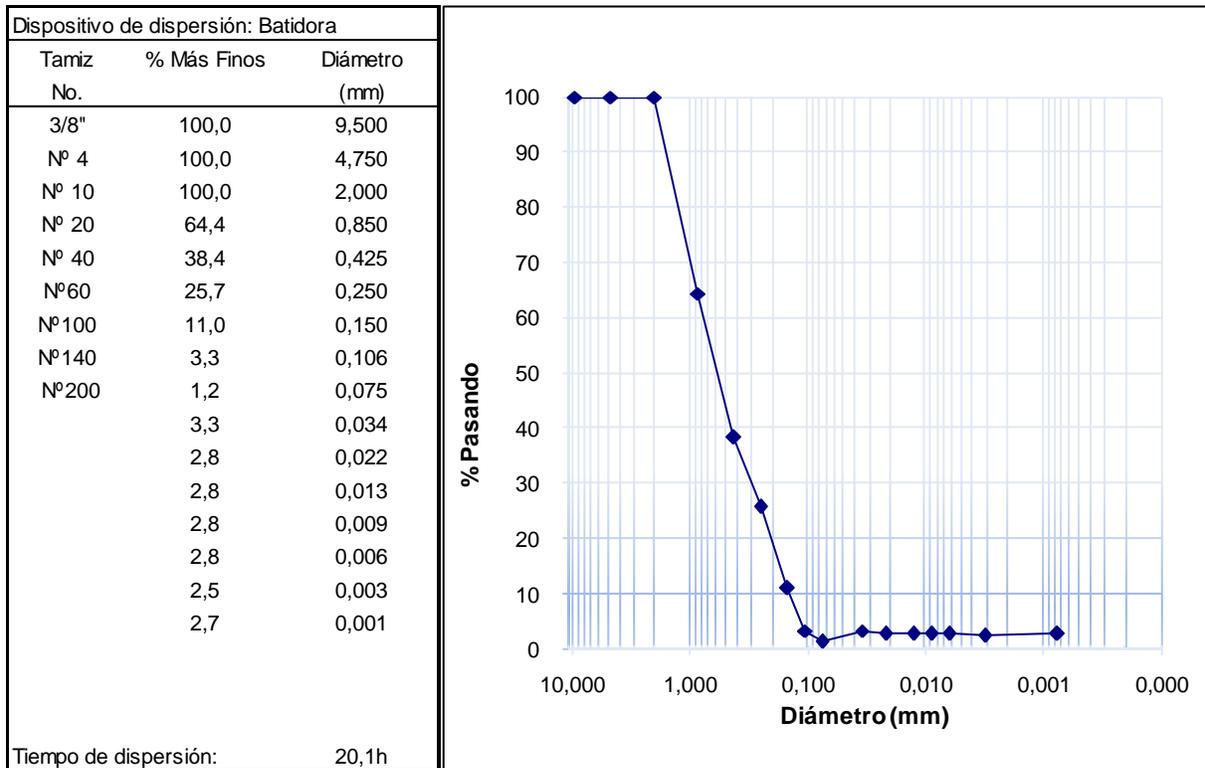


Tabla 10. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-901-18.

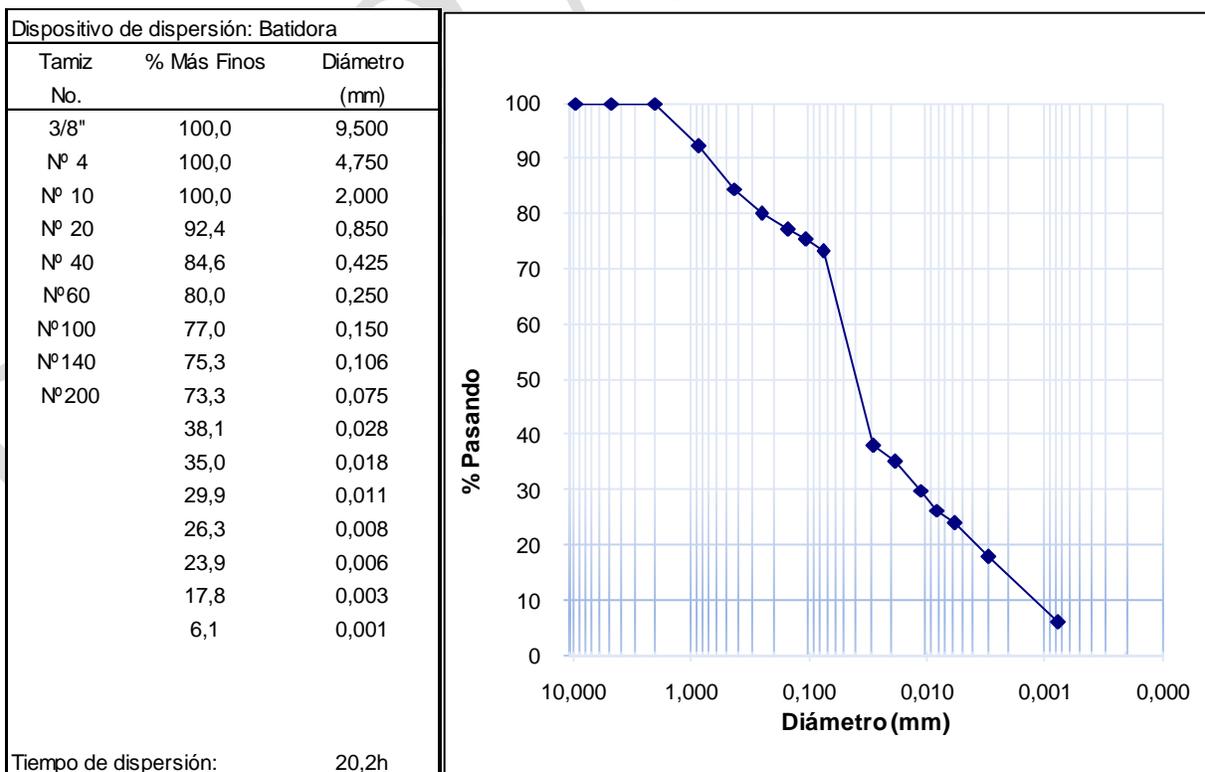


Tabla 11. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-902-18.

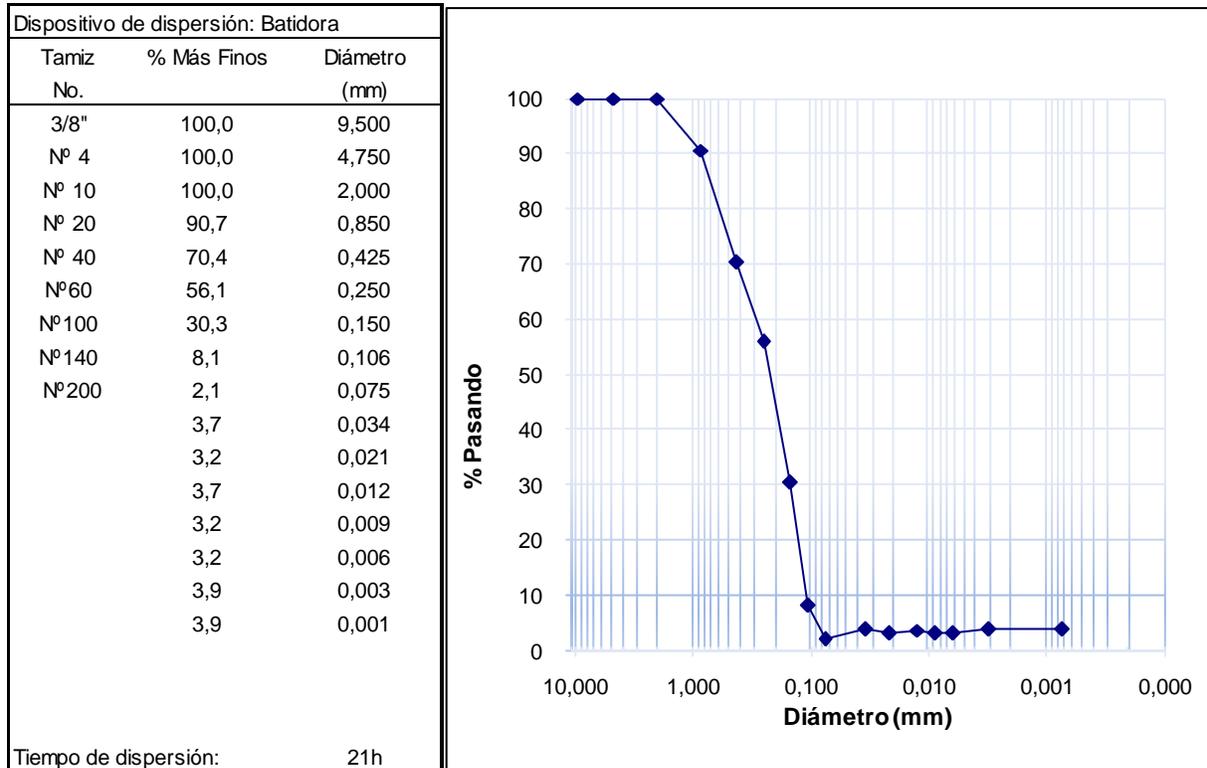


Tabla 12. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-903-18.

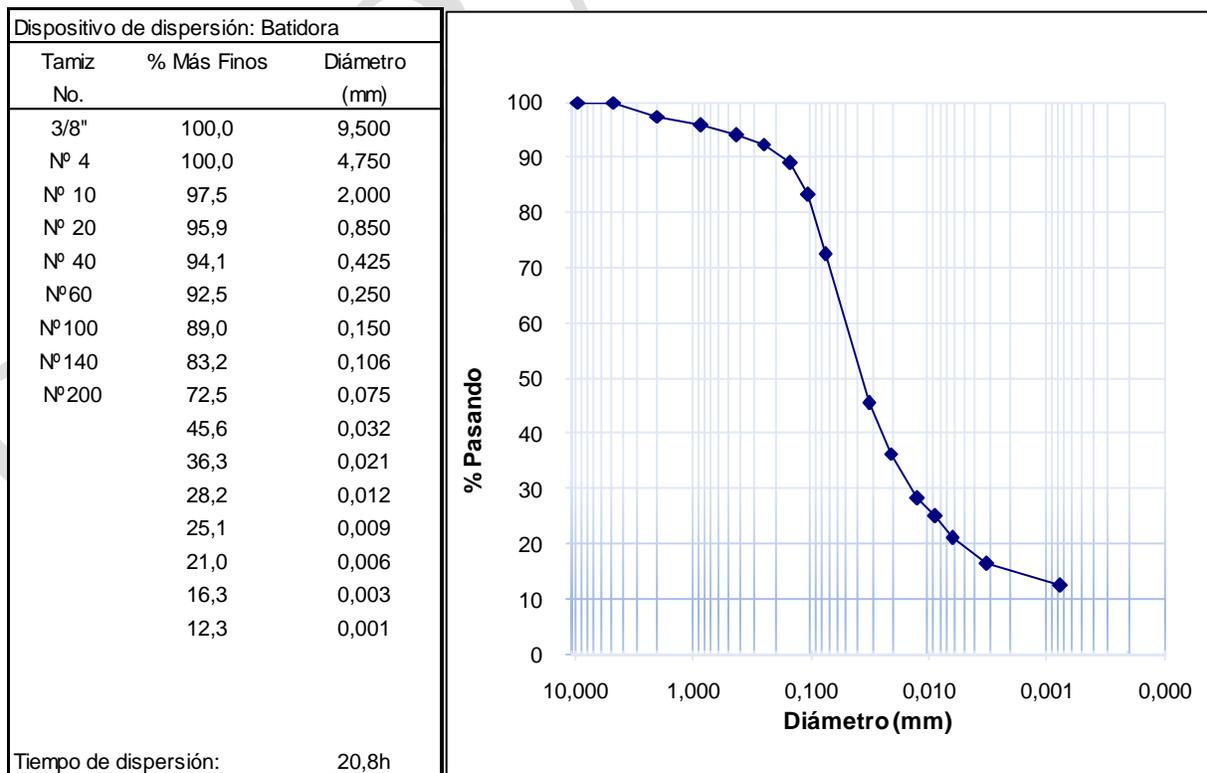


Tabla 13. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-904-18.

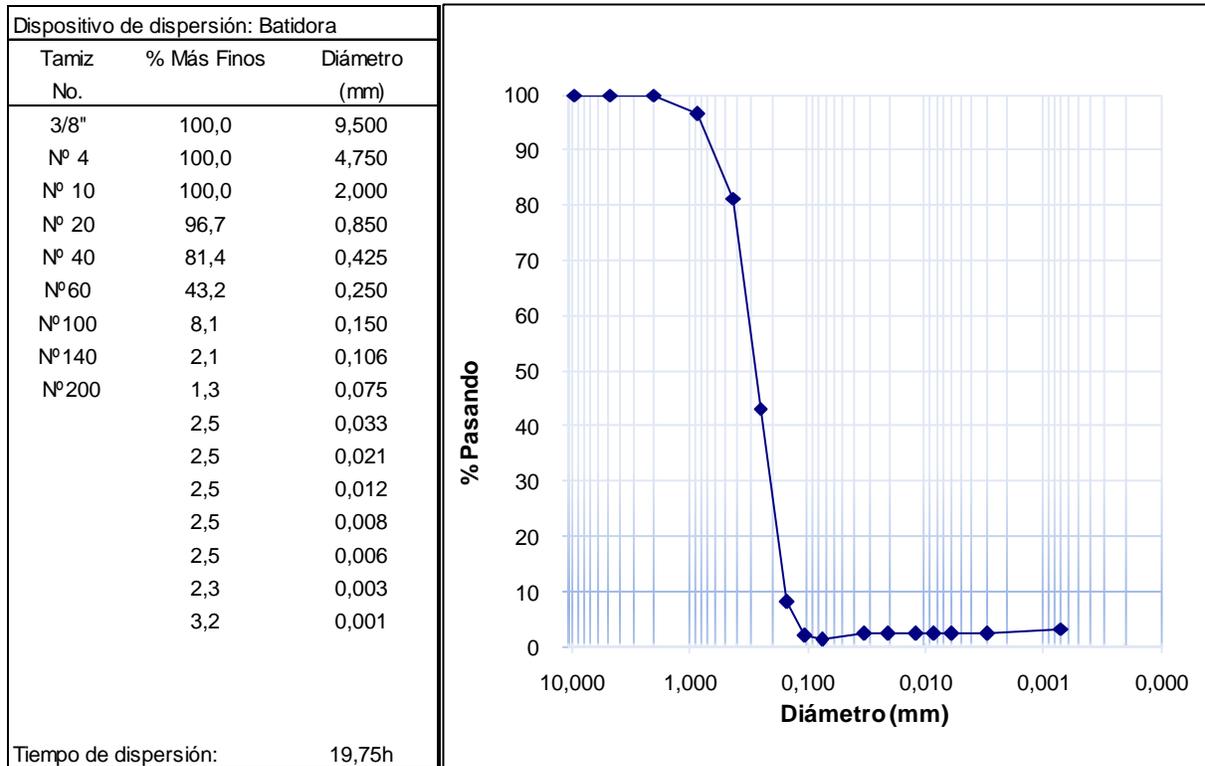


Tabla 14. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-905-18.

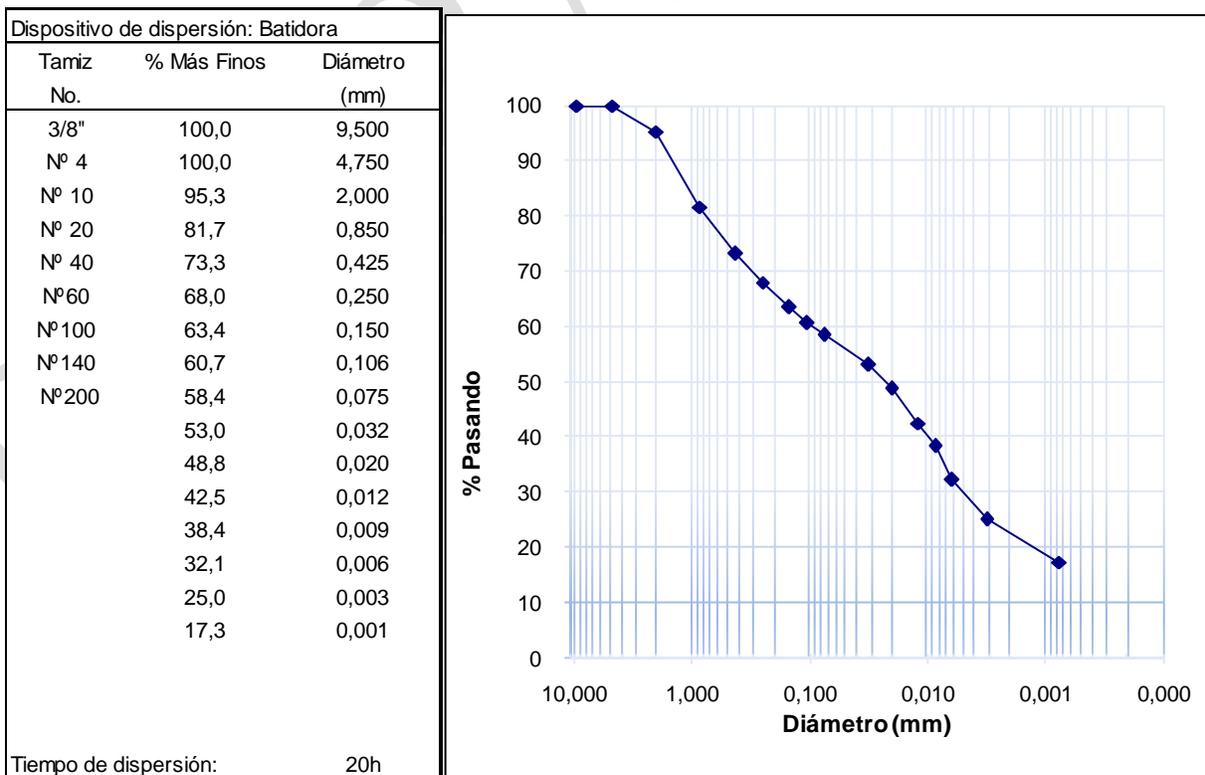




Tabla 15. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-906-18.

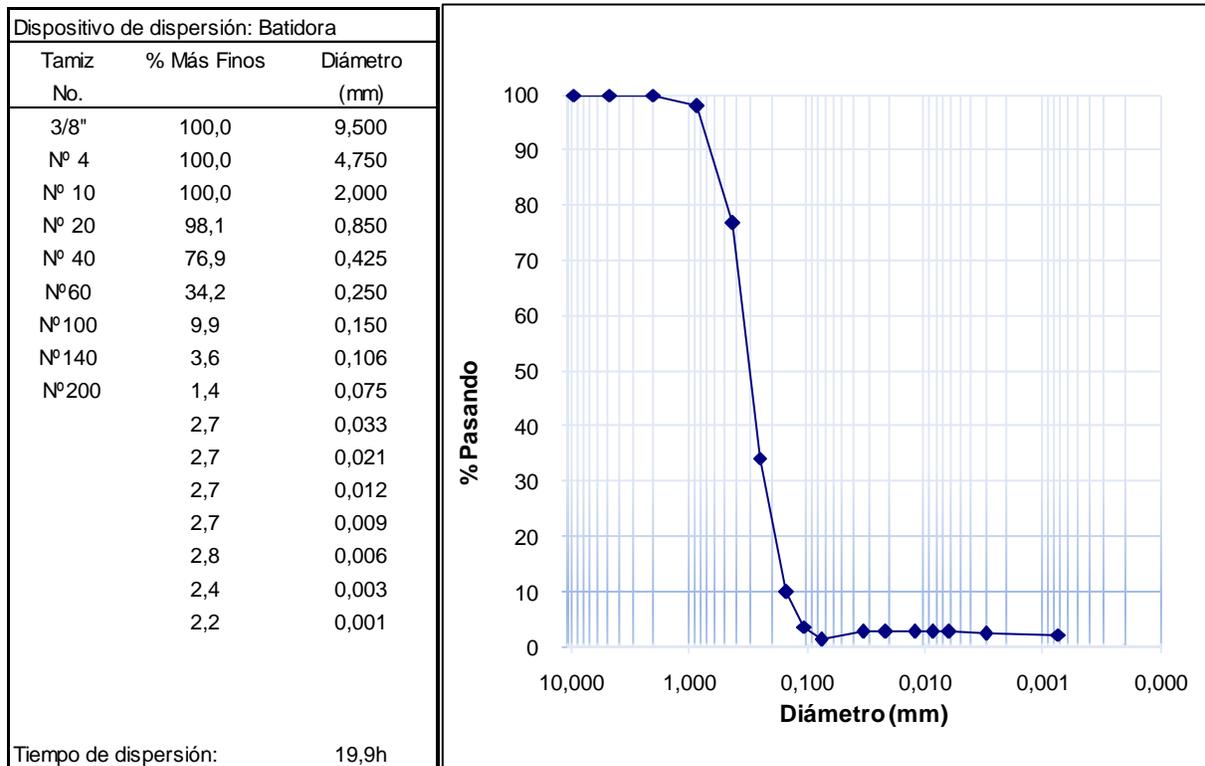


Tabla 16. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-907-18.

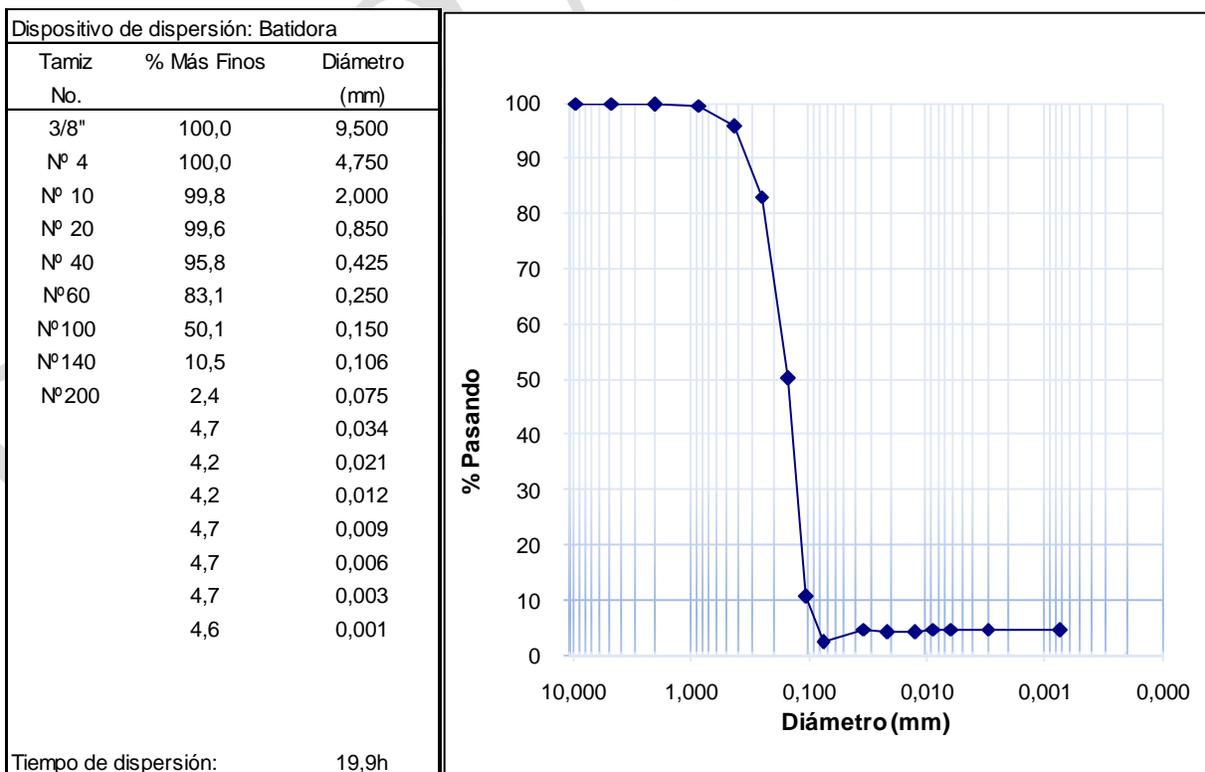


Tabla 17. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-908-18.

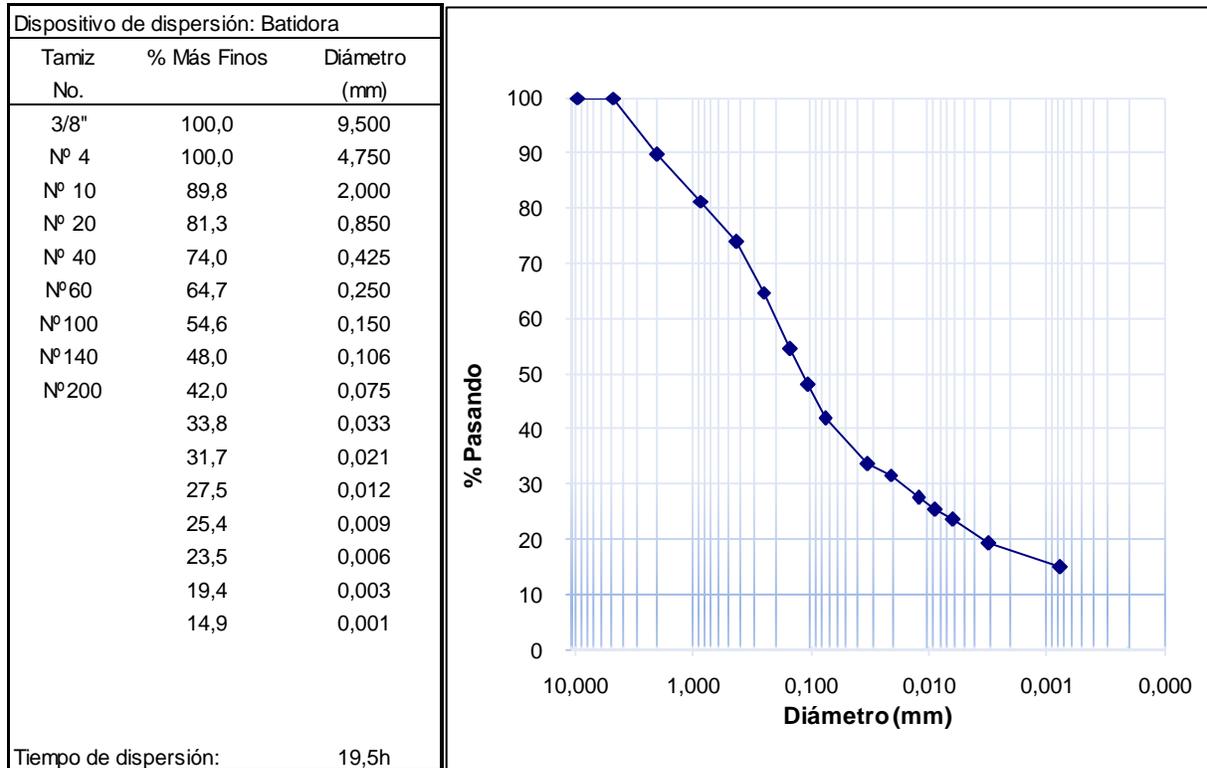
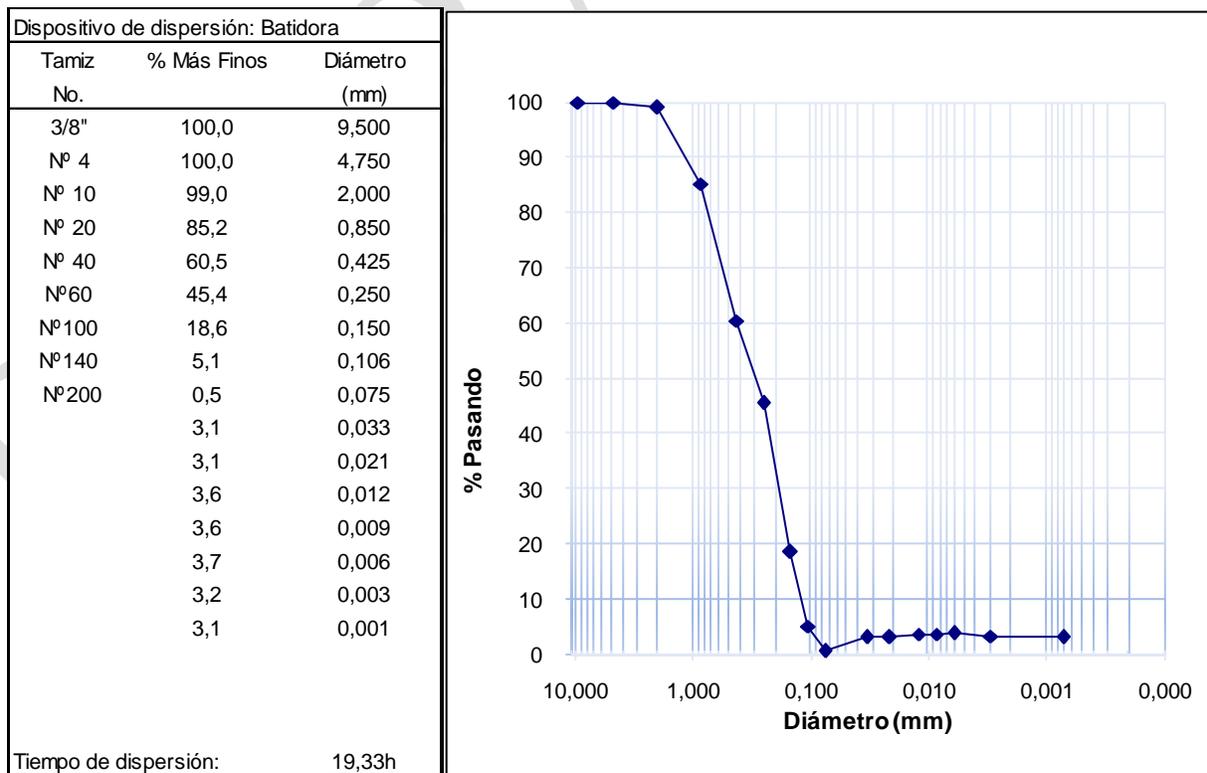


Tabla 18. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda, Muestra: M-909-18.





Nota:

-El ensayo del hidrómetro es realizado para todas las muestras con material pasando el tamiz N° 10.

Tabla 19. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-897-18.

MASA INICIAL: 717 g MASA FINAL: 711 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	12,66	1,77	1,8	98,2
N° 4	4,75	28,74	4,0	5,8	94,2
N° 10	2,00	115,72	16,1	21,9	78,1
N° 20	0,85	96,22	13,4	35,3	64,7
N° 40	0,43	117,93	16,45	51,8	48,2
N°60	0,25	117,02	16,33	68,1	31,9
N°100	0,15	145,86	20,35	88,5	11,5
N°140	0,11	67,36	9,40	97,9	2,1
N°200	0,08	9,98	1,39	99,3	0,7

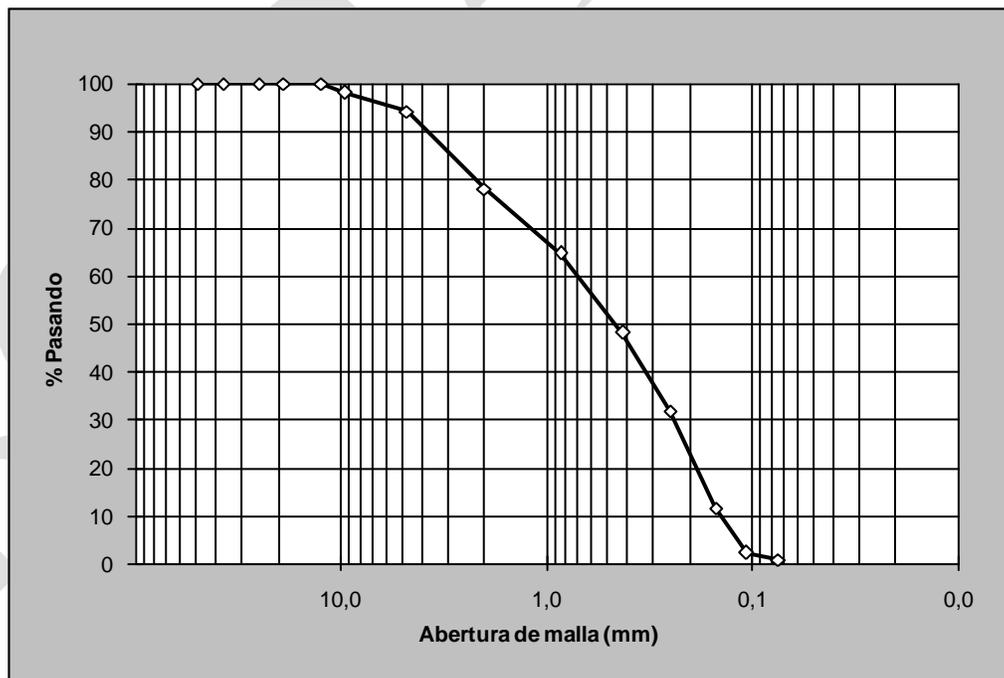


Gráfico 1. Curva granulométrica. Muestra: M-897-18.



Tabla 20. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-900-18.

MASA INICIAL: 625 g MASA FINAL: 502 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	35,87	5,7	5,7	94,3
Nº 10	2,00	153,25	24,5	30,3	69,7
Nº 20	0,85	125,68	20,1	50,4	49,6
Nº 40	0,43	72,97	11,68	62,1	37,9
Nº60	0,25	33,48	5,36	67,5	32,5
Nº100	0,15	50,53	8,09	75,5	24,5
Nº140	0,11	24,52	3,93	79,5	20,5
Nº200	0,08	6,17	0,99	80,5	19,5

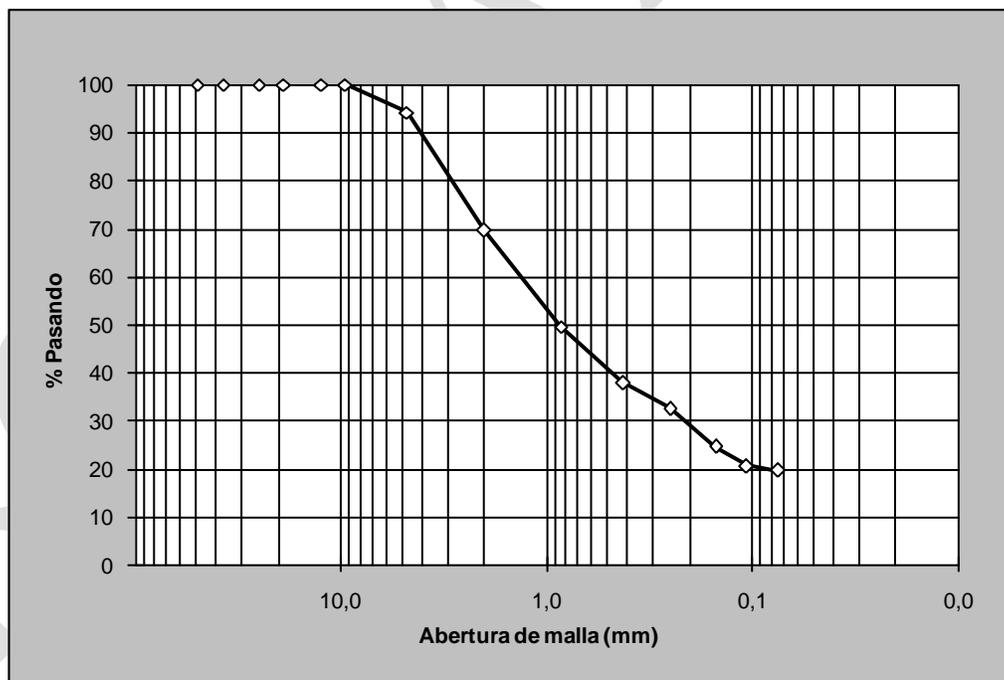


Gráfico 2. Curva granulométrica. Muestra: M-900-18.

Tabla 21. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-901-18.

MASA INICIAL: 646 g MASA FINAL: 204 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	8,49	1,31	1,3	98,7
3/8"	9,50	11,58	1,79	3,1	96,9
Nº 4	4,75	17,21	2,7	5,8	94,2
Nº 10	2,00	37,11	5,7	11,5	88,5
Nº 20	0,85	34,51	5,3	16,9	83,1
Nº 40	0,43	25,89	4,01	20,9	79,1
Nº60	0,25	18,84	2,92	23,8	76,2
Nº100	0,15	22,52	3,49	27,3	72,7
Nº140	0,11	14,46	2,24	29,5	70,5
Nº200	0,08	13,34	2,07	31,6	68,4

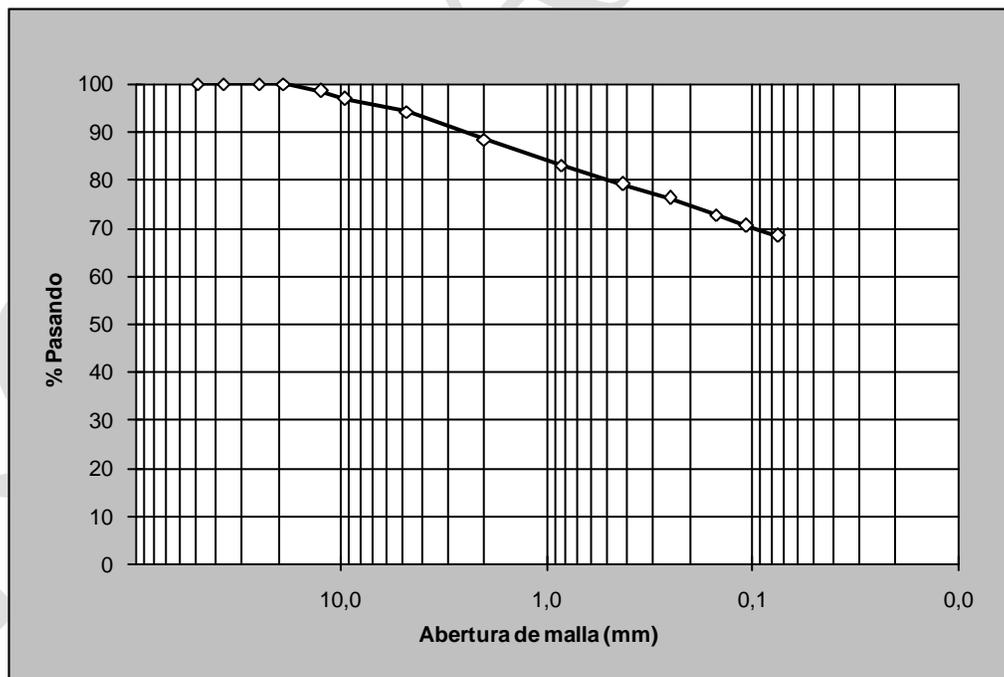


Gráfico 3. Curva granulométrica. Muestra: M-901-18.



Tabla 22. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-902-18.

MASA INICIAL: 531 g MASA FINAL: 525 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	13,36	2,52	2,5	97,5
1/2"	12,5	0,00	0,00	2,5	97,5
3/8"	9,50	0,00	0,00	2,5	97,5
Nº 4	4,75	0,00	0,0	2,5	97,5
Nº 10	2,00	1,27	0,2	2,8	97,2
Nº 20	0,85	54,94	10,4	13,1	86,9
Nº 40	0,43	123,92	23,35	36,5	63,5
Nº60	0,25	80,97	15,25	51,7	48,3
Nº100	0,15	124,00	23,36	75,1	24,9
Nº140	0,11	100,23	18,88	94,0	6,0
Nº200	0,08	26,02	4,90	98,9	1,1

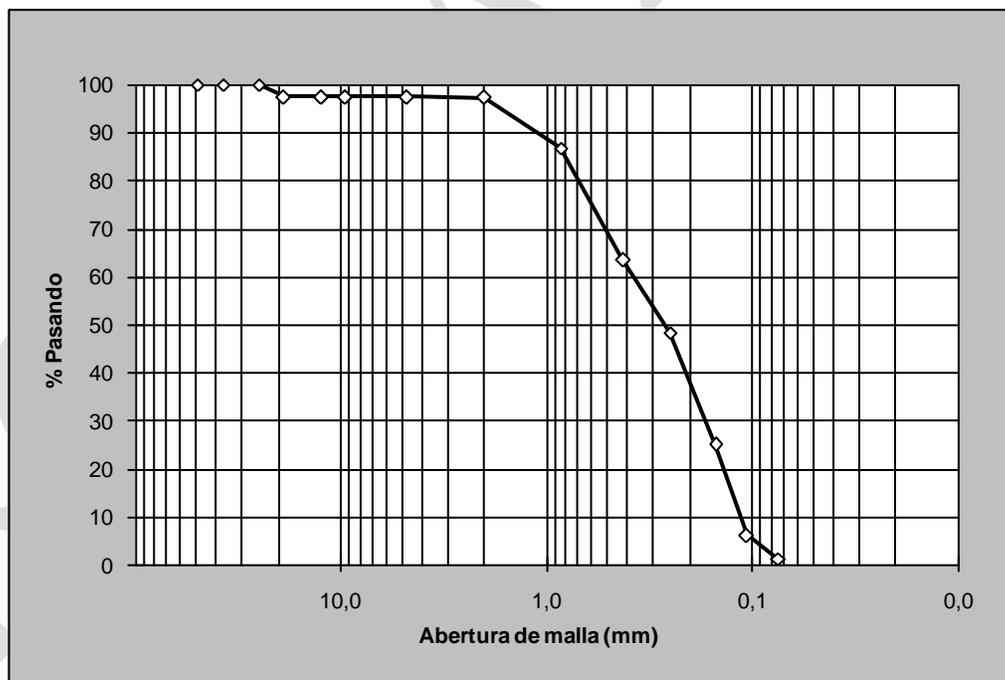


Gráfico 4. Curva granulométrica. Muestra: M-902-18.



Tabla 23. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-904-18.

MASA INICIAL: 264 g MASA FINAL: 263 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	1,68	0,6	0,6	99,4
Nº 20	0,85	8,60	3,3	3,9	96,1
Nº 40	0,43	41,50	15,72	19,6	80,4
Nº60	0,25	97,16	36,80	56,4	43,6
Nº100	0,15	98,42	37,28	93,7	6,3
Nº140	0,11	13,71	5,19	98,9	1,1
Nº200	0,08	1,88	0,71	99,6	0,4

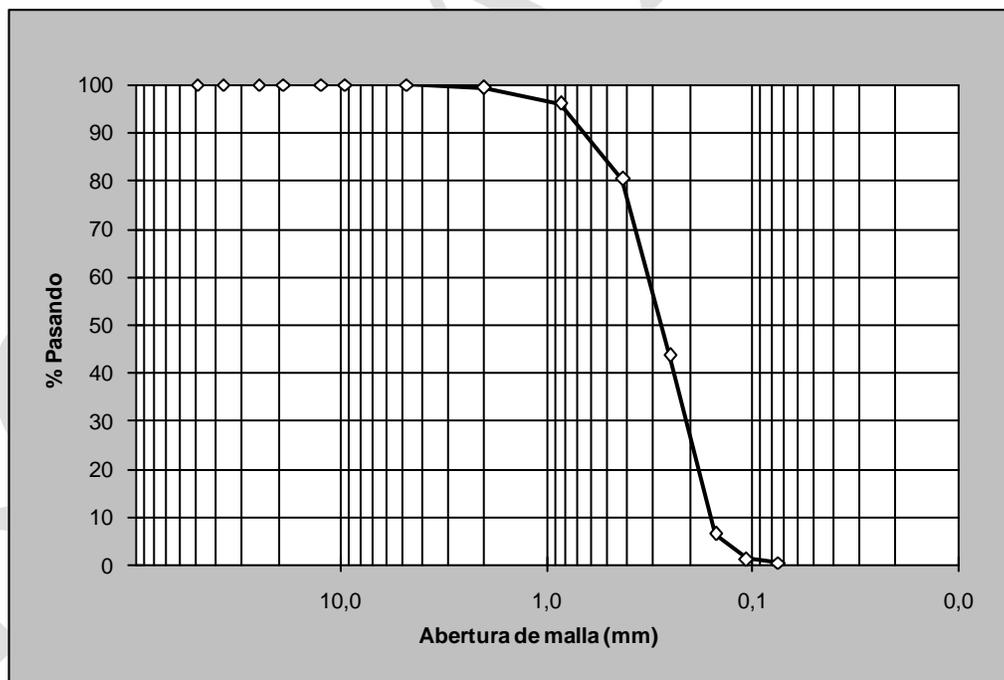


Gráfico 5. Curva granulométrica. Muestra: M-904-18.



Tabla 24. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-906-18.

MASA INICIAL: 522 g MASA FINAL: 520 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,51	0,1	0,1	99,9
Nº 10	2,00	5,20	1,0	1,1	98,9
Nº 20	0,85	19,08	3,7	4,7	95,3
Nº 40	0,43	147,56	28,26	33,0	67,0
Nº60	0,25	220,31	42,19	75,2	24,8
Nº100	0,15	105,19	20,14	95,3	4,7
Nº140	0,11	17,71	3,39	98,7	1,3
Nº200	0,08	4,86	0,93	99,7	0,3

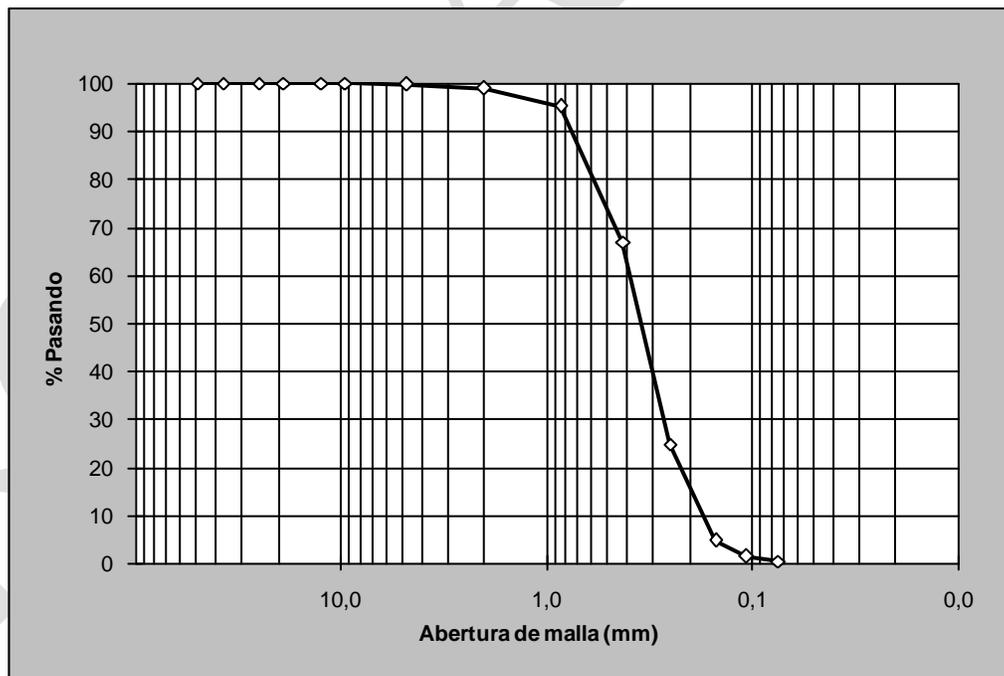


Gráfico 6. Curva granulométrica. Muestra: M-906-18.



Tabla 25. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-907-18.

MASA INICIAL: 401 g MASA FINAL: 393 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	0,42	0,1	0,1	99,9
Nº 20	0,85	0,88	0,2	0,3	99,7
Nº 40	0,43	16,10	4,02	4,3	95,7
Nº60	0,25	52,85	13,19	17,5	82,5
Nº100	0,15	154,02	38,43	56,0	44,0
Nº140	0,11	143,92	35,91	91,9	8,1
Nº200	0,08	24,67	6,16	98,0	2,0

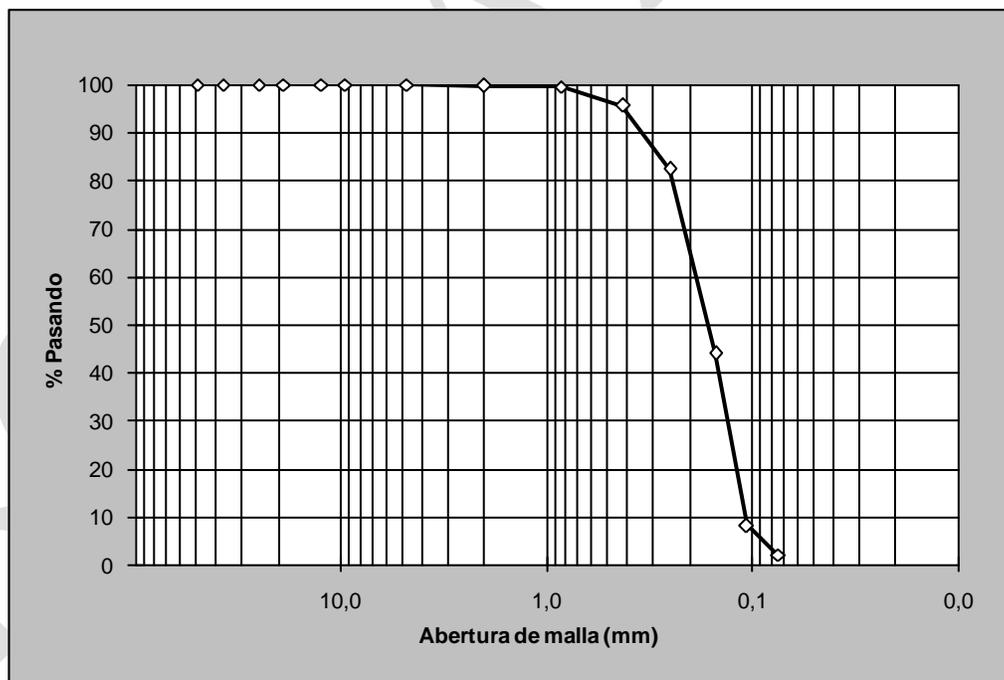


Gráfico 7. Curva granulométrica. Muestra: M-907-18.



Tabla 26. Clasificación de los materiales.

Número de muestra	Simbología SUCS	Nombre
M-896-18	SP	Arena mal gradada
M-897-18	SP	Arena mal gradada
M-898-18	ML	Limo
M-899-18	SP	Arena mal gradada
M-900-18	SM	Arena limosa
M-901-18	MH	Limo elástico
M-902-18	SP	Arena mal gradada
M-903-18	ML	Limo
M-904-18	SP	Arena mal gradada
M-905-18	MH	Limo elástico
M-906-18	SP	Arena mal gradada
M-907-18	SP	Arena mal gradada
M-908-18	SM	Arena limosa
M-909-18	SP	Arena mal gradada

Nota:

SUCS – Sistema Unificado de Clasificación de suelos.

Aclaraciones:

- El presente informe de ensayo sólo ampara las mediciones reportadas en el momento y condiciones ambientales y de uso en que se realizó esta prueba, para las muestras indicadas en este informe.
- Este informe de resultados tiene validez únicamente en su forma íntegra y original.
- No se permite la reproducción parcial de este documento sin la autorización del Director del LanammeUCR.

Preparó:

Ing. Oscar Valerio Salas
Jefe Laboratorio de Geotecnia

Revisó:

Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA.
*Coordinador de Laboratorios
de Infraestructura Civil*

Aprobó:

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.
Director LanammeUCR

Anexo 2: Norma ASTM para la prueba de Abrasión los Ángeles



Designation: C131/C131M – 14

Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine¹

This standard is issued under the fixed designation C131/C131M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers a procedure for testing of coarse aggregates with a maximum size smaller than 37.5 mm (1½ in.) for resistance to degradation using the Los Angeles testing machine (Note 1).

NOTE 1—A procedure for testing coarse aggregate larger than 19.0 mm (¾ in.) is covered in Test Method C535. Thus coarse aggregates with a maximum size between 19 mm (¾ in.) and 37.5 mm (1½ in.) may be tested by Test Method C535 or Test Method C131/C131M.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

NOTE 2—Sieve size is identified by its standard designation in Specification E11. The Alternative designation given in parentheses is for information only and does not represent a different standard sieve size.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

A6/A6M Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling
C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved July 1, 2014. Published July 2014. Originally approved in 1937. Last previous edition approved in 2006 as C131 – 06. DOI: 10.1520/C0131_C0131M-14.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

C136 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

C535 Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine

C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C702 Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size

D75 Practice for Sampling Aggregates

E11 Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology C125.

4. Summary of Test Method

4.1 This test is a measure of degradation of mineral aggregates of standard gradings resulting from a combination of actions including abrasion or attrition, impact, and grinding in a rotating steel drum containing a specified number of steel spheres, the number depending upon the grading of the test sample. As the drum rotates, a shelf plate picks up the sample and the steel spheres, carrying them around until they are dropped to the opposite side of the drum, creating an impact-crushing effect. The contents then roll within the drum with an abrading and grinding action until the shelf plate picks up the sample and the steel spheres, and the cycle is repeated. After the prescribed number of revolutions, the contents are removed from the drum and the aggregate portion is sieved to measure the degradation as percent loss.

5. Significance and Use

5.1 This test has been widely used as an indicator of the relative quality or competence of various sources of aggregate having similar mineral compositions. The results do not automatically permit valid comparisons to be made between sources distinctly different in origin, composition, or structure. Assign specification limits with extreme care in consideration of available aggregate types and their performance history in

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

specific end uses. The percent loss determined by this test method has no known consistent relationship to the percent loss for the same material when tested by Test Method C535.

6. Apparatus

6.1 Los Angeles Machine—A Los Angeles machine, conforming in all essential characteristics to the design shown in Fig. 1, shall be used. The machine shall consist of a hollow steel cylinder, with a wall thickness of at least 12 mm [1/2 in.] (Note 3) closed at both ends, conforming to the dimensions shown in Fig. 1, having an inside diameter of 711 ± 5 mm [28 ± 0.2 in.], and an inside length of 508 ± 5 mm [20 ± 0.2 in.]. The interior surface of the cylinder shall be free from protrusions disrupting the path of the sample and steel spheres except for the shelf described below. The cylinder shall be mounted on stub shafts attached to the ends of the cylinder but not entering it, and shall be mounted in such a manner that it rotates with the axis in a horizontal position within a tolerance in slope of 1 in 100. An opening in the cylinder shall be provided for the

introduction of the test sample. A suitable, dust-tight cover shall be provided for the opening with means for bolting the cover in place. The cover shall be so designed as to maintain the cylindrical contour of the interior surface unless the shelf is so located that the steel spheres and sample shall not impact on or near the door opening and the opening cover during the test. A removable steel shelf extending the full length of the cylinder and projecting inward 89 ± 2 mm [3.5 ± 0.1 in.] shall be mounted on the interior cylindrical surface of the cylinder, in such a way that a plane centered between the large faces coincides with an axial plane. The shelf shall be of such thickness and so mounted, by bolts or other suitable means, as to be firm and rigid. The position of the shelf (Note 4) shall be such that the sample and the steel spheres shall not impact on or near the opening and its cover, and that the distance from the shelf to the opening, measured along the outside circumference of the cylinder in the direction of rotation, shall be not less than 1270 mm [50 in.]. Inspect the shelf periodically to determine that it is not bent either lengthwise or from its normal radial

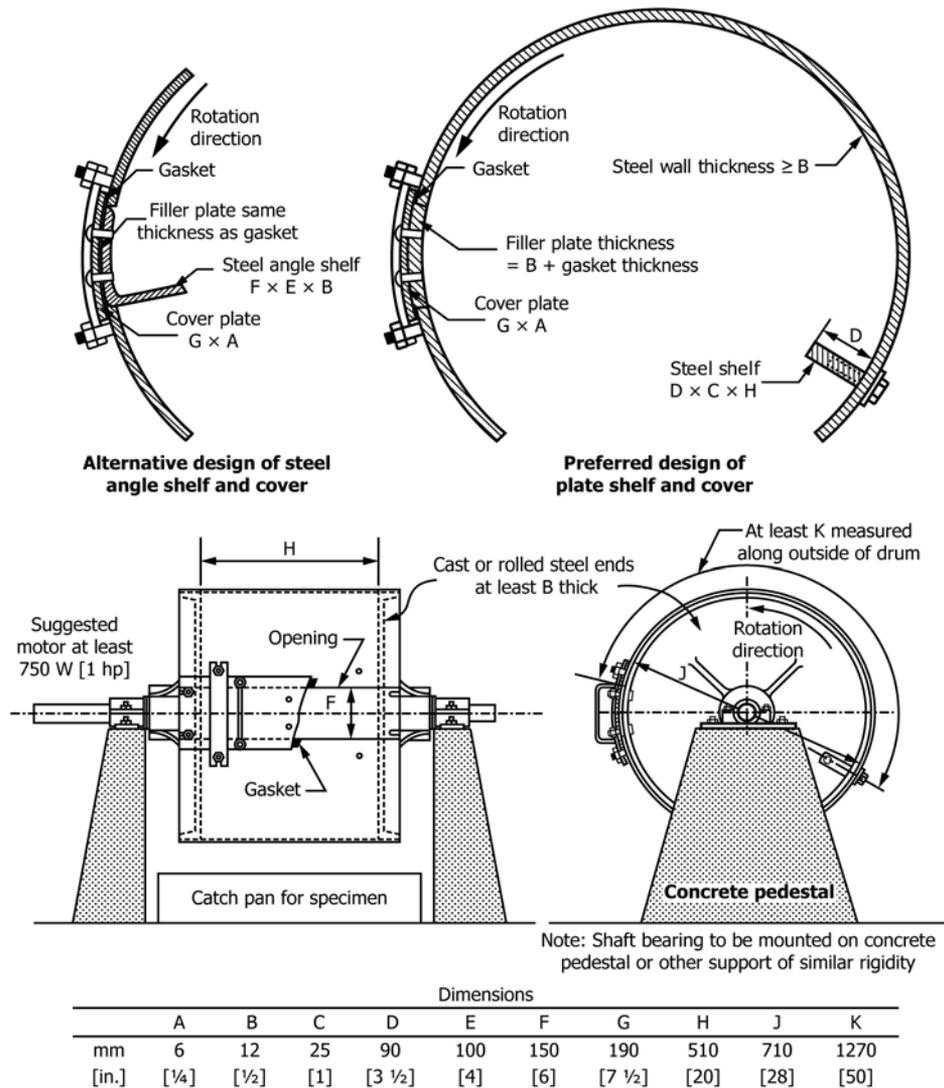


FIG. 1 Los Angeles Testing Machine

position with respect to the cylinder. If either condition is found, repair or replace the shelf before further tests are conducted.

NOTE 3—Tolerances for wall thickness are given in Specification A6/A6M.

NOTE 4—The use of a shelf of wear-resistant steel, rectangular in cross section and mounted independently of the cover, is preferred. However, a shelf consisting of a section of rolled angle, properly mounted on the inside of the cover plate, may be used provided the direction of rotation is such that the charge will be caught on the outside face of the angle.

6.1.1 The machine shall be so driven and so counterbalanced as to maintain a rotation speed of 30 to 33 rpm (Note 5). If an angle is used as the shelf, the direction of rotation shall be such that the charge is caught on the outside surface of the angle.

NOTE 5—Back-lash or slip in the driving mechanism is very likely to furnish test results which are not duplicated by other Los Angeles machines producing constant peripheral speed.

6.2 Sieves, conforming to Specification E11.

6.3 Balance—A balance or scale accurate within 0.1 % of test load over the range required for this test.

6.4 Charge—The charge shall consist of steel spheres or ball bearings each having a diameter of between 46 mm [1¹³/₁₆ in.] and 48 mm [1⁷/₈ in.] and each having a mass of between 390 and 445 g.

6.4.1 The charge (steel spheres or ball bearings), (Note 6) depending upon the grading of the test sample as described in Section 8, shall be as follows:

Grading	Number of Spheres	Mass of Charge, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4580 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

NOTE 6—The total mass specified requires an average mass of each steel sphere or ball bearing of 416 g. Steel spheres or ball bearings 46.0 mm [1¹³/₁₆ in.] and 47.6 mm [1⁷/₈ in.] in diameter, having a mass of approximately 400 and 440 g each, respectively, are readily available. Steel spheres or ball bearings 46.8 mm [1²⁷/₃₂ in.] in diameter having a mass of approximately 420 g may also be obtainable. The charge may consist of a mixture of these sizes conforming to the mass tolerances of 6.4 and 6.4.1.

7. Sampling

7.1 Obtain the field sample in accordance with Practice D75, and reduce the field sample to adequate sample size in accordance with Practice C702.

8. Test Sample Preparation

8.1 Wash the reduced sample (see 9.1.1) and oven dry at 110 ± 5°C [230 ± 9°F] to a constant mass, separate into individual size fractions, and recombine to the grading of Table 1 most nearly corresponding to the range of sizes in the aggregate as furnished for the work. Record the mass of the sample prior to test to the nearest 1 g.

9. Procedure

9.1 Place the test sample and the charge in the Los Angeles testing machine and rotate the machine at a speed of 30 to 33 r/min for 500 revolutions (Note 7). After the prescribed number of revolutions, discharge the material from the machine and make a preliminary separation of the sample on a sieve coarser than the 1.70-mm (No. 12) sieve. Sieve the finer portion on a 1.70-mm (No. 12) sieve in a manner conforming to Test Method C136. Wash the material coarser than the 1.70-mm (No. 12) sieve and oven-dry at 110 ± 5°C [230 ± 9°F] to a constant mass, and determine the mass to the nearest 1 g (Note 8).

NOTE 7—Valuable information concerning the uniformity of the sample under test may be obtained by determining the loss after 100 revolutions. The loss should be determined by dry sieving the material on the 1.70-mm sieve without washing. The ratio of the loss after 100 revolutions to the loss after 500 revolutions should not greatly exceed 0.20 for material of uniform hardness. When this determination is made, take care to avoid losing any part of the sample; return the entire sample, including the dust of fracture, to the testing machine for the final 400 revolutions required to complete the test.

NOTE 8—Elimination of washing after test will seldom reduce the measured loss by more than about 0.2 % of the original sample mass.

9.1.1 If the aggregate is essentially free of adherent coatings and dust, the requirement for washing after the test is optional. However, in the case of referee testing, the washing procedure shall be performed.

10. Calculation

10.1 Calculate the loss (difference between the original mass and the final mass of the test sample) as a percentage of the original mass of the test sample. Report this value as the percent loss (Note 9).

NOTE 9—The percent loss determined by this test method has no known consistent relationship to the percent loss for the same material when tested by Test Method C535.

$$\text{Percent Loss} = [(C - Y) / C] \times 100 \quad (1)$$

TABLE 1 Gradings of Test Samples

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (⅜ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
9.5 mm (⅜ in.)	6.3 mm (¼ in.)	...	...	2 500 ± 10	...
6.3 mm (¼ in.)	4.75-mm (No. 4)	...	...	2 500 ± 10	...
4.75-mm (No. 4)	2.36-mm (No. 8)	...	...	...	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

where:

C = mass of original test sample, g, and

Y = final mass of the test sample, g.

11. Report

11.1 Report the following information:

11.1.1 Identification of the aggregate as to source, type, and nominal maximum size;

11.1.2 Grading designation from **Table 1** used for the test; and

11.1.3 Loss by abrasion and impact of the sample expressed to the nearest 1 % by mass.

12. Precision and Bias

12.1 For nominal 19.0-mm ($3/4$ -in.) maximum size coarse aggregate with percent losses in the range of 10 to 45 %, the multilaboratory coefficient of variation has been found to be

4.5 %.³ Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same coarse aggregates are not expected to differ from each other by more than 12.7 %³ (95 % probability) of their average. The single-operator coefficient of variation has been found to be 2.0 %.³ Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same coarse aggregate are not expected to differ from each other by more than 5.7 % (95 % probability) of their average.³

12.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for this procedure, no statement on bias is being made.

13. Keywords

13.1 abrasion; aggregate (coarse; small size); degradation; impact; Los Angeles machine

³ These numbers represent, respectively, the (1s%) and (d2s%) limits as described in Practice **C670**.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. MAINTENANCE OF SHELF

X1.1 The shelf of the Los Angeles machine is subject to severe surface wear and impact. With use, the working surface of the shelf is peened by the balls and tends to develop a ridge of metal parallel to and about 32 mm [$1\frac{1}{4}$ in.] from the junction of the shelf and the inner surface of the cylinder. If the shelf is made from a section of rolled angle, not only may this ridge develop but the shelf itself may be bent longitudinally or transversely from its proper position.

X1.2 The shelf should be inspected periodically to determine that it is not bent either lengthwise or from its normal

radial position with respect to the cylinder. If either condition is found, the shelf should be repaired or replaced before further tests are made. The influence on the test result of the ridge developed by peening of the working face of the shelf is not known. However, for uniform test conditions, it is recommended that the ridge be ground off if its height exceeds 2 mm [0.1 in.].

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C131 – 06) that may impact the use of this standard. (Approved July 1, 2014.)

(1) Revised the standard into a dual measurement system with the units of measurement now stated in either SI units or inch-pound units.

(2) Revised Sections 1, 5, 6, 8, 9.

(3) Revised Notes 1, 3, and 6.

(4) Added Note 2.

(5) Repositioned Notes 7 and 8.

(6) Added Eq. 1.

(7) Replaced Fig. 1.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>

Anexo 3: Informe de mediciones topográficas para los escenarios de ascenso del nivel del mar



25 DE SEPTIEMBRE DEL 2018

INFORME TOPOGRÁFICO

REFERENCIA SOBRE NIVELES DE NIVEL MEDIO DEL MAR

ING. KIMBERLY BALTODANO BLANCO

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE NIVELES REFERIDOS AL NIVEL MEDIO DEL MAR (NMM)

FECHA: 25 DE SEPTIEMBRE DEL 2018

UBICACIÓN: NOSARA, DISTRITO 6 DEL CANTÓN DE NICOYA, GUANACASTE

Antecedentes

Como parte de lo solicitado por el señor Erick Aragón Valle para referir los niveles tomados en campo a un modelo digital de Inundaciones Costeras para su proyecto de graduación en Licenciatura de Geología.

Visita al Campo

Se realizó la visita y medición de datos los días 15 y 16 de septiembre del presente año, en el distrito de Nosara. La medición se realizó en la desembocadura de quebrada Pelada, por contar con características ideales para dicho trabajo.



Metodología

El software utilizado es el WxTide32. Como se observa en la siguiente imagen, el día 15 de setiembre se tomó el dato de altura a las 6:37am, con un nivel de 2.8m, correspondiente a la Pleamar y a las 12:48, correspondiente a la Bajamar, con un nivel de 0.1m.

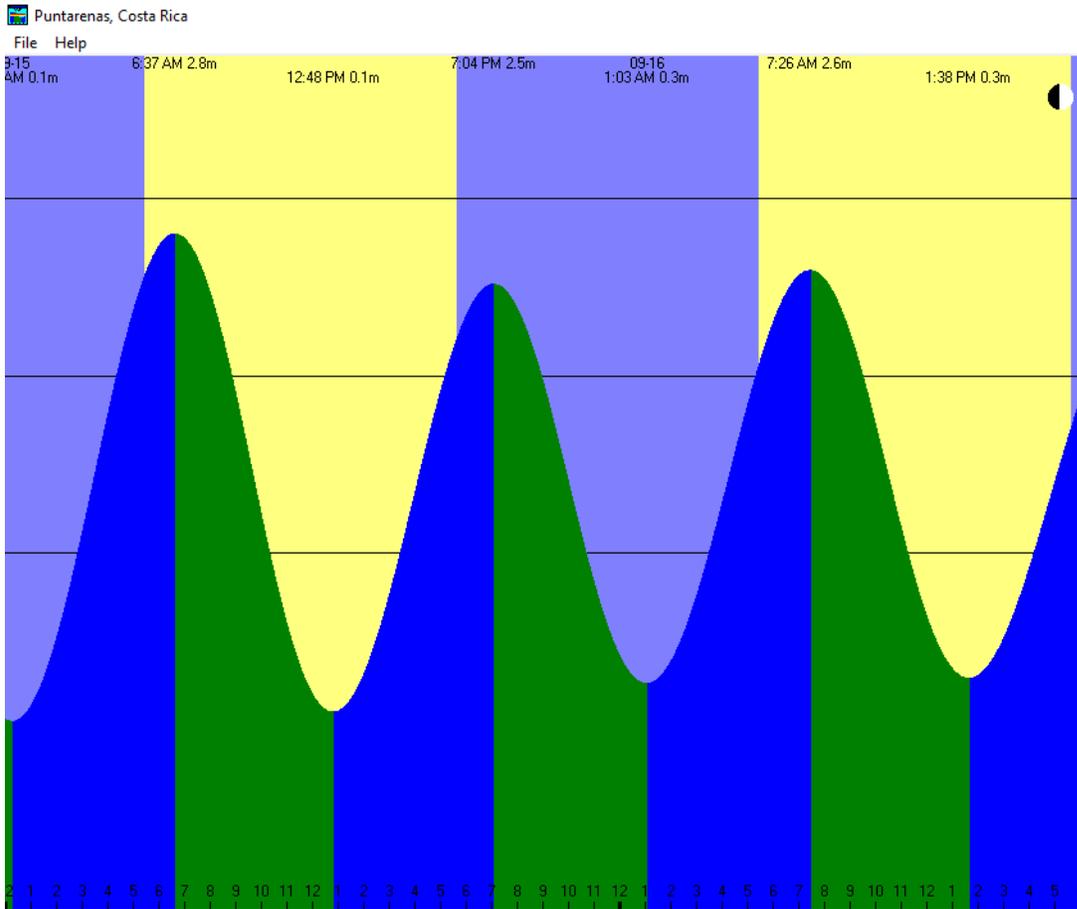


Ilustración 1. Información sobre Bajamar y Pleamar del día 15 de setiembre del 2018. Fuente:Software WxTide32

En el punto de estación, se estableció coordenadas arbitrarios X, Y, Z (1000, 2000, 50).

Nivel arbitrario del punto ST con respecto a Pleamar=

$$47.8080 - 2.82 = 44.99$$

Nivel arbitrario del punto ST con respecto a Bajamar=

$$45.0667 - 0.11 = 44.96$$

Por tanto, se calcula la Media del punto:

Nivel arbitrario de ST Media Nivel de Bajamares =

$$\frac{(44.99 + 44.96)}{2} = 44.98$$

Elevación del punto ST con respecto al Nivel medio de Bajamares de Sicigias=

$$50m - 44.98m = 5.02m$$

Por tanto, la elevación en ST, referido al nivel medio de bajamares de Sicigias corresponde a una altura de 5.02, a este valor se le resta la diferencia entre NMM y NMBS es de 1.44 (JICA, 1981).

Del cual se obtuvo que el nivel correspondiente a ST con respecto al NMM del mar es 3.58m.

$$5.02m - 1.44m = 3.58m$$



Ilustración 2. Imagen Satelital, zona de estudio y puntos tomados en campo. Fuente: Google Earth

Al obtener las coordenadas exactas del punto ST (1101679.359, 316130.3446, 3.58) se procedió a tomar puntos de referencia con niveles del NMM. En la siguiente tabla se observan sus coordenadas:

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de referencia referidos al nivel medio del mar (NMM). Fuente: Propia

NORTE	ESTE	ELEVACION	DESCRIPCION
1101715.6870	315952.9570	-0.3694	ROCA
1101757.9710	315930.9493	0.6057	ROCA2
1101551.3900	316167.2300	3.4170	PALMERA

**El procedimiento mencionado se realizó nuevamente el día 16 de septiembre de 2018, tomando en cuenta los valores del software WxTide respectivos:

2.6m a las 7:26am >> Pleamar

0.3m a la 1:38pm >> Bajamar

Y al realizar de nuevo los cálculos, se obtuvo una elevación del punto ST referido al NMM de 3,59.

Conclusiones

Se obtuvo una diferencia de 1 cm en la elevación del nivel del punto ST. Por tanto, se considera viable el trabajo realizado en campo.

Sin embargo, por la metodología realizada y tener presentes condiciones físicas, así como gravedad y otros aspectos, se considera que los niveles de los puntos de referencia pueden variar en $\pm 10cm$.

Kimberly Baltodano Blanco

Ingeniera Topógrafa

IT-31687

ANEXOS

1. Datos con coordenadas Arbitrarias

199.0000	1000.0000	2000.0000	50.0000	ST
200.0000	997.1627	2019.7226	47.8214	PLEA
201.0000	997.1373	2019.7733	47.8080	PLE1
202.0000	1002.5568	1979.4362	50.3003	AMARRE2
203.0000	901.8436	2005.7919	45.0667	BAJA
204.0000	840.2620	2085.2634	-0.3694	ROCA
205.0000	831.1850	2132.0601	0.6057	ROCA2
206.0000	998.4049	2019.6223	47.5592	PLEAMAR_2
207.0000	902.6780	2006.8390	45.2830	BAJAMAR_2
208.0000	998.6878	1866.8278m	3.4170	PALMERA

2. Datos con coordenadas CRTM05

1	1101679.359	316130.3446	50	st
2	1101697.502	316121.9781	47.808	PLEAMAR_1
3	1101660.371	316138.6426	50.3003	ST2
4	1101657.004	316034.5924	45.0667	BAJAMAR_1
5	1101715.687	315952.957	-0.3694	ROCA
6	1101757.971	315930.9493	0.6057	ROCA2
7	1101697.718	316123.2363	47.5592	PLEAMAR_2
8	1101658.245	316035.0946	45.283	BAJAMAR_2
9	1101551.39	316167.23	3.417	PALMERA