



DIRECCIÓN DE
GEOLOGÍA Y MINAS

GOBIERNO
DE COSTA RICA



CZECH
GEOLOGICAL
SURVEY

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD COSTERA DE COSTA RICA ANTE EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR, UTILIZANDO EL MÉTODO DEL IVC.

Aplicación en un sector de la región del
Pacífico Central (Boca Barranca hasta Punta Judas)



Fondo de Cooperación Triangular Unión Europea - Costa Rica - América Latina y el Caribe



GOBIERNO
DE COSTA RICA



551.457.087.2861

C8375g Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección de Geología y Minas

Guía metodológica para la elaboración de mapas de vulnerabilidad costera de Costa Rica ante el ascenso del nivel de mar, utilizando el método del IVC.: aplicación en un sector de la región del Pacífico Central (Boca Barranca hasta Punta Judas) / Ministerio de Ambiente y Energía.] Dirección de Geología y Minas, Ana Sofía Huapaya Rodríguez Parra, [et al...]. Servicio Geológico Checo. Instituto Geológico y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba. - - San José, Costa Rica: MINAE, DGM, IGP, CZE Geological, 2025.

152 páginas: color. 28 cm.

El equipo profesional responsable de la elaboración de este documento esta conformado por la Dirección de Geología y Minas. Departamento de Investigación Ana Sofía Huapaya Rodríguez Parra, Christian Alonso Vargas Bolaños, Martín Rojas Barrantes, Luis David Jara Díaz, Evelyn Rodríguez Coto. Departamento de Control Minero. German Eduardo Gonzalez Marín. Servicio Geológico Checo Vladimir Zacek, Tomás Hroch. Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba Roberto Denis Valle, Miguel Cabrera Castellanos y Roxana Raymari Rodríguez Fernández.

ISBN: 978-9977-50-173-4

1. INDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA 2. COSTA RICA. 3. MAPA GEOLÓGICO. 4. REGION PACIFICO CENTRAL-SECTOR BOCA BARRANCA- PUNTA JUDAS. I. CZECH Geological Survey. II. Instituto de Geología y Paleontología. Servicio de Geología de Cuba. III. Huapaya Rodríguez Parra, Ana Sofía. II. Rojas Barrantes, Martín III. Jara Díaz, Luis David. VI Rodríguez Coto, Evelyn. VII. Título.



El equipo profesional responsable de la elaboración de este documento está conformado por:

Dirección de Geología y Minas

Departamento de Investigación

Ana Sofia Huapaya Rodriguez Parra

Christian Alonso Vargas Bolaños

Martín Rojas Barrantes

Luis David Jara Díaz

Evelyn Rodríguez Coto

Departamento de Control Minero

Germán Eduardo González Marín

Servicio Geológico Checo

Vladimír Žáček

Tomás Hroch

Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico de Cuba

Roberto Denis Valle

Miguel Cabrera Castellanos

Roxana Raymarú Rodríguez Fernández

Forma de citar el documento:

Huapaya A.S., Vargas C., Rojas M., Jara L.D., Rodríguez E., González G.E., Zacek V., Denis R., Cabrera M., Rodríguez R. R., Hroch T: Guía Metodológica Para la Elaboración de Mapas de Vulnerabilidad Costera de Costa Rica Ante el Ascenso del Nivel del Mar, Utilizando el Método del IVC. Aplicación en un sector de la Región Pacífico Central (Boca Barranca hasta Punta Judas).

Este documento se ha realizado con la ayuda financiera de la Unión Europea, a través de la AECID. Las opiniones expresadas en el mismo son responsabilidad exclusiva de la Dirección de Geología y Minas del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, y no representan necesariamente la opinión oficial de la Unión Europea ni de la AECID.

Créditos fotográficos

Las fotografías incluidas en la presente guía fueron utilizadas con fines técnicos. Los derechos de autor corresponden a sus respectivos titulares. La reproducción total o parcial de las imágenes requerirá la autorización expresa de los titulares de los derechos, esta guía se publica sin fines de lucro.

Fotografías del contenido interno:

Ana Sofia Huapaya Rodríguez Parra – Figuras 54, 60, 66A, 67A, 70A y B, 71, 100A y B / DGM.
Vladimír Žáček – Figuras 29B, 31, 43A, 51, 53, 56, 58A, 64, 65, 66B, 67B, 68A y B, 69A y B, 72A y B, 73A y B, 74A, B, C y D, 75A y B, 76A y B, 77A y B, 78A y B, 79A y B, 80A y B, 81A y B, 82, 83A y B, 84A y B, 85A y B, 86A, B y C, 87A y B, 90A y B / ČGS.

Evelyn Rodríguez Coto – Figuras 22B, 25A y B, 34, 46A, 50A, 55, 58B, 62A, 98, 99A y B, 101A, B y C / DGM.

Luis David Jara Díaz – Figuras 19, 20, 21, 35A y B, 36, 39, 40, 47, 48, 49, 57, 88A y B, 89A y B, 91A, B, C y D, 92A y B, 93A y B / DGM.

Tomáš Hroch – Figuras 22A, 24, 25D, 26, 27, 28, 32, 33, 37, 38, 43B, 44, 46B, 52, 63, 94A y B, 95A y B, 97A y B / ČGS.

Germán Eduardo González Marín – Figuras 23, 29A, 35C y D, 41, 42 / DGM.

Martín Rojas Barrantes – Figuras 25C, 45, 50B, 61 / DGM.

Fotografías de portada y contraportada:

Portada (Peñón de Tivives) – Departamento de comunicación institucional / MINAE

Portada imágenes miniatura – Ana Sofia Huapaya Rodríguez Parra / DGM y Vladimír Žáček / ČGS

Contraportada (Evento Taller cierre) – José David Quirós León / Fondo de Cooperación Adelante2.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto y la elaboración de la presente guía metodológica fueron posibles gracias al apoyo y acompañamiento de colegas, funcionarios e instituciones, a quienes extendemos nuestro más profundo agradecimiento.

Nuestro reconocimiento especial para:

- Sr. Mario Gómez, Director a.i. de la Dirección de Geología y Minas.
- Sr. Jorge Lázaro, Director General del Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba.
- Sr. Zdenek Venera, Director del Servicio Geológico Checo.
- Sr. Petr Mixa, Servicio Geológico Checo
- Sra. Patricia Bolaños, Cooperación Internacional del Ministerio de Ambiente y Energía.
- Sra. Blasa Delgado, Directora General del Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba (período 2024).
- Sra. Dayana Sánchez Díaz del Instituto de Geología y paleontología – Servicio Geológico de Cuba
- Sr. Orestes R. Carballo Alfonso, Instituto de Geología y paleontología – Servicio Geológico de Cuba.
- Sra. Laura Rivera, Directora del Área de Conservación de la Región Pacífico Central.
- Sra. Arelys Núñez, Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba.
- Sr. César Laurito, especialista en paleontología de vertebrados.
- Sr. Miroslav Bubík, especialista en micropaleontología, Servicio Geológico Checo.
- Sr. Claudio Campos, funcionario de la Dirección de Geología y Minas.
- Sr. Anthony Loria, funcionario de apoyo de la Dirección de Geología y Minas.
- Sra. Arianna Fernández, Dirección de Geología y Minas.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud a las instituciones que brindaron información y apoyo técnico durante el desarrollo del proyecto:

- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.
- Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía.
- Instituto Geográfico Nacional, del Registro Nacional Público.
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.
- Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis, de la Universidad Nacional.
- Colegio de Geólogos de Costa Rica.
- Módulo de Información Oceanográfica del Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología, de la Universidad de Costa Rica.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

Agradecemos también el respaldo del Comité de Asistencia Técnica y Gestión, Programa de Cooperación Triangular Unión Europea - Costa Rica para América Latina y el Caribe.

METODOLOGÍA PARA GENERAR MAPAS DE VULNERABILIDAD COSTERA EN COSTA RICA, CONSIDERANDO EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR PRODUCTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

RESUMEN

El objetivo de este trabajo se focaliza en presentar una guía metodológica para la elaboración de mapas de vulnerabilidad costera ante el ascenso del nivel del mar producto del cambio climático, de carácter regional e incluyendo el componente geológico. Para tal propósito se utilizó el índice de Vulnerabilidad Costera planteado inicialmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (Gornitz 1990, Gornitz, Daniels, White & Birdwell, 1994; Gornitz, Beaty & Daniels, 1997; Thieler - Hammar-Klose, 1999; Hammar-Klose & Thieler, 2001; Pendleton, Thieler & Williams, 2004 y 2005; entre otros) y posteriormente adoptado y adaptado por investigadores (as) de distintas nacionalidades incluyendo de Latinoamérica y el Caribe.

Este índice incorpora el tipo de costa (geomorfología), litología, tasa de cambio de la superficie terrestre costera, la pendiente costera, el aumento del nivel del mar, la altura significativa de la ola y la amplitud máxima de la marea astronómica, estas variables son determinantes para la determinación de la vulnerabilidad costera, y por ende en la simulación de escenarios que se verán afectados por el cambio climático a través del ascenso del nivel del mar. Para la validación de la guía metodológica se realiza el estudio de caso en un sector comprendido desde Boca Barranca hasta Esterillos Oeste de la Región Pacífico Central de Costa Rica. Los resultados obtenidos en el lugar de estudio que corresponde a 116,3 km, muestran que el 16,1 km (13,8%) representa vulnerabilidad muy baja; 14,8 km (12,7%) vulnerabilidad baja; 35,4 km (30,4%) moderada; 29 km (24,9%) alta; y 21,09 km (18,1%) muy alta. Esto demuestra que la mayor parte de la zona costera presenta vulnerabilidad moderada, alta y muy alta respectivamente.

Este trabajo fue posible gracias a la cooperación triangular entre la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, el Instituto de Geología y Paleontología - Servicio Geológico de Cuba (IGP) y el Servicio Geológico de la República Checa (CGS). El proyecto contó con el financiamiento de la Unión Europea (UE) a través del Fondo de Cooperación Triangular UE-Costa Rica-América Latina y el Caribe, coordinado por el Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, con el apoyo del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

TABLA DE CONTENIDO

1.SECCIÓN I-INTRODUCCIÓN.....	23
1.1. La cooperación triangular.....	23
1.2. Marco Legal.....	24
1.3. Justificación del proyecto.....	25
1.3.1. Importancia socioeconómica de la región del Pacífico Central.....	26
1.4. Marco conceptual.....	26
1.4.1. Cambio Climático.....	26
1.4.2. Elevación del nivel del mar: consecuencias y afectación.....	28
1.4.3. Dinámica costera.....	29
1.4.4. Vulnerabilidad Costera.....	30
2.SECCIÓN II-GUÍA METODOLÓGICA.....	32
2.1. Criterios de elaboración.....	32
2.2. Objetivos de la guía.....	32
2.3. A quien se dirige la guía.....	32
2.4. Ámbito de aplicación.....	33
2.5. Organización del trabajo.....	33
2.6. Escala de trabajo.....	34
2.7. Metodológica:Índice de Vulnerabilidad Costera, IVC.....	34
2.7.1. Índice de Vulnerabilidad Costera, IVC: modelo adoptado.....	35
2.8. Procedimiento metodológico para la determinación del IVC.....	36
2.8.1. Etapa 1:Identificación de Variables Relevantes.....	37
2.8.1.1. Paso 1: Recopilación de Insumos.....	37
A. Revisión bibliográfica exhaustiva y actualizada.....	37
B. Fuentes de datos espaciales.....	37
C. Mapa geológico y geomorfológico.....	39
2.8.1.2. Paso 2: Elaboración de la línea de costa.....	39
2.8.1.3. Paso 3: Escogencia de variables.....	40
2.8.1.4. Paso 4: Trabajo de campo.....	42
A. Protocolo Documentación de Campo.....	43
2.8.1.5. Paso 5: Procesamiento de los datos.....	44
2.9. Etapa 2: Cuantificación de variables.....	44
2.9.1. Rangos de IVC y valores de las variables.....	44
2.9.1.1. Cálculo y clasificación de la variable: “Tipo de Costa”.....	45
2.9.1.2. Cálculo y clasificación de la variable: “Litología”.....	45

2.9.1.3. Cálculo y clasificación de la variable: “Pendiente Costera”	46
2.9.1.4. Cálculo y clasificación de la variable: “Tasa de Cambio De La Superficie Terrestre”	46
2.9.1.5. Cálculo y clasificación de la variable: “Aumento del Nivel del Mar”	47
2.9.1.6. Cálculo y clasificación de la variable: “Altura Significativa De La Ola”	47
2.9.1.7. Cálculo y clasificación de la variable: “Amplitud Máxima de la Marea Astronómica”	48
2.10. Cartografía de las variables.....	49
2.10.1. Cartografía de la variable “Tipo de Costa”	51
2.10.2. Cartografía de la variable “Litología”	51
2.10.3. Cartografía de la variable “Pendiente Costera”	51
2.10.4. Cartografía de la variable “Tasa de cambio de la superficie terrestre costera (m/año)”	52
2.10.5. Cartografía de la variable “Aumento del nivel del mar (mm/año)”	52
2.10.6. Cartografía de la variable “Altura significativa de la ola (m)”	52
2.10.7. Cartografía de la variable “Amplitud máxima de la marea astronómica”	52
2.11. Cálculo del IVC.....	52
2.12. Prueba y Validación del IVC.....	54
2.12.1. Prueba del IVC.....	54
2.12.2. Validación del IVC.....	54
3.SECCIÓN III-ESTUDIO DE CASO.....	55
3.1. Área de estudio.....	55
3.2. Identificación de variables.....	57
3.3. Cuantificación de variables.....	57
3.4. Cartografía de variables.....	57
3.5. Cálculo del IVC.....	65
3.5.1. Datos resultantes del cálculo del IVC.....	66
3.6. Conclusiones y recomendaciones.....	99
4.SECCIÓN IV-MAPA GEOLÓGICO DE LA REGIÓN PACÍFICO CENTRAL, SECTOR BOCA BARRANCA - PUNTAS JUDAS, ESCALA 1: 25 000.....	100
4.1. Marco geológico regional y trabajos anteriores.....	100
4.2. Geología y estratigrafía local.....	106
5.LISTA DE REFERENCIAS.....	138
6.ANEXO.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la vulnerabilidad bruta. Fuente: Adaptado de Schröter y Metzger (2004) en Mendez et al. 2011.....	31
Figura 2. Cinco pasos esenciales para el cálculo y validación del IVC. Fuente: Datos propios, 2025.....	36
Figura 3. Pasos esenciales de la etapa 1. Fuente: Datos propios, 2025.....	37
Figura 4. Esquema de trabajo de campo para orientar las actividades que se llevarán a cabo.....	42
Figura 5. Guía de registro de campo para estandarizar la recolección de datos durante la investigación.....	43
Figura 6. Ejemplo de la cartografía de variables. Grillas establecidas sobre la línea de costa para la valoración correspondiente. Fuente: datos propios, 2025.....	50
Figura 7. Pasos esenciales a seguir en la etapa “Cálculo del IVC”. Fuente: Datos propios, 2025.....	53
Figura 8. Área de estudio en la región pacífico central desde la localidad de Boca de Barranca (distrito de El Roble) hasta Esterillos Oeste (distrito Parrita).....	55
Figura 9. Cartografía y distribución de la variable “tipo de costa (geomorfología)” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	58
Figura 10. Cartografía y distribución de la variable “litología” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	59
Figura 11. Cartografía y distribución de la variable “pendiente” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	60
Figura 12. Figura 3.5. Cartografía y distribución de la variable “tasa de cambio” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	61
Figura 13. Cartografía y distribución de la variable “aumento del nivel del mar” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	62
Figura 14. Cartografía y distribución de la variable “altura significativa de ola” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	63
Figura 15. Cartografía y distribución de la variable “amplitud máxima de la marea astronómica” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	64
Figura 16. Cartografía y distribución del “Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC)” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, 2025.....	65

Figura 17. Distribución del IVC de la línea de costa analizada (116,3 km) con el porcentaje correspondiente a cada valor de vulnerabilidad. Fuente: Datos propios, 2025.....	66
Figura 18. Resultado general del IVC de los depósitos inconsolidados (43,3 km) con el porcentaje correspondiente a cada valor de vulnerabilidad. Fuente: Datos propios, 2025.....	67
Figura 19. (PC285). Playa Tivives sector sur cerca de la desembocadura del río Jesús María. A y B) Se muestra un tipo de costa que desarrolla una playa muy extendida de bajo ángulo tanto lateral como hacia el océano con acumulación de materia vegetal por los efectos de la pleamar. C) indicativo de una plataforma continental muy extendida y una berma extendida a lo largo de la playa.....	70
Figura 20. (PC205). Playa Pógeres sector sur cerca de la desembocadura de la Quebrada Pita. A) un tipo de costa con playa extendida de ángulo bajo a moderado con desarrollo de berma con vegetación. B) aporte de guijarros y gravas del río.....	70
Figura 21.(PC061). Playa Blanca sector central. A) muestra los taludes de suelo producto de la meteorización de areniscas del Miembro Caletas de la Fm. Punta Carballo, que se da por la transición natural del litoral continente – océano y la influencia del oleaje marino. A y B) se muestra también los muros de retención para evitar la erosión costera.....	70
Figura 22. (PC304). Playa Blanca sector central. A) muestra los taludes de suelo producto de la meteorización de areniscas del Miembro Caletas de la Fm. Punta Carballo, que se da por la transición natural del litoral continente – océano y la influencia del oleaje marino. A y B) se muestra también los muros de retención para evitar la erosión costera.....	71
Figura 23.(PC054). Playa Matapalo sector sur. A y B) acantilados formados por las areniscas del Miembro Caletas de la Fm. Punta Carballo, con desarrollo de berma y vegetación trasera con alguna evidencia de erosión en la base de berma. Constituye una playa poco extendida hacia el océano cuyo basamento constituye plataforma de abrasión de la misma formación geológica.....	71
Figura 24. (PC314 y PC318). Playa Herradura sector central y sur respectivamente. A) El punto PC314 es la desembocadura de la Quebrada Cañablancal. Constituye una playa extendida de noroeste a sureste con desarrollo de una berma trasera de poca altura. Se puede observar el aporte fluvial de gravas y guijarro en la desembocadura de rías que generan acreción. B) Talud de suelo producto de la meteorización de basaltos de Complejo de Nicoya con erosión costera producto del oleaje de pleamar.....	72
Figura 25. (PC312). Playa Herradura sector sur. A y B) caída de árboles producto del oleaje y episodios de tormentas. La playa limita con acantilados de la misma formación geológica. C y D) se observan taludes de suelo producto de la meteorización de basaltos del Complejo de Nicoya, con erosión costera.....	72
Figura 26. (PC022 y PC023). Playa Jacó sector norte. A) constituye una playa extendida tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental extendida, con una berma extendida paralela a la playa. B y C) hay aporte de sedimentos fluviales de rías cerca de la costa generando acreción costera.....	73

- Figura 27. (PC018). Playa Jacó sector sur. A) constituye una playa extendida tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental extendida, con mezcla de sedimentos fluviales y marinos cerca de la costa. B) en la línea litoral hay erosión producto del oleaje de pleamar.....73
- Figura 28. (PC017). Playa Jacó sector sur. A y B) muestra la extensión de la playa y la construcción de muros pequeños locales para evitar la erosión producto del oleaje de pleamar. El sector sur está más sometido a los efectos del oleaje y erosión en relación al sector norte donde hay acreción.....74
- Figura 29. (PC034). Playa Hermosa sector noroeste. A y B) muestra la gran extensión de esta playa tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental muy extendida, con el desarrollo de una berma bien definida paralela a la playa, lo cual favorece la disipación de la energía del oleaje producto de las mareas y de la pleamar.....74
- Figura 30. (PC276). Playa Hermosa sector noroeste. A y B) muestra localmente el desagüe de drenajes de pequeñas quebradas hacia la costa con taludes de erosión menores a 2 metros y la presencia de materia vegetal por los efectos de la pleamar.....75
- Figura 31. (PC035). Playa Hermosa sector central. A) muestra la presencia de manglares cerca de la costa que actúan como amortiguadores naturales. B) evidencias de las mareas durante la pleamar en las bermas de playa con la acumulación de troncos en un tipo de costa de playa muy extendida y de muy baja pendiente....75
- Figura 32. (PC008). Playa Hermosa sector sur. A y B)muestra la amplia extensión de esta playa tanto lateral como hacia el océano (vista hacia Punta Judas), con desarrollo de una berma de poca altura hasta la vegetación.....76
- Figura 33. (PC003). Playa Esterillos Oeste sector oeste. A) muestra la gran extensión de esta playa tanto lateramente como hacia el océano indicativo de una plataforma continental extendida (vista hacia Punta Judas) donde se observa además pequeños taludes de erosión por los efectos de la pleamar. B) Se muestra un perfil de los sedimentos de playa constituidos por arenas finas a medias y limos de playa que también recibe sedimentos de la Quebrada.....76
- Figura 34. (PC256). Playa Corralillo. A) vista hacia el norte, se muestra un tipo de costa que desarrolla una playa muy extendida de bajo ángulo tanto lateral como hacia el océano. B) vista hacia el sur, se desarrolla entre acantilados y rocas del Miembro Mata de Limón.....78
- Figura 35. (PC289). Playa Tivives sector sureste. A y C) se muestran los efectos del oleaje y de pleamar en el borde costero y taludes de erosión. B) acumulación de materia vegetal por oleaje que indican el límite de la influencia marina, D) muestra una berma poco desarrollada.....80
- Figura 36. (PC286). Playa Tivives sector sureste. A) un tipo de costa que desarrolla una playa extendida y una berma bien desarrollada a lo largo de la playa. B) muestra los efectos de acumulación de ramas producto de la pleamar.....81
- Figura 37. (PC148). Playa Azul. A) un tipo de costa cerca de zona de manglar con desarrollo de una playa gravosa

B) se muestra mucho aporte de sedimentos del río Tárcoles (gravas y arenas).....	81
Figura 38. (PC146). Playa Azul. A y B) un tipo de costa de playa extendida con un buen desarrollo de berma y vegetación en la parte posterior (A vista hacia el sur y B hacia el norte).....	82
Figura 39. (PC203). Playa Pógeres. C y D) un tipo de costa de playa extendida con poco desarrollo de berma. A) se muestra algunos sistemas de protección locales para evitar la acreción e influencia marina, B) aporte de sedimentos fluviales de la Quebrada Pita. E y F) se muestra también la presencia de las rocas del sustrato rocoso de la playa que conforman la plataforma de abrasión del Miembro Roca Carballo.....	82
Figura 40. (PC059). Playa Mantas. C) un tipo de costa de playa formada en una bahía limitada por acantilados y plataforma de abrasión del Miembro Roca Carballo (norte de Punta Leona), B y D) se observa un buen desarrollo de berma A) se observa erosión en su base por efecto de la pleamar.....	83
Figura 41. (PC043). Plataforma de abrasión con acantilado Caletas. A) tipo de costa con muy poco desarrollo de playa en una saliente rocosa limitada por acantilados. B) plataforma de abrasión constituido por rocas del Miembro Caletas (sector Caletas).....	83
Figura 42. (PC055). Plataforma de abrasión con acantilado sector Coyol. Tipo de costa con muy poco desarrollo de playa en una saliente rocosa limitada por acantilados (A) y plataforma de abrasión (B) constituido por rocas del Miembro Caletas.....	84
Figura 43. (PC001). Plataforma de abrasión sector Punta Judas – Punta Mala. A y B) tipo de costa sin desarrollo de playa donde se expone la plataforma de abrasión constituida por areniscas de la Fm. Punta Judas.....	84
Figura 44. (PC300). Playa Guacalillo. Desarrollo de bermas, playa extensa y con inclinación muy baja.....	86
Figura 45. Espigón de enrocado en Playa Caldera, sector central.....	86
Figura 46. (PC298): Playa Caldera, sector norte. A y B) se muestra el enrocado de protección para ese sector de la costa por donde pasa la carretera.....	88
Figura 47. Playa Pita. Se muestran arenas y gravas por corrientes de resaca. Playa con pendiente baja sin berma desarrollada.....	89
Figura 48. (PC287): Playa Tivives, sector norte. Talud de berma erosivo de aproximadamente 1,5m de alto.....	89
Figura 49. Playa Agujas. Erosión de las bermas y raíces expuestas de palmeras.....	90
Figura 50. (PC313). Acantilados rocosos entre playa Herradura y Jacó. A) se muestra un acantilado al sur de Playa Herradura. B) acantilados con plataformas de abrasión de basaltos del Complejo de Nicoya, Playas Herradura y Jacó.....	92

Figura 51. (PC234). Playa Higuerón al norte de Guacalillo. A) Se muestra lahar con bloques de sobretamaño métrico en una matriz arenosa consolidada; B) Acantilados de la Formación Tivives.....	93
Figura 52. (PC148). Sedimentación por transporte de material de Estero Guacalillo.....	93
Figura 53. (PC235). Playa Higuerón al norte de Guacalillo. Cuevas formadas por la erosión del oleaje. A) Vista hacia el norte, cuevas en acantilado. B) Vista hacia el sur. Se observan las cuevas erosivas y sus dimensiones aproximadas en proporción con la escala de las personas.....	94
Figura 54. En la imagen se observa los tres tipos de costa que se observan en Boca del Barranca.....	95
Figura 55. A) La figura muestra el cambio de la costa por la infraestructura de hormigón de Puerto Caldera. B) Se observan los rompeolas que protegen la infraestructura.....	96
Figura 56. A) Muestra un acercamiento de la conformación de los acantilados de la Formación Mata de Limón. B). El Peñón de Tivives son acantilados compuesto por lahares.....	96
Figura 57. Sector norte de playa Mantas, se observa plataforma de abrasión con acantilado de la del Miembro Roca Carballo.....	97
Figura 58. A) Arcos formados por erosión en la Formación Tivives. B) Sector del Peñón de Tivives, muestra cuevas y socavamientos, pero se trata de salientes rocosas muy consolidadas de alta dureza. En la desembocadura del Estero Loros.....	97
Figura 59. Mapa geológico simplificado del bloque Herradura según Arias. 2003.....	107
Figura 60. Basaltos conformando plataformas de abrasión y acantilados de la zona litoral. Playa Punta Conejo (sitio PC050 a 1,4 km al noroeste de playa Herradura).....	108
Figura 61. Basaltos en el sitio de playa Balsal (sitio PC311, 3,7 km al noroeste de Jacó, sureste de Punta Bocana). A) Basaltos mostrando varias generaciones de fracturas y vetillas rellenas posiblemente de sílice y calcita, indicativo de su historia tectónica; B) Xenolito de radiolarita emplazado o asimilado por los basaltos.....	109
Figura 62. Basalto tipo almohadilla posiblemente de la formación Tulín. A) afloramiento en playa Faro Escondido al sur de Puerto Escondido, punto de documentación (PC119). B) afloramiento en quebrada sin nombre, calle Agüero a 1km a noroeste de Cañablancal, PC049.....	109
Figura 63. Basaltos muy meteorizados que presentan un color rojizo. Quebrada Bonita, sureste de playa Herradura, PC029.....	110
Figura 64. A) Textura de basalto. Formación Tulín, muestra PC030 (431350E/1060704N), polaroides //, ancho 10,5 mm. B) Textura de basalto. Formación Tulín, muestra C030, polaroides X, ancho 2,2 mm.....	111

Figura 65. A) Textura de la caliza silicificada con laminación (“packstone” radiolario-spiculita), muestra PC323 (437904E/1060424N). Fm. Espíritu Santo o parte superior de Fm. Tulín, polaroides //, ancho 10,5 mm. B) Textura de la caliza silicificada con laminación (“packstone” radiolario-spiculita), muestra PC323. Fm. Espíritu Santo o parte superior de Fm. Tulín, polaroides //, ancho 2,2 mm.....	112
Figura 66. Afloramiento de las calizas en Fila Negra, PC113.....	112
Figura 67. A) Brechas silicificadas color rosada que se observa en los cortes de camino hacia Fila Negra, PC 321, B) Muestra que claramente indica presencia de una falla cercana. PC 322.....	113
Figura 68. A) Textura de brecha silicificada. Formación Tulín, muestra B015, polaroides //, ancho 10,5 mm. Foto 35. B) Textura de brecha silicificada. Formación Tulín, muestra B015, polaroides X, ancho 2,2 mm.....	114
Figura 69. PC324: A) Depósito de areniscas de grano medio con aparente estratificación subhorizontal, muy cizallado y meteorizado. B) Plano de cizalla con aparentes estrías.....	114
Figura 70. A) Afloramiento en lomas Pita que colindan con el sector norte de la población Quebrada Ganado. Se observa posibles capas o láminas de roca desplazadas, sometidas a procesos erosivos y de meteorización, PC207. B) Afloramiento de bloques centimétricos a métricos que conforman la colina ubicada a un lado de la carretera la Costanera al NE del poblado de Quebrada Ganado, PC341.....	116
Figura 71. PC043: Miembro Caletas aflorando en los acantilados y plataformas de abrasión de la playa Caletas, donde se observan estratos de areniscas con espesores que varían de decimétricos a métricos, bien definidos y con una disposición subhorizontal.....	117
Figura 72. A) Textura de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra PC048 (428505E/1070878). Miembro Caletas, polaroides //, ancho 10,5 mm. Foto 117. B) Textura de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra PC048. Miembro Caletas, polaroides //, ancho 2,2 mm.....	118
Figura 73. A) Textura de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra PC204 (430890E/1078178N). Miembro Caletas, polaroides //, ancho 10,5 mm, Foto 126. B) de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra C044. Miembro Caletas, polaroides X, ancho 2,2 mm.....	119
Figura 74. Afloramiento del Miembro Icacó en playa Tivives, extremo norte, PC117 muestra las características litológicas del Miembro Icacó. A) los acantilados de mediana altura <10 m y las fracturas o discontinuidades paralelas al talud por descompresión de la roca; B) tipo de estratificación paralela y lenticular; C) areniscas de grano fino a medio gris verdoso; D) lentes de areniscas guijarrosas.....	120
Figura 75. Afloramientos del Miembro Mata de Limón en Punta Corralito, 1 Km al sur de Puerto Caldera (PC254 420523 E/1093936 N). A) Una secuencia subhorizontal de brecha volcánica multicolor que alternan con estratos de arenisca gruesa de origen fluvial. B) Detalle de un estrato de arenisca gruesa hasta conglomerado que forma una intercalación métrica dentro de las rocas volcánicas.....	121
Figura 76. Afloramiento de rocas volcánicas del Miembro Mata de Limón en un corte de la	

carretera principal, al oeste del puente Jesús María, PC109 (425889 E/1096237 N). A) Los bancos decimétricos hasta métricos de ignimbrita masiva. B) La roca tiene matriz fina, en ella flotan líticos de diversos tamaños, en su mayoría angulares.....121

Figura 77. Textura de la ignimbrita, muestra PC109 (425889 E/1096237 N). Miembro Mata de Limón, método DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de ignimbrita, muestra PC109. Miembro Mata de Limón, polaroides X, ancho 2,2 mm.....122

Figura 78. A) Textura de toba o tobita – arenisca lítica, muestra PC254. Miembro Mata de Limón, polaroides //, ancho 10,5 mm. B) Textura de toba o tobita – arenisca lítica, muestra PC254. Miembro Mata de Limón, polaroides //, ancho 2,2 mm.....122

Figura 79. Afloramientos del Miembro Roca Carballo en Playa Pirata, 1,2 Km al sur de Playa Doña Ana (PC297). A) Acantilado norte de la playa. Estratificación métrica. B) Estratos métricos con geometría tabular de areniscas medias hasta gruesas con laminación lenticular y estructuras de bioturbación ocasionales.....123

Figura 80. A) Textura de tobita calcítica – calcilita. Miembro Roca Carballo, localidad playa Doña Ana, muestra PC095 (418976 E/1101084 N), polaroides X, ancho 10,5 mm. B) Textura de tobita calcítica – calcilita. Miembro Roca Carballo, localidad playa Doña Ana, muestra PC095, método DF, ancho 2,2 mm..124

Figura 81. A) Textura arenisca lítica con bioclastos y calcita. Miembro Roca Carballo, muestra PC094 (419377 E/1101141 N), polaroides X, ancho 10,5 mm. B) Textura arenisca lítica con bioclastos y calcita. Miembro Roca Carballo, muestra PC094, polaroides //, ancho 2,2 mm.....125

Figura 82. Afloramiento de lahar de la formación Tivives en playa Bajamar. Punto de documentación PC233). Se trata de un afloramiento de gran tamaño que conforman acantilados de la playa, de textura masivo y polimícticos, con bloques sobre tamaño angulares y subredondeados. Matriz café claro a beige. La caída o meteorización de los clastos o bloques por la abrasión de las olas, dejan cavidades tipo cavernas. Sobre camino, hasta los 3.5km al noreste de Guacalillo se observan las partes distales de estos lahares (hiperconcentrado), con matriz de granulometría fina a gruesa, tobáceas, color crema. La parte basal es un flujo de lodo tobáceo y las areniscas líticas muestran estratificación cruzada por flujo un tanto turbulento del lahar. Es importante destacar la importancia de la falla Jesús María, dónde el bloque occidental se eleva a unos 100 m.....126

Figura 83. A) Textura de parte más fina (cemento) de brecha volcánica o lahar, muestra PC023 (425645 E/1088148 N). Formación Tivives, método DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de de parte más fina (cemento) de brecha volcánica o lahar, muestra PC023. Formación Tivives, polaroides X, ancho 2,2 mm.....126

Figura 84. Muestra PC108 (420772 E/ 1100900 N). A) Textura de ignimbrita, fuertemente caolinizada, Fm. Orotina, muestra B039, polaroides //, DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de ignimbrita, fuertemente caolinizada, Fm. Orotina, muestra B039, polaroides //, ancho 2,2.....127

Figura 85. Muestra PC222 (425502 E/ 1099241V) A) Ignimbrita color gris rosado con textura eutáxica, las vesículas de desgasificación se encuentran orientadas. B) Brecha piroclástica, medianamente soldada, meteorizados color amarillo, cuya matriz contiene óxidos de hierro.....128

Figura 86. A) Exposición de la Fm. Punta Judas en la plataforma de abrasión de Punta Judas en estratos decimétricos en el punto PC001 (444400E / 1053121N); (B) Un acercamiento al tipo de roca constituido por una arenisca lítica de grano medio color gris; (C) Muestra el contenido bioclástico de algunos estratos lenticulares de la Fm. Punta Judas.....129

Figura 87. A) Exposición de la Fm. Punta Judas en la plataforma de abrasión de Punta Judas. Estratos decimétricos con dirección de buzamiento de 085° y buzamiento de 15° en el sitio PC001 (444400E / 1053121N); (B) Muestra la presencia de lentes de brechas finas volcanoclásticas contenidas dentro de las areniscas.....129

Figura 88. (A y B) Muestra la presencia de macrofauna de moluscos indicadores del ambiente de sedimentación de la Fm. Punta Judas. Sitio PC349 (445800E / 1055470N) en un afluente de la Quebrada Aserradero.....130

Figura 89. (A y B) Muestra la presencia de bioturbación (thalassinoides) como indicadores del ambiente de sedimentación de la Fm. Punta Judas. Sitio PC349 (445800E / 1055470N) en un afluente de la Quebrada Aserradero.....130

Figura 90. PC001: A) Textura de la muestra de arenisca lítica de la Fm. Punta Judas (método DF, ancho 10,5 mm), muestra los componentes líticos epiclásticos retrabajados. B) Textura de la misma arenisca (nicols paralelos, ancho 2,2 mm) mostrando el soporte por clasto y cemento intersticial de calcita.....130

Figura 91. Depósitos de paleo-abanico aluvial en el sitio PC351, constituido por bloques, gravas y arenas en una matriz areno limosa meteorizada, formando parcialmente un suelo residual (A y B). Las fotos C y D muestran los componentes de rocas volcánicas con fuerte alteración hidrotermal (silicificación).....131

Figura 92. Depósitos de paleo-abanico aluvial en el sitio PC348, sobreyaciendo la Fm. Punta Judas como relictos meteorizados (A y B). Afluente de la Quebrada Aserradero.....132

Figura 93. Depósitos de paleo-abanico aluvial (C) en el sitio PC346, sobreyaciendo a la Fm. Punta Judas como bloques de arrastre de la quebrada. Todos los componentes presentan alteración hidrotermal (silicificación) (A y B). Afluente de la Quebrada Aserradero.....132

Figura 94. A) Paleoterraza en afloramiento PC175 con bloques de hasta 15 cm de diámetro, grava, en matriz arenosa; B) Paleoterraza en afloramiento PC180 presenta clastos redondeados en matriz arenosa.....133

Figura 95. Paleoterrazas aluviales: A) afloramiento PC066. Se observan sedimentos aluviales con gravas, arenas y suelos menores a 1m; B) Paleoterraza en afloramiento, donde se observa intercalación de capas de arenas medias a finas limosas.....133

Figura 96. Gran bloque coluvial de la Formación Mata de Limón en afloramiento del punto PC197.....134

Figura 97. Depósitos fluviales. A) Río Barranca, 1km Noreste de Cabezas (PC199): Aluviones del río desde gravas hasta clastos de 30cm. B) Quebrada Caña Blancal (PC065): sedimentos de grava fina hasta media (1,5m espesor) y suelo sobreyacente de arena fina (2m) con algunos clastos de 2-3cm.....134

Figura 98. Depósitos fluviales en río Tulín en punto. A) Margen derecha río Tulín: Gravas y arenas, matriz de hasta 7cm. B) Margen izquierda se observan limos y arenas estratificados con suelos aluviales (3m arenas y limos; 0.5m grava).....135

Figura 99. Depósitos de manglar en los sitios PC231 (425470E/1088903N) (A) y PC169 429643E/1085106N) (B).....135

Figura 100. Depósitos de playa PC329 : vista hacia el oeste de playa Caldera (A) y en playa Tivives (B).....136

Figura 101. Puerto de Caldera, punto PC258: A) Estructura de concreto y enrocado del rompeolas del puerto de Caldera. B) Parte del puerto donde anclan los barcos. C) Playa Herradura, punto PC314, se observan hoteles alrededor de la desembocadura de la Quebrada Cañablancal en el sector de la playa Herradura.....137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Organización de trabajo de la cooperación triangular.....33

Tabla 2. Clasificación de datos LIDAR según la Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) por sus siglas en inglés. Fuente: Proyectiva et al., 2024.....38

Tabla 3. Definición de las variables seleccionadas para el cálculo del IVC.....41

Tabla 4. Características de las variables seleccionadas para el cálculo del IVC.....42

Tabla 5. Variables y rangos utilizados para la estimación del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC). Fuente: Datos propios, 2025.....49

Tabla 6. Listado de playas incluidas en la longitud de línea de costa estudiada.....56

Tabla 7. Resultados obtenidos para vulnerabilidad muy alta (5), a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 21,09 km (18,1 %) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de costa analizados para cada tipo de costa.....69

Tabla 8. Resultados obtenidos para vulnerabilidad alta (4), a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 29 km (25%) del área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de costa analizados para cada tipo de costa.....79

Tabla 9. Resultados obtenidos para vulnerabilidad moderada (3) a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km) correspondiente a 35,4 km (30%) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de tipos de costa analizados.....86

Tabla 10. Resultados obtenidos para vulnerabilidad baja (2) de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 14,8 km (12,7%) de área de estudio.....91

Tabla 11. Resultados obtenidos para vulnerabilidad muy baja (1) a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km) correspondiente a 16,1 km (13,8 %) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de tipos de costa analizados.....95

ABREVIATURAS

ANM Aumento del nivel del mar.

CC Cambio Climático.

ČGS Servicio Geológico de la República Checa.

CMEMS *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*.

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

DA Dirección de Aguas.

DGM Dirección de Geología y Minas.

DOI Identificador de objeto digital.

ECG Escuela Centroamericana de Geología.

E.E.U.U. Estados Unidos de América.

Hs Altura Significativa de la Ola.

ICT Instituto Costarricense de Turismo.

IGP Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico de Cuba.

IGN Instituto Geográfico Nacional.

INM Aumento acelerado del nivel del mar.

INTA Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.

IMN Instituto Meteorológico Nacional.

INVU Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo.

IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IVC Índice de Vulnerabilidad Costera.

IOD Identificador de objetos digitales.

LIDAR Acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging*.

LC Línea de costa

Mb Miembro.

MDE Modelo digital de elevación.

MDT Modelo digital del terreno

MINAE Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica.

MIOCIMAR Módulo de Información Oceanográfica del Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología.

MOPT Ministerio de Obras Públicas y Transporte.

NDWI Índice de Agua de Diferencia Normalizada,

PC Pacífico Central.

PD Punto de documentación.

P.O.C Plateau Oceánico Caribe.

RPC Región Pacífico Central.

SENARA Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

SIG Sistemas de Información Geográfica.

SINAC Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

SINAMOT Sistema de Nacional de Monitoreo de Tsunamis de la Universidad Nacional.

SNIT Sistema Nacional de Información Territorial.

SWH Significant wave height.

UCR Universidad de Costa Rica.

UE Unión Europea.

USGS Servicio Geológico de Estados Unidos.

XDR Difractometría de Rayos X.

ZMT Zona Marítimo Terrestre.

ABREVIATURA UNIDADES DE MEDIDAS

km kilómetro

cm centímetro

mm milímetro

dm decímetro

°C grados centígrados

° grados

mm/año milímetros por año

1. SECCIÓN I-INTRODUCCIÓN

1.1. LA COOPERACIÓN TRIANGULAR

La presente Guía Metodológica fue posible gracias a la cooperación triangular entre la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica (DGM), el Instituto de Geología y Paleontología - Servicio Geológico de Cuba (IGP) y el Servicio Geológico de la República Checa (ČGS).

La DGM del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), fue creada en el año 1953 y se define su organización y funcionamiento con la promulgación de la Ley 6797 “Código de Minería” en el año 1982. Sus funciones están relacionadas con la administración de los recursos minerales del país y con el desarrollo del conocimiento geológico del territorio nacional a través de la elaboración del mapa geológico y de otros proyectos de investigación de índole geocientífico, con el fin de contribuir con la Administración en la toma de decisiones y lograr el aprovechamiento racional de los georecursos, acorde con las necesidades humanas y en equilibrio con el medio ambiente. Esta dirección comprometida con la transferencia e intercambio de conocimientos y el fortalecimiento de capacidades de las instituciones públicas y de los gobiernos locales, proporciona insumos de índole geológico para robustecer la toma de decisiones en beneficio de las comunidades y del país.

El IGP fundada en el año de 1967 ha desarrollado la estimación y cartografía a escala 1: 50 000 del Índice de Vulnerabilidad Costera a lo largo de diferentes sectores costeros de la isla de Cuba, aportando dicho insumo al macroproyecto de la República de Cuba que tiene por nombre “Escenarios de Peligro y Vulnerabilidad de la Zona Costera Cubana, asociados al ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100”. Este es un proyecto multi institucional y multidisciplinario donde participan aproximadamente 15 instituciones cubanas, con el objetivo de alertar a las autoridades decisoras de ese país acerca de las posibles afectaciones a la zona costera que provocaría el ascenso del nivel medio del mar debido al CC, para los años 2050 y 2100. Es por esta razón que el IGP, se posiciona como una de las instituciones latinoamericana con pericia en el desarrollo de mapas de vulnerabilidad costero regionales considerando la variable geológica.

El ČGS es un instituto de investigación del Ministerio de Medio Ambiente de la República Checa. Su misión, cuya historia comenzó en 1919, es la administración del servicio geológico estatal. Recopila y evalúa datos sobre la estructura geológica del territorio checo. Los principales campos de especialización incluyen investigación geológica y cartografía geológica con avance tecnológico y la estandarización de calidad de mapas a diferentes escalas. Otros campos incluyen el estudio de los recursos minerales y evaluación del impacto minero, la hidrogeología, riesgos naturales, geoquímica y estudios ambientales. Además, tiene una amplia trayectoria en el desarrollo de proyectos de cooperación en África, Asia y América. En América Central ha realizado mapas geológicos y mapas de riesgo y vulnerabilidad (Nicaragua, El Salvador y Costa Rica) desde el año 1997 hasta el año 2012, realizando en Costa Rica mapas geológicos que incluyen parcialmente sectores marino costero.

La cooperación triangular entre el DGM, el IGP y ČGS la representa una alianza estratégica orientada al fortalecimiento de las capacidades técnicas e institucionales en materia de geociencias aplicadas a la gestión territorial y la reducción del riesgo costero.

Guía Metodológica

Este modelo de cooperación permite combinar la experiencia metodológica y tecnológica del ČGS, el conocimiento aplicado y regional del IGP, y la capacidad de gestión y contextualización nacional de la DGM, generando un intercambio de saberes, tecnologías y metodologías que trasciende los enfoques tradicionales de cooperación triangular. A través de esta sinergia, transfiere metodologías, estandarización y procesos para desarrollar productos cartográficos de alta calidad que fortalezcan la evaluación de la vulnerabilidad costera y promueve la toma de decisiones basadas en evidencia científica para la adaptación del CC en Costa Rica y la región.

1.2. MARCO LEGAL

La zona costera de Costa Rica es una franja de transición entre los sistemas terrestres y marinos. Está representada por una longitud total de 1.228 km, de los cuales 1.016 km corresponden a la costa del Pacífico y 212 km a la costa del Caribe, según la definición del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Desde el ámbito administrativo, la Ley N.º 6043 del 2 de marzo de 1977 establece en su artículo 9 que la Zona Marítimo Terrestre (ZMT) comprende una franja de doscientos metros de ancho a lo largo de los litorales del Atlántico y del Pacífico. Los primeros cincuenta metros constituyen la zona de uso público, mientras que los ciento cincuenta metros restantes corresponden a una zona de uso restringido, en la cual las actividades están sujetas a regulación estatal.

Asimismo, la ley dispone que los islotes, peñascos y demás formaciones naturales que sobresalgan del mar forman parte de la zona pública, al igual que todas las áreas de manglares, esteros y zonas inundables de los litorales continentales e insulares, sin importar su extensión.

De acuerdo con esta normativa, la zona marítimo-terrestre es patrimonio nacional, propiedad del Estado, y posee carácter inalienable e imprescriptible. Dentro de sus límites, se prohíbe realizar cualquier tipo de explotación de la flora o fauna, delimitar terrenos mediante cercas o construcciones, levantar edificaciones o instalaciones, talar árboles, extraer recursos naturales o desarrollar actividades u ocupaciones sin la autorización legal correspondiente (Cajiao, 2005).

El IGN se encarga de la demarcación y amojonamiento de la línea de costa oficial, la cual se define como el límite entre la tierra firme y el mar, generalmente siguiendo el nivel medio del mar. La línea de costa oficial vigente se basa en un mosaico de fotografías aéreas del año 2007 (IGN).

En lo que respecta a la gestión, conservación y planificación del uso de la zona costera, esta es responsabilidad de varias instituciones, tal como lo establecen la Ley de Planificación Urbana, el Reglamento para la Construcción de Marinas, la Ley Orgánica del Ambiente, la Ley de Biodiversidad, la Ley Forestal, así como los convenios Ramsar y del Mar. Estas normativas facultan al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) para la gestión, conservación y desarrollo sostenible de los recursos naturales de la zona marítimo-terrestre.

El Instituto Costarricense de Turismo (ICT) es el principal ente encargado del desarrollo de la ZMT, lo que demuestra el interés estatal por cubrir las áreas costeras de actividades turísticas, desde hoteles hasta marinas. Participa en la elaboración de planes reguladores costeros, especialmente en áreas turísticas, y otorga concesiones en la zona marítimo-terrestre. Por su parte, la Comisión Nacional de División Territorial puede emitir informes y proyectos de ley relacionados con la delimitación de la ZMT. Asimismo, los gobiernos locales tienen competencia

para aplicar la Ley N.º 6043 en el otorgamiento de concesiones en la ZMT, especialmente para usos no turísticos, y han desarrollado los planes reguladores que permiten, desde la parte administrativa y política, decidir cuáles son las actividades que se permiten o no en esas zonas, procurando el mejor desarrollo de sus regiones y la armonía con la naturaleza.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Las zonas litorales del Pacífico y Caribe de Costa Rica se caracterizan por una dinámica compleja de interacciones entre procesos en el área de acción marina directa o intermareal, incluidos los relieves fosilizados que se conservan como testimonio de los cambios en el nivel relativo del mar, ya sea por factores tectónicos o climáticos ocurridos durante el periodo geológico del Cuaternario (Brenes, 2005). Al igual que otras zonas costeras del mundo, estas áreas son vitales para el desarrollo socioeconómico del país, considerando su ubicación, características abióticas y bióticas, crecimiento urbano y recursos naturales. Sin embargo, también están sometidas a cambios significativos debido al CC, procesos geológicos y la influencia humana, lo que genera vulnerabilidad o susceptibilidad a sufrir daños o efectos adversos.

En el resumen técnico del Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6-IPCC, 2022) se indica que este ya está afectando a todas las regiones habitadas del planeta, y que la influencia humana ha contribuido a muchos de los cambios observados en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Muchos de estos cambios serán irreversibles durante siglos o milenios, especialmente los relacionados con los océanos, los mantos de hielo y el nivel global del mar. Una consecuencia del CC es el aumento acelerado del nivel del mar (INM), que contribuye a incrementar la frecuencia y la gravedad de las inundaciones costeras en las zonas bajas, así como la erosión en la mayoría de las costas arenosas. Según este mismo informe, América Central se ve afectada por el aumento del nivel medio del mar, evidenciado en procesos como la erosión costera, las marejadas ciclónicas y las inundaciones. Datos altimétricos de los últimos 20 años (1992 a 2011) muestran que el Caribe de Costa Rica tiene una clara tendencia de aumento de 1-2 mm/año, y el Pacífico una tendencia de disminución, ~ -1 mm/año (BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013). Otros estudios señalan que el aumento del nivel del mar (ANM) amenaza ciudades como Puntarenas, Quepos y Golfito (Proyectiva et al. (2024).

Los procesos geológicos son fundamentales en la dinámica costera, porque dan forma al relieve (acantilados, playas, etc.), influyen en la disponibilidad de sedimentos, y determinan la interacción de las zonas costeras con otros procesos oceanográfico e hidrodinámicos, como las olas, corrientes marinas y el aumento del nivel mar (ANM). El tipo de roca que constituyen las costas, está directamente relacionado con la resistencia ante el ANM, ya que por su composición, dureza y consolidación determinan procesos erosivos, es decir, su facilidad para ser desgastada y transportada por agentes como el agua o el viento. Rocas blandas y poco consolidadas, como depósitos fluviales y de playa, calizas, etc. se erosionan más rápido que las rocas con mayor dureza tales como rocas lavas, etc. La estructura de las rocas, con estratos de diferentes resistencias, también da origen a paisajes muy diversos. Todos estos procesos se pueden representar a través de la cartografía geológica que permite una comprensión holística de los riesgos y amenazas que enfrentan las zonas costeras en un área geográfica, identificando patrones espaciales de exposición, sensibilidad, capacidad de adaptación y resiliencia. En general la geología con sus procesos geomorfológicos, tectónicos, geodinámicos, litológicos, entre otros, definen las características físicas actuales de las costas que pueden ser más o menos vulnerables a los cambios por el ANM.

Guía Metodológica

Ante esta preocupación se ha realizado diferentes estudios de vulnerabilidad y riesgo en Costa Rica, aplicados a localidades específicas (Cárdenes & Obando, 2005; Lizano, 1997, 2006, 2013; Lizano & Salas 2001, BOIMARCC-SINAC-GIZ, 2013, Proyectiva et al., 2024, entre otros).

A nivel internacional, la principal referencia en estudios de vulnerabilidad costera de carácter regional es la del USGS, que utiliza la metodología del IVC. Esta metodología fue creada con el objetivo de desarrollar una base de datos sobre riesgos costeros en ese país y, posteriormente, se adaptó para los análisis de vulnerabilidad de los litorales estadounidenses. Aunque nuestro país no cuenta con bases de datos oceanográficas tan robustas como las de Estados Unidos de América (EE. UU.), la versatilidad de esta metodología nos permite emplear información satelital de forma alternativa para suplir los vacíos de datos.

Finalmente, los estudios regionales permiten comprender el problema a una escala más amplia, proporcionando la base técnica y científica para elaborar estrategias de ordenamiento territorial, planes de adaptación al CC y políticas de gestión del riesgo costero que sean coherentes y efectivas para toda la región.

1.3.1. Importancia socioeconómica de la región del Pacífico central

Los cantones de Esparza y Garabito conforman una región costera de relevante dinamismo económico dentro del Pacífico Central costarricense. Su economía se caracteriza por una combinación de actividades tradicionales y servicios vinculados al turismo, el comercio y la pesca artesanal, los cuales aprovechan tanto los recursos naturales como la posición estratégica de ambos cantones frente al litoral pacífico.

En el caso de Esparza, la economía ha mantenido una base agrícola y de servicios complementarios al comercio regional. Destacan cultivos como el café, caña de azúcar, palma aceitera y frutales, junto con una creciente diversificación hacia actividades logísticas e industriales por su cercanía con el Puerto de Caldera, uno de los principales puntos de exportación del país. Las zonas costeras esparzanas, particularmente las cercanas al Golfo de Nicoya, también presentan comunidades dedicadas a la pesca artesanal, recolección de moluscos y actividades turísticas de pequeña escala, como tours costeros y gastronomía marina.

Por su parte, Garabito se ha consolidado como uno de los cantones más turísticos del país. Su cabecera, Jacó, es un destino de gran afluencia nacional e internacional, caracterizado por el desarrollo de infraestructura hotelera, condominios, restaurantes, comercio y actividades recreativas vinculadas al mar, como el surf, pesca deportiva y turismo náutico. Esta orientación hacia los servicios ha transformado la estructura económica local, generando empleo y dinamizando sectores como la construcción, el transporte y la oferta de bienes y servicios turísticos.

En conjunto, Esparza y Garabito reflejan el potencial económico de la franja costera puntarenense, donde la interacción entre actividades productivas tradicionales y el turismo costero configura un eje de desarrollo clave para la región del Pacífico Central de Costa Rica.

1.4. MARCO CONCEPTUAL

1.4.1. Cambio Climático

Aunque existen diferentes definiciones con sus correspondientes especificidades, las mismas concuerdan en definir el “Cambio climático” como una variación del estado del sistema climático de la Tierra, conformado por sus distintas esferas: atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera (algunos autores incluyen la criosfera, separando

los casquetes polares y glaciares de la hidrosfera), la cual debe perdurar lo suficiente como para alcanzar un nuevo equilibrio o estado.

Estos cambios han ocurrido a lo largo de toda la historia de la Tierra, siendo los mejores documentados los correspondientes al período geológico más reciente, conocido como Cuaternario (2,5 últimos millones de años). Durante el mismo han tenido lugar glaciaciones o períodos glaciales, en los cuales disminuyó notablemente la temperatura global, se expandieron los casquetes polares cubriendo de hielo grandes extensiones continentales al tiempo que descendía decenas de metros el nivel de los océanos y mares, en lo que se denomina regresión marina. Dichos períodos se intercalaron con los interglaciares: intervalos de ascenso de la temperatura, reducción de la extensión y espesor de los glaciares, ANM a expensas de la fusión de los hielos y reducción de las tierras emergidas, a lo que se llama transgresión marina. Desde comienzos de la época geológica actual (el Holoceno, hace aproximadamente 11700 años) nos encontramos en condiciones interglaciares y transgresivas con temperaturas cálidas no experimentadas desde hace 125000 años y la correspondiente elevación, gradual, del nivel del mar.

Para explicar estos cambios climáticos han surgido varias hipótesis, la mayoría de las cuales aceptan el origen natural de las principales causas, destacándose entre ellas las variaciones de algunos parámetros de la órbita terrestre como la excentricidad, que define la mayor o menor semejanza de su trazado con un círculo o una elipse, la inclinación, en la vertical u oblicuidad, del eje imaginario del planeta y la precesión que se refiere al cambio de orientación de dicho eje. Las variaciones o cambios de cada uno de estos parámetros tienen su propia periodicidad, conocidas colectivamente como “Ciclos de Milankovic” (por el apellido del astrónomo y geofísico serbio, autor de esta teoría) y en su conjunto originan alteraciones cíclicas en la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra. Estos intervalos de aumento o disminución de la radiación solar influyen directamente en el clima de nuestro planeta, lo que a su vez repercute en el avance y retroceso de las masas de hielo y de los límites entre los terrenos sumergidos y los emergidos.

Otro elemento de notable influencia en el clima es el comportamiento de la circulación a escala global de las aguas del océano, conocida como la corriente termohalina y de su temperatura que depende de parámetros como el contacto con el aire del Ártico, la salinidad, densidad, profundidad y otros. Si esta corriente se parase o cambiase sus patrones de funcionamiento, el planeta podría enfriarse y el norte de Europa sería menos habitable, llegando a poderse producir un enfriamiento de hasta 7°C en latitudes altas del Hemisferio Norte y un calentamiento de 1-2°C en el Hemisferio Sur (Duarte, Alonso, Benito, Dachs, Montes, Buendía, Ríos, Simó & Valladares, 2006).

También hay que considerar los denominados factores desencadenantes variables, que influyen en el calentamiento global, como son las erupciones volcánicas, pues las partículas emitidas pueden permanecer durante años en la atmósfera, reflejando grandes cantidades de radiación solar y la actividad antrópica. Respecto a este último factor, los datos manejados por la mayor parte de la comunidad científica evidencian una aceleración de las tasas del incremento de los valores de temperatura, el llamado “Calentamiento global” como consecuencia del aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera por las actividades desarrolladas por los humanos (el conocido efecto de invernadero).

Entre las principales afectaciones o consecuencias negativas que se atribuyen al CC se relacionan el incremento de las sequías y en consecuencia de los incendios; así como cambios en la biosfera que provocan la migración de especies fuera de su hábitat natural. Especial connotación para las zonas costeras de todo el planeta la elevación del nivel del mar y el incremento de la intensidad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos adversos.

Guía Metodológica

A nivel mundial se han hecho esfuerzos para desarrollar políticas, agendas, programas y proyectos que contribuyan a la resiliencia ante el CC y absorber perturbaciones con la suficiente rapidez que permita recobrase de los disturbios climáticos. Como un ejemplo de estos esfuerzos son los estudios científicos con diferentes enfoques, relacionados a escenarios de peligro y vulnerabilidad de las zonas costeras asociados al ascenso del nivel del mar, los cuales han contribuido a incrementar el conocimiento, con vista a proponer medidas de adaptación, prevención, mitigación, planificación y conservación.

El gobierno de Costa Rica a través de la institucionalidad coordina y gestiona la política pública de CC, promoviendo la integración de una agenda climática en la gestión pública. Esto incluye políticas de prevención, mitigación, adaptación y transversales.

Instituciones como las municipalidades, CNE, MOPT, INVU, MINAE, el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), entre otros, son los encargados de poner en marchas estas políticas para enfrentar los desafíos del CC. De ahí la necesidad de proveer buenas prácticas a nivel técnico y científico con la generación de distintas metodologías y de herramientas o instrumentos operacionales (bases de datos, mapas, sistemas de información geográfica (SIG), Observatorios, etc.) para mejorar las capacidades de los gestores litorales y así mismo la mejora en la toma de decisiones.

1.4.2. Elevación del nivel del mar: consecuencias y afectación

Existen numerosas evidencias a nivel global, regional y local (mediciones de mareógrafos, de altímetros instalados en satélites de observación científica, constatación directa de los habitantes de poblaciones costeras, etc.) del incremento, cada vez más acelerado, del nivel medio del mar y también hay consenso generalizado en la comunidad científica internacional en cuanto a la correspondencia de este fenómeno con el Calentamiento global. En el Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre el CC (AR6-IPCC) se menciona que el aumento en el nivel del mar es claro y alarmante.

Se estima que entre 1901 y 2018, el NMM aumentó entre 15 y 25 cm, como promedio mundial (IPCC, 2021). Datos de mediciones de radar satelital revelan un valor de 7,5 cm entre los años 1993 y 2017, lo cual indica una aceleración de la tasa anual. Las proyecciones para este siglo y los modelos en los que se basan varían. El informe citado, del 2021, se refiere a 3 escenarios según la reducción o aumento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, con ascensos del NMM estimados para el año 2100 de 28-55 cm, 44-76 y 63-101 cm, respectivamente.

Se concluye que para la costa Caribe de Costa Rica se ha presentado un incremento de la tasa de cambio del nivel, la cual se ha casi que duplicado, esto tras comparar los resultados de los periodos analizados, los cuales están distanciados aproximadamente 50 años.

Las afectaciones a la zona costera, asociadas a la elevación del nivel del mar, pueden ser a mediano o largo plazo, de forma irreversible por la inundación permanente o por erosión costera; así como daños temporales resultantes del impacto de eventos meteorológicos severos. El incremento en la magnitud de dichas afectaciones es directamente proporcional a la elevación del nivel medio del mar. Los principales impactos negativos se resumen en:

- a) Pérdida de superficie por inundación o por retroceso de la línea de costa a causa de la erosión.

b) Deterioro o destrucción de formas del relieve costero que funcionan como substrato de ecosistemas específicos (dunas, humedales) y a la vez constituyen defensas costeras naturales.

c) Deterioro de obras de protección de origen antrópico; así como de instalaciones y asentamientos poblacionales

Para contrarrestar estas pérdidas en los órdenes económico, social o ecológico, la sociedad debe conocer en detalle los factores que controlan el medio litoral, así como su interacción, con el fin de facilitar la gestión de estos riesgos y poner en práctica conceptos como “resiliencia”, que es la capacidad de auto organizar el sistema ante cambios modificables mediante retroalimentación negativa.

1.4.3. Dinámica costera

En teoría, debe existir un balance entre los ingresos a un sistema costero (la acumulación de sedimentos) y los egresos del mismo (la erosión, compuesta por la abrasión y el transporte o acarreo de sus productos). Esta interrelación depende de la interacción de un conjunto de factores morfolitogénicos (geólogo - estructurales, tectónicos, geomorfológicos, quimiogénicos, climato – meteorológicos, fluviales, biogénicos, antropogénicos y otros) en un entorno que no solo se circunscribe a la zona costera sino que puede incluir condiciones, procesos y acciones en cuencas hidrográficas que tributen a ese sector del litoral o en territorios aparentemente desvinculados al mismo (cambios de cobertura y usos del territorio, construcción de embalses e infraestructuras, extracción de recursos minerales, modificaciones de ecosistemas y cambios en el régimen de precipitaciones, etc.). Un balance sedimentario negativo, indica el predominio de la erosión e induce tanto la pérdida de sedimentos como el retroceso de la línea de costa.

Cualquier manejo o intervención en la zona costera debe tener en cuenta los intereses de uso y las causas del comportamiento del balance sedimentario, especialmente el negativo, es decir la erosión por su impacto adverso en los ecosistemas, la seguridad y la economía de las comunidades costeras, a partir de los daños al substrato abiótico de ambos. Otro aspecto a considerar son las escalas espacio-temporales, dependiendo de los fenómenos actuantes, las cuales diferencian los procesos erosivos ligados a fenómenos extremos de baja frecuencia y alta implantación, es decir, los eventos meteorológicos extremos, donde los sedimentos, tras ser erosionados, retornan al sistema sedimentario litoral, de los procesos de erosión a largo plazo, los cuáles, dado que existe un balance sedimentario negativo, conllevan tanto la pérdida de sedimentos y retroceso de la costa, como un fortalecimiento de los daños asociados a este tipo de fenómenos.

En un acápite anterior se describió la relación CC – Calentamiento global – elevación del nivel del mar. Desde la formulación en 1962 de la Ley o Regla de Bruun con sus posteriores adaptaciones y modificaciones, se estableció la relación lineal entre el ANM y la recesión o retroceso de la línea de una costa arenosa, como resultado de la tendencia del perfil de playa a mantener el equilibrio y la deposición en el fondo sumergido del material erosionado en la parte emergida. Esta regla predice que el retroceso hacia tierra debe superar entre 10 y 50 veces la medida del ANM, en dependencia del valor de la pendiente de la playa.

Los métodos para el estudio de la erosión costera pueden clasificarse en:

- Visual – observacionales: inventario de evidencias como escarpes abrasivos y exposición del sistema radicular de los árboles; inundación o destrucción de instalaciones construidas más al interior del área intertidal.
- Analítico – empírico: muestreo y análisis granulométrico para establecer la dirección del transporte; mediciones de las dimensiones ancho y altitud de los distintos componentes del perfil o eje transversal mar – Tierra.

Guía Metodológica

- Estadístico – demostrativos: procesamiento estadístico de los datos obtenidos por los métodos considerados de la clase anterior; análisis espacio – temporal de la posición de la línea de costa.

Por lo tanto, comprender y abordar la relación entre los procesos y factores de la dinámica costera, especialmente las causas y consecuencias de la erosión costera es fundamental para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación que permitan proteger las zonas costeras y enfrentar los desafíos asociados al CC.

1.4.4. Vulnerabilidad Costera

La vulnerabilidad costera es el grado de susceptibilidad de una zona litoral a sufrir daños o efectos adversos debido a un peligro, como el ANM.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) expone que la vulnerabilidad refleja la capacidad de un sistema o subsistema para afrontar la variabilidad climática y eventos extremos, además que el término “vulnerabilidad” puede referirse al sistema vulnerable como tal (p.ej. las islas bajas o las ciudades costeras), al impacto en ese sistema (p.ej. la inundación de las ciudades costeras y de las tierras destinadas a la agricultura), o al mecanismo que provoca estos impactos (p.ej. la desintegración del manto de hielo de la Antártida occidental) (IPCC, 2007; IPCC, 2014). Los impactos claves y las vulnerabilidades resultantes, se pueden encontrar en muchos sistemas sociales, económicos, biológicos y geofísicos (Fernandez, Bértola & Campo, 2017). Wilches-Chaux (1989), inclina el término vulnerabilidad hacia la capacidad de una comunidad de absorber el cambio, mediante un “autoajuste”.

Según Klein y Nicholls (1999), la vulnerabilidad se compone de tres elementos: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de un sistema frente a los impactos de un fenómeno o riesgo, como el CC. La exposición se refiere a la presencia de elementos (sistemas naturales o humanos) en la zona de impacto. La sensibilidad es la capacidad de estos elementos de ser afectados por el cambio o el riesgo y la capacidad de adaptación es la habilidad de los sistemas para ajustarse, modificar o reestructurar sus respuestas a los impactos de dicho riesgo. Este modelo ha sido adaptado en diferentes estudios (Ramos, Zavala-Cruz, Gama, Pech & Ortiz, 2016; Denis, Cabrera, Núñez, Triff & Peñalver, 2019; Gornitz et al., 1992; Shaw, Taylor, Forbes, Ruz & Solomon, 1998; Thieler et al., 1999; Ojeda, Álvarez, Martín & Fraile, 2009; Mendez, Ceacero, Ordoñez, Álvarez, Peláez, Robles, Ojeda, Francoso, Cajaraville, Fraile-Jurado, Vallejo & Márquez, 2011; BIOMARCC -SINAC- GIZ, 2013) y coinciden que la exposición, resistencia y resiliencia son quienes determinan en el contexto físico, de la vulnerabilidad, que de conjunto con la sensibilidad componen la Susceptibilidad e Impacto Potencial, es decir la llamada vulnerabilidad bruta; a la cual se suma la capacidad de adaptación para determinar la vulnerabilidad neta, ver Fig. 1. Por lo cual, los efectos del INM pueden impactar los recursos costeros, pero estos serán mayores en regiones con capacidad de adaptación reducida (Ramos et al., 2016).

La geología como ciencia proporciona los insumos para evaluar la vulnerabilidad desde el componente EXPOSICIÓN que representa el medio físico abiótico del sistema litoral.

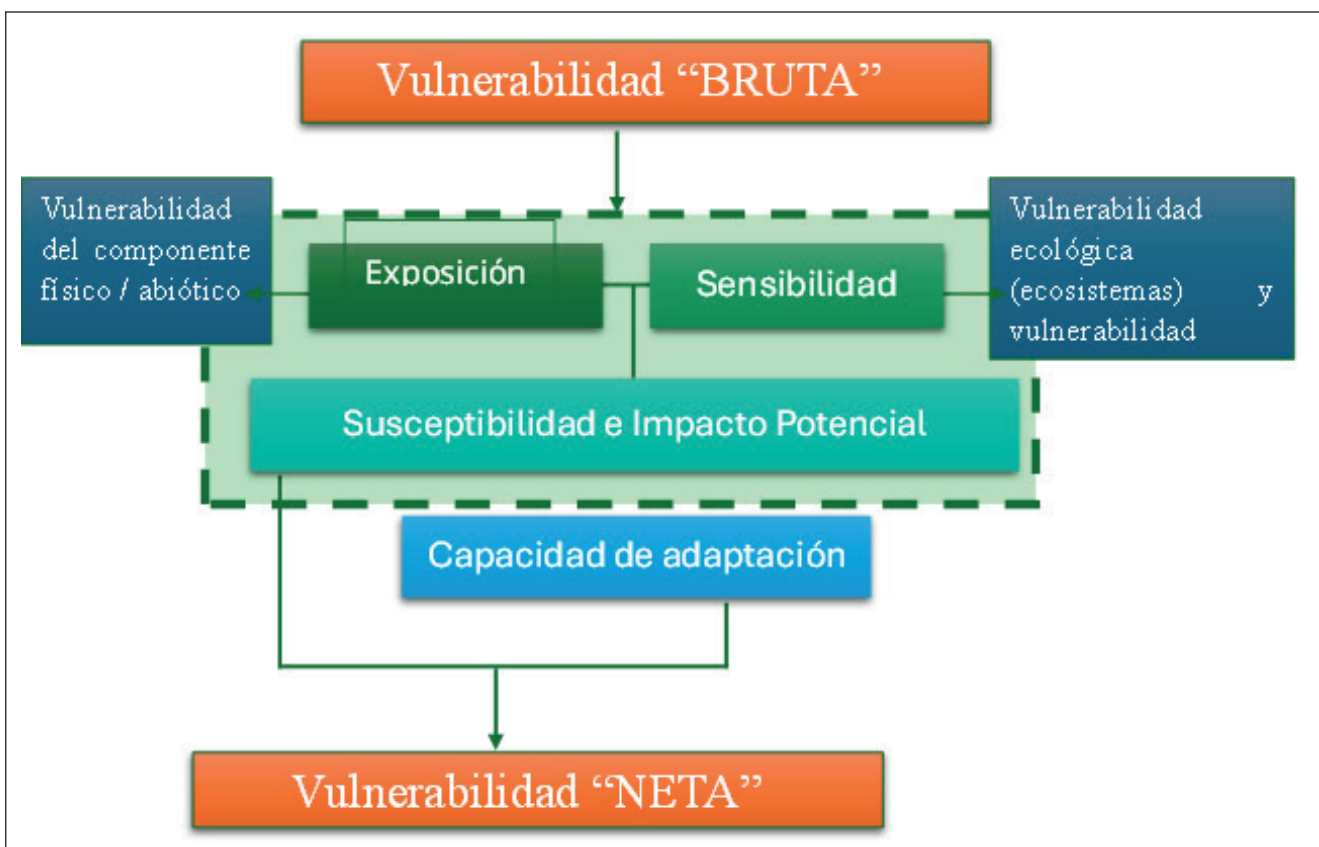


Figura 1. Componentes de la vulnerabilidad bruta. Fuente: Adaptado de Schröter y Metzger (2004) en Mendez et al. (2011).

2. SECCIÓN II-GUÍA METODOLÓGICA

2.1. CRITERIOS DE ELABORACIÓN

El criterio fundamental para la elaboración de esta guía metodológica es ofrecer un marco de trabajo práctico, integrando la geología como un factor importante para el análisis de la vulnerabilidad costera, ya que proporciona el conocimiento científico necesario para identificar los procesos geológicos (erosión, abrasión, deslizamientos, etc.) y las características de la superficie (tipo de rocas, pendientes, geoformas, etc.), que junto a elementos oceanográficos o hidrodinámicos, determinan la susceptibilidad o fragilidad ante el ANM.

Para el análisis de la vulnerabilidad costera se utilizará un modelo replicado por otros servicios geológicos y adaptables a nuestra realidad, y que además ha sido validado con resultados positivos en sus respectivos países.

Se prioriza la necesidad de que la información sea accesible y pueda ser utilizada por una amplia variedad de actores involucrados en la tarea de planificación territorial y en la gestión del riesgo, desde autoridades locales hasta representantes comunitarios. Al generar información compartida y un lenguaje común, promueven la coordinación y la sinergia entre diferentes instituciones gubernamentales y actores de la sociedad civil.

Por último, este trabajo se alinea a la normativa costarricense y a los marcos internacionales en el tema de dinámica costera, así mismo aplica estándares nacionales e internacionales en la elaboración de la cartografía geológica y de la vulnerabilidad. Además, se prioriza la actualización y relevancia de los datos, garantizando que el estudio se basa en modelos y proyecciones científicas actuales para la obtención de resultados confiables y de alta calidad, que pueden servir como base para la toma de decisiones estratégicas a corto y largo plazo, en términos ordenamiento territorial y gestión de riesgo de la ZMT.

2.2. OBJETIVOS DE LA GUÍA

Los objetivos de la Guía son:

- a) Establecer procedimientos estandarizados para generar mapas regionales de vulnerabilidad costera, integrando datos geológicos, morfológicos e hidrodinámicos provenientes de diversas instituciones, de manera precisa y útil para la planificación territorial y la gestión del riesgo.
- b) Promover la colaboración entre instituciones para asegurar que los datos sean compartidos, accesibles y consistentes, facilitando la coordinación y la toma de decisiones estratégicas en la Zona Marítimo-Terrestre (ZMT).

2.3. A QUIEN SE DIRIGE LA GUÍA

La guía se dirige especialmente a técnicos y profesionales de instituciones gubernamentales que necesiten implementar estudios de vulnerabilidad costera, entre los que cabe mencionar al Sistema Nacional de

Gestión del Riesgo (SNRG) y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), gobiernos locales, SINAC, ICT, Instituciones académicas, entre otros. Además, puede ser aplicada por empresas privadas y desarrolladores en zonas costeras que consideren en sus inversiones los riesgos por CC. Así mismo pueden ser útiles a organismos no gubernamentales nacionales e internacionales que trabajen con los efectos del CCs, protección de comunidades vulnerables, entre otros.

2.4. ÁMBITO DE APLICACIÓN

La metodología es aplicable a la zona litoral del Pacífico y del Caribe de Costa Rica y replicable a otras regiones de Centroamérica y el trópico.

2.5. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Los mapas de vulnerabilidad costera pueden ser elaborados por una variedad de actores, no obstante, por tratarse de una metodología donde se incluye variables geológicas para su valoración, se recomienda la participación de profesionales en geología o geociencias dentro del staff de trabajo. También la participación de profesionales conocedores de la dinámica oceánica-costera para la interpretación de datos oceanográficos (olas, mareas, corrientes, etc.), especialistas en mediciones de la morfología costera y oceánica (curvas de nivel y líneas batimétricas) y especialistas en SIG para el análisis, integración representación y gestión de los datos.

En la tabla 1 se muestra como fue la organización de trabajo para la aplicación de la guía metodológica en la elaboración de mapas de vulnerabilidad costera de la Región Pacífico Central (RPC).

Tabla 1. Organización de trabajo de la cooperación triangular.

Institución	Especialista	Funciones en la elaboración de los mapas
DGM	Geólogos y geólogas.	Mapeo geológico, mapeo y cartografía de las variables geológicas para el IVC, integración representación y gestión de los datos.
	Geógrafo	Interpretación de modelos oceanográficos e hidrodinámicos, cartografía de variables oceanográficas para el IVC, integración representación y gestión de los datos.
CGS	Geólogos	Mapeo y cartografía geológica, estudios y análisis de laboratorio en petrografía, rayos X y paleontología.
	Especialista en SIG	Construcción del mapa digital en SIG
IGP	Geólogos y geólogas.	Valoración de tipos de costas
	Geólogo Marino	Valoración de tipos de costas
	Geógrafa	Integración representación y gestión de los datos.

Guía Metodológica

Según la investigación de Klein (2009) en González & Laguna (2024) en la evaluación de la vulnerabilidad costera los geólogos, tradicionalmente estudiaban los patrones de sedimentación costera y procesos dinámicos como la erosión y la acreción; los ecólogos se centraban en la diversidad y el funcionamiento de la flora y fauna costera; y los ingenieros evaluaban el riesgo de marejadas ciclónicas y otros fenómenos extremos que podrían poner en peligro la integridad costera y la seguridad de las comunidades. Este enfoque disciplinario es anterior al surgimiento del CC como foco principal de investigación, lo que impulsó el desarrollo de metodologías más integradas para evaluar la vulnerabilidad costera.

2.6. ESCALA DE TRABAJO

La escala de presentación de los productos (mapa geológico y de vulnerabilidad) es 1:25 000 y 1:50 000, la cual se escogió según la escala de planificación del ordenamiento territorial. Esta escala es ideal para el estudio detallado de unidades geológicas menores y para el análisis de riesgos geológicos localizados. Permite representar con mayor precisión elementos de menor tamaño.

2.7. METODOLOGÍA: INDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA, IVC.

De la variedad de metodologías, herramientas, indicadores e índices utilizados a nivel nacional e internacional, para los estudios de vulnerabilidad costera, tanto global como de alguno de sus componentes y, específicamente, ante la elevación del nivel medio del mar, se empleará la estimación del Índice de Vulnerabilidad Costera, método conocido como IVC o CVI por sus siglas en inglés (Coastal Vulnerability Index). Este fue desarrollado inicialmente por el USGS, (Gornitz, 1990; Gornitz et al., 1994, 1997; Thieler et al., 1999, 2001; Pendleton et al., 2005, 2010, entre otros) y posteriormente adoptado y adaptado por investigadores de distintos países, como Cuba (Denis et al., 2019; Denis et al., 2023), Argentina (Kokot, 2004; Fernández et al., 2018), México (Ramos et al., 2016), Panamá (González et al., 2024), Grecia (Doukakis, 2005), Australia (Abuodha & Woodroffe, 2007), España (Ojeda et al., 2009; Méndez et al., 2011; Talavera, 2011; Martí, 2011), Colombia (Rangel-Buitrago & Posada, 2013; García-Echavarría, 2021), España (Talavera, 2009), entre otros.

Según Denis et al. (2023), la metodología utiliza el componente de vulnerabilidad de la exposición del medio físico abiótico (soporte natural de las rocas y formas de relieve) sobre el que se asienta los ecosistemas costeros. De ahí la utilización de este índice por investigadores y especialistas de las geociencias que son quienes estudian las variables que se toman en cuenta.

En Costa Rica, Cárdenes et al. (2005) señalan que el cálculo del IVC ante el ascenso del nivel del mar requiere una base de datos que relacione parámetros como mareas, oleaje, evolución de la morfología de la zona costera, geomorfología actual, entre otros. La metodología presenta la ventaja de generar una buena cantidad de datos; sin embargo, su desarrollo puede resultar muy costoso y difícil de aplicar en Costa Rica, debido a la insuficiencia de datos medidos sobre oleaje y otros parámetros necesarios para determinar la vulnerabilidad de la zona costera frente a los procesos de ascenso del nivel del mar. En este sentido la aplicación de este método permitirá verificar la evolución en la generación de datos geológicos y oceanográficos en el país, así como la creación de nuevas herramientas que proporcionen datos confiables necesarios útiles para el cálculo del IVC.

La metodología requiere de la incorporación de datos geológicos, topográficos y oceanográficos y/o hidrodinámicos que deben ser llevados a valores numérico. Los mismos resultan de muestreos, observaciones directas y también de información bibliográfica.

Cabe señalar que el método admite la incorporación de nuevos datos, permitiendo de así desearlo, la reformulación a través de un nuevo modelo (Kokot et al., 2024).

2.7.1. Índice de Vulnerabilidad Costera, IVC: modelo adoptado

El IVC es el método que mide la vulnerabilidad de las costas ante el ANM y ante otros peligros relacionados con el CC, principalmente a través de la erosión y la inundación. El índice permite relacionar variables físicas de manera cuantificable para calcular un valor numérico que clasifica la susceptibilidad de una costa frente a estos riesgos.

Fue desarrollado por el USGS (Gornitz & Kanciruk, 1989; Gornitz, 1990 y Gornitz et al., 1994) con el fin de crear una base de datos global sobre peligros costeros en los EE.UU (Thieler et al., (1999) la adaptó para la evaluación de la vulnerabilidad costera por el ANM para la costa atlántica de EE. UU. Posteriormente el USGS ha puesto a punto una metodología (Hammar-Klose et al., 2001) que se ha aplicado a escala nacional en USA y a escala “regional” centrada en los Parques Nacionales costeros de aquel país.

La ecuación planteada por Thieler et al. (1999) establece que el IVC es igual a la raíz cuadrada de la media geométrica, es decir, la raíz cuadrada del producto de las variables clasificadas dividido por el número total de variables. La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$CVI = \sqrt{((a*b*c*d*e*f) / 6)}$$

Donde:

- a = Geomorfología.
- b = Pendiente Costera.
- c = Tasa relativa de aumento del nivel del mar.
- d = Tasa de erosión/acreción de la costa.
- e = Rango medio de marea.
- f = Altura media de las olas.

El cálculo se realiza mediante álgebra de mapas, utilizando sistemas de información geográfica SIG. Se realiza a través de un algoritmo que conjugan de manera distinta las variables mencionadas. El objetivo es la obtención de un índice que refleje la real vulnerabilidad y que esta no sea valorada con exageración por un inadecuado balanceo de las variables involucradas.

Este índice proporciona una medida cuantitativa, aunque relativa, de la vulnerabilidad natural del substrato abiótico de los ecosistemas costeros; no evalúa ni la magnitud ni la probabilidad de ocurrencia del peligro o amenaza; tampoco las pérdidas o costos potenciales. Las variables utilizadas y los rangos de las mismas se exponen en la tabla 3.

2.8. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IVC

En este apartado se explica la importancia de los procedimientos o pasos a seguir para el desarrollo de la metodología, los cuales garantizan el orden y la claridad en el proceso (Fig. 2), aseguran que los resultados sean más consistentes y verificables, contribuyen a optimizar el tiempo y los recursos, facilitan la medición de avances, permiten la identificación de fallos y posibilitan que otras personas puedan repetir el proceso y verificar los resultados.



Figura 2. Cinco pasos esenciales para el cálculo y validación del IVC. Fuente: Datos propios, (2025).

2.8.1. Etapa 1: Identificación de Variables Relevantes

Para identificar las variables que se utilizan en el IVC se sigue un proceso sistemático que combina criterios científicos, técnicos y contextuales de la zona de estudio. El proceso se organiza en 5 pasos tal como se muestra en la Figura 3.

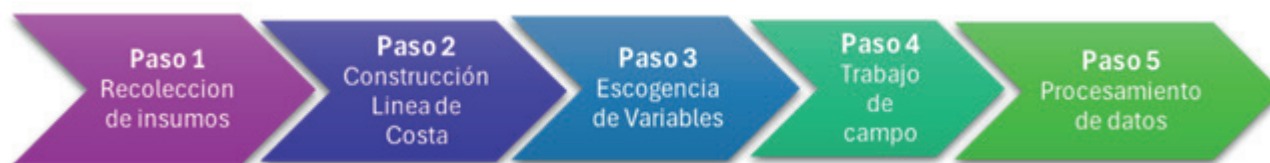


Figura 3. Pasos esenciales de la etapa 1. Fuente: Datos propios, (2025).

2.8.1.1. Paso 1: Recopilación de Insumos

Los insumos permiten establecer de manera confiable la selección de las variables, los rangos de valoración de la vulnerabilidad, así como cuantificar dichas variables asignándoles puntuaciones, generalmente en una escala semicuantitativa.

La recopilación se realiza mediante:

A. Revisión bibliográfica exhaustiva y actualizada

Incluye, entre otros, artículos científicos, informes técnicos y bases de datos de origen confiable, disponibles para consulta y verificación, con referencias claras (identificador de objeto digital [DOI], metadatos, publicaciones asociadas) y permisos de uso explícitos. Esto proporciona la información necesaria que posteriormente será corroborada en campo. Entre las instituciones y entidades académicas generadoras de información y bases de datos confiables sobre la información geológica, geomorfológica y topográfica del país se encuentran: la DGM), la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) de la UCR, la Dirección de Aguas (DA), el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), CNE y IGN a través de la plataforma del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). La información hidrodinámica está disponible en la base de datos del Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis de la Universidad Nacional (SINAMOT), Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Módulo de información oceánica, creado por el Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (MIOCIMAR) de la UCR.

B. Fuentes de datos espaciales

Se utilizaron datos espaciales disponibles de uso libre y/o público para la construcción de modelos que incluyen datos o registros actuales e históricos sobre mareas, oleajes, erosión costera, geomorfología, profundidad y elevaciones, los cuales permiten realizar modelos digitales de elevación con una resolución espacial alta. Estos datos están disponibles en diversas fuentes, tales como las imágenes satelitales de la compañía PlanetScope y Google Earth, fotografías aéreas del proyecto Terra (1997), ortofotos del periodo 2014-2017 del IGN, vuelos fotogramétricos y datos Light Detection and Ranging (LIDAR) con vuelos de helicópteros ligeros a una altura de 1020 ms.n.m. (tabla. 2).

Guía Metodológica

Existen fuentes de datos espaciales de mejor resolución, como modelos de elevación del terreno, imágenes satelitales, modelos batimétricos, datos hidrodinámicos, etc. Sin embargo; representan altos costos para su adquisición, imposibilitando a las instituciones de gobierno ejecutar un presupuesto para su compra.

Tabla 2. Clasificación de datos LIDAR según la Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) por sus siglas en inglés. Fuente: Proyectiva et al., (2024).

CÓDIGO	CLASE
1	Creado, no clasificado
2	Sin clasificar
3	Suelo
4	Vegetación baja (<0,4 m)
5	Vegetación media (<0,4 – 2 m)
6	Vegetación alta (>2m)
7	Puntos bajo (ruido)
8	Model Key-point
9	Agua
10	Reservado para definición de la ASPRS
11	Reservado para definición de la ASPRS
12	Puntos superpuestos
13-31	Reservado para definición de la ASPRS

C. Mapa geológico y geomorfológico:

Los mapas geológicos y geomorfológicos, elaborados a partir de insumos bibliográficos y bases de datos, permiten comprender el contexto de la geología regional y facilitan la interpretación y el reconocimiento de la geología local del área de estudio. Asimismo, en el caso de los mapas geomorfológicos, permiten identificar las formas del relieve o los tipos de costa del litoral de la ZMT. A partir de la información proporcionada por estos mapas, se inicia la selección de las variables cualitativas determinantes para el cálculo del IVC.

Estos mapas se construyen a partir de información topográfica de alta resolución obtenida de mapas topográficos, fotos aéreas, imágenes satelitales y de los datos de LIDAR y se construye en SIG.

2.8.1.2. Paso 2: Elaboración de la línea de costa

Considerando que tanto el margen litoral como la línea de costa presentan variaciones temporales debido a la dinámica oceanográfica, costera y geológica en cada región y área específica, se considera importante elaborar una línea base de costa para realizar el análisis de vulnerabilidad.

Como punto de partida, se utilizó la capa vectorial oficial “Línea de costa” IGN, generada mediante restitución fotogramétrica a escala 1:5 000. Esta capa fue compilada mediante métodos estéreo fotogramétricos digitales a partir de fotografías aéreas captadas en 2007, y su producción final fue realizada en 2008 por el Consorcio Eptisa–Stereocarto.

Para elaborar la línea base de costa del área de estudio, se procede a realizar un ajuste a partir de la capa oficial. Para el procedimiento se utilizó información complementaria como la construcción de un ortomosaico de los datos de LIDAR, facilitado por la CNE del año 2013 y el mosaico de ortofotografías de los vuelos del 2014 al 2017 del Registro Nacional de Costa Rica (RNP), a escala 1:5 000. Además, se utilizaron criterios basados en las imágenes temporales de la plataforma Google Earth, así como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada para imágenes satelitales Landsat (NDWI) a una resolución de 30 m de 1997. La información anterior se utiliza para elaborar la línea base de costa del área de interés, con el fin de poder definir e interpretar la geomorfología costera relacionada con los tipos de costas, lo cual es esencial para la posterior elaboración y complementación de las diferentes variables a considerar en el estudio.

Se establece los siguientes criterios para su elaboración:

1. Acantilados: se trazará a partir de la base del acantilado, si se observa en la imagen una extensión rocosa menor a 20 metros se considera como del acantilado.
2. Plataformas de abrasión: se trazará a partir del borde externo, determinado a partir de las imágenes temporales del área de estudio.
3. Desembocaduras de ríos, deltas, rías, estuarios, canales de marea, llanuras de inundación: se considera los 200 metros desde la desembocadura y 50 metros a los costados de acuerdo con la Ley 6043 sobre la ZMT.
4. Playas: se trazará a lo largo de la berma de playa (límite normal de pleamar) hacia la parte exterior (océano) de la zona costera.
5. Manglares: la línea se delimitará por el borde del bosque
6. Costa antropizada: se trazará por el borde de la infraestructura

2.8.1.3. Paso 3: Escogencia de variables

Las variables propuestas para la implementación de esta metodología en el territorio costarricense, ponen en evidencia la necesidad de información disponible con cobertura a nivel nacional, actualizada, estandarizada y con trazabilidad estadística. De igual forma, se plantea la incorporación de variables alternativas que amplíen el alcance del análisis, con el propósito de fortalecer la aplicación del IVC y promover su adopción por parte de las instituciones gubernamentales y la academia como herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

Las variables utilizadas para el cálculo del IVC, de acuerdo a las definiciones establecidas por Gortniz et al. (1989), Thielier et al. (1999) y sugeridos en Denis et al. (2019 y 2023), Kokot et al. (2004) y Fernández et al. (2017), entre otros, son las siguientes (ver tabla 3):

1. Tipos de costa (geomorfología).
2. Litología.
3. Pendiente costera.
4. Tasa de cambio de la superficie terrestre costera.
5. Aumento del nivel medio del mar.
6. Altura significativa de la ola (Hs).
- 7 Amplitud máxima de la marea astronómica.

Estas variables tienen una influencia clara en la evolución de la línea de costa y se seleccionó considerando:

- a) Caracterización del medio físico abiótico de la zona costera, expuesto a peligros naturales y que también constituye el sustrato de los ecosistemas naturales y de la infraestructura de origen antrópico: tipología geomorfológica de la costa, características topográficas, constitución litológica, grado de meteorización y de fallamiento, entre otros.
- b) Caracterización de los procesos (tasa de erosión costera a largo plazo y tasa de elevación del nivel medio relativo del mar).
- c) Caracterización de los agentes hidrodinámicos que actúan sobre el medio físico abiótico de la zona costera (corrientes, olas, mareas y vientos).

Las variables utilizadas se clasifican en cualitativas y cuantitativas, véase en la tabla 4. Las variables cualitativas describen características o cualidades que no pueden medirse numéricamente, como aquellas relacionadas con la caracterización del medio físico abiótico. Por otro lado, las variables cuantitativas se expresan mediante valores numéricos y representan mediciones y datos estadísticos relacionados con las características de los procesos y agentes hidrodinámicos

Tabla 3. Definición de las variables seleccionadas para el cálculo del IVC

#	Variables	Definición
1	Tipos de costa (geomorfología),	Esta variable permite analizar la evolución del paisaje, la posible degradación causada por inundaciones y erosión, así como por condiciones energéticas (Kokot et al., 2004). Además, facilita el estudio del cambio en la línea de costa (dinámica de avance y retroceso de la línea de costa) y de procesos y factores geomorfológicos, tales como procesos tectónicos, actividades antrópicas, entre otros.
2	Litología	Tipo de rocas que conforman el sustrato las cuales pueden estar alteradas o modificadas por meteorización y fallamiento causando deformación y fracturación de las mismas. Las condiciones geotécnicas representan la resistencia a la erosión ante la incidencia de olas y corrientes.
3	Pendiente costera	La inclinación del terreno. Los valores varían de planos a muy escarpados.
4	Tasa de cambio de la superficie terrestre costera	Velocidad a la que la costa retrocede o avanza. Los valores se obtienen de series de tiempo y se pueden clasificar como tasas de erosión o acreción.
5	Aumento del nivel del mar	Variación del nivel del mar a largo plazo. Un valor alto de cambio del nivel del mar incrementa el riesgo de inundación.
6	Altura significativa de la ola (Hs)	Representa el valor estadístico del oleaje, normalmente la media del tercio superior de las olas registradas en un intervalo de tiempo.
7	Amplitud máxima de la marea astronómica.	Es el nivel máximo del agua en un lugar costero que se produce únicamente por la acción combinada de las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol, sin incluir efectos meteorológicos como viento, presión atmosférica y tormentas.

Tabla 4. Características de las variables seleccionadas para el cálculo del IVC.

#	NOMBRE	UNIDAD /MEDIDA	CARACTERÍSTICA	TIPO DE DATO
1	Tipos de costa (geomorfología),		Cualitativa	Geológico
2	Litología		Cualitativa	Geológico
3	Pendiente costera	(°)	Cuantitativa	Topográfico
4	Tasa de cambio de la superficie terrestre costera	m/año	Cuantitativa	Geológico e hidrodinámico
5	Aumento del nivel del mar	mm/año	Cuantitativa	Hidrodinámico
6	Altura significativa de la ola	m	Cuantitativa	Hidrodinámico
7	Marea astronómica más alta	m	Cuantitativa	Hidrodinámico

2.8.1.4. Paso 4: Trabajo de campo

El trabajo de campo consiste en el levantamiento de información geológica y geomorfológica a lo largo de la zona costera, lo que permite verificar en terreno si los datos obtenidos de fuentes secundarias corresponden a la realidad y garantiza que la información representada en los mapas sea precisa, actualizada y contextualizada. El esquema del trabajo de campo se muestra en la Figura 4. Durante el trabajo de campo, se recorre el litoral del área de interés y se realiza un análisis in situ de la línea de costa, evaluando variables cualitativas, litología y tipos de costa, documentándose mediante puntos de referencia y fotografías.



Figura 4. Esquema de trabajo de campo para orientar las actividades que se llevarán a cabo. Fuente: Datos propios, (2025).

A. Protocolo Documentación de Campo

Este protocolo es una guía estructurada para la recolección de información geológica y geomorfológica en campo. Contiene una serie de puntos que deben completarse de manera sistemática durante la etapa de validación de las variables. Los principales aspectos que se deben documentar se muestran en la Figura 5. La información recolectada en campo se almacena en la geodatabase para su uso en la etapa de cartografía de cada una de las variables.

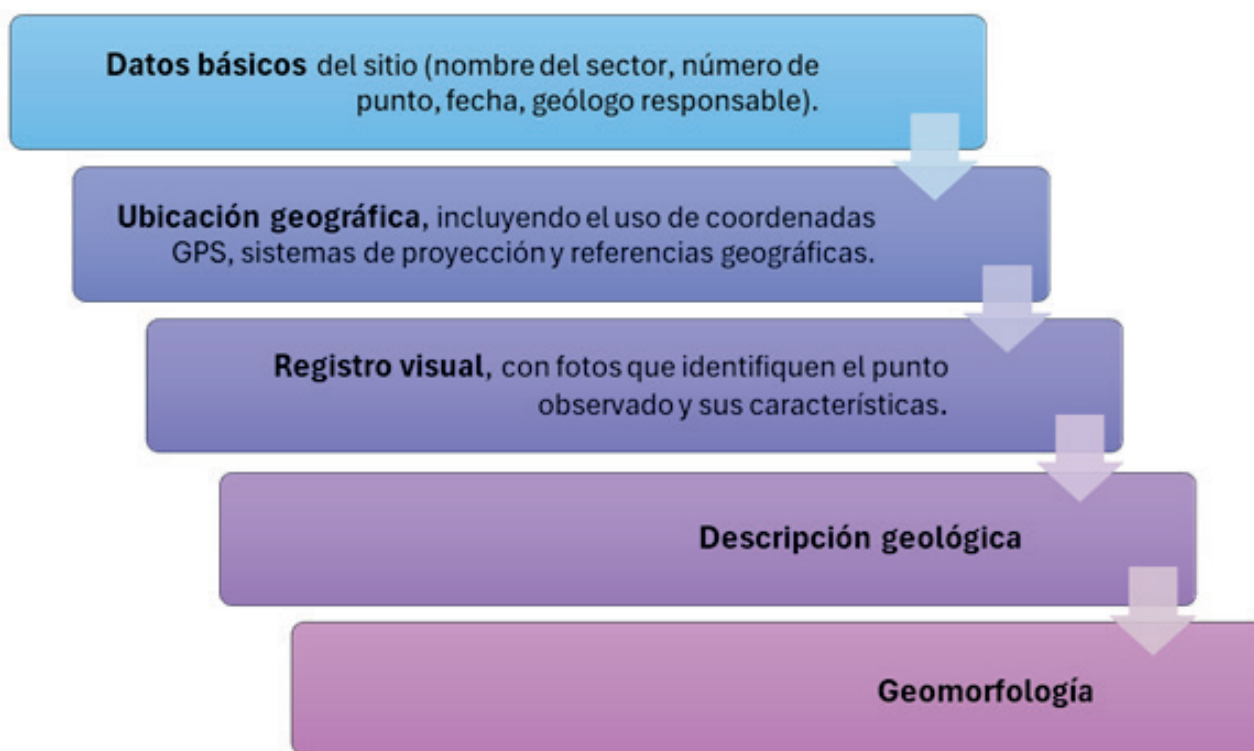


Figura 5. Guía de registro de campo para estandarizar la recolección de datos durante la investigación. Fuente: Datos propios, (2025).

La geología en las zonas costeras, especialmente en el Cuaternario, se enfoca en la dinámica costera, el estudio de las formaciones geológicas como playas y acantilados, y los procesos de erosión y sedimentación influenciados por el oleaje, las corrientes litorales, el viento y los cambios en el nivel del mar. La documentación contiene datos del terreno como la descripción estratigráfica, litológica, la composición mineral, las estructuras geológicas (fallas, pliegues).

DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La descripción del afloramiento o cortes incluye información sobre las unidades litológicas (estratos o capas con características físicas distintivas), las secuencias litoestratigráficas (orden y disposición de los estratos), los depósitos y su origen, las facies (variaciones en el contenido o características de una unidad), las estructuras sedimentarias, si las hay, y el espesor de cada unidad o capa.

Guía Metodológica

Para determinar la relación entre unidades, es necesario considerar la existencia de contacto neto, transicional, erosivo, entre otros; así como inconformidades o discordancias, superposiciones o interdigitaciones entre las unidades.

Otras notas interpretativas pueden incluir posibles ambientes de depositación, rasgos significativos como restos fósiles, estructuras tectónicas, antigüedad relativa y cualquier otra información relevante según el criterio del geólogo.

DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA

Esta sección documenta las características del relieve, los procesos morfodinámicos y las evidencias de cambios geológicos o ambientales. Es fundamental para comprender la evolución del paisaje y su dinámica.

Los datos a considerar incluyen los tipos y subtipos de costa, la forma del relieve o las características específicas del terreno, el entorno costero, los procesos propios de la dinámica costera (costas de abrasión, de acumulación y mixtas), la génesis de la forma del relieve y los procesos en desarrollo, las evidencias tectónicas, así como el desplazamiento de la línea costera.

2.8.1.5. Paso 5: Procesamiento de los datos

El uso de SIG en el cálculo del IVC es esencial para integrar, procesar y analizar de manera espacial las variables que determinan la susceptibilidad de los litorales a los procesos naturales y antrópicos. Los SIG permiten sistematizar toda la información recopilada desde insumos bibliográficos, mapas geológicos, geomorfológicos, datos LIDAR y ortofotografías dentro de una geodatabase, garantizando la trazabilidad, precisión y homogeneidad de los datos. A través de estas herramientas, se elaboran productos fundamentales como la línea base de costa, modelos digitales de elevación y mapas temáticos de cada variable (pendiente, litología, tipo de costa, tasas de cambio, altura de ola, marea astronómica y aumento del nivel del mar). La integración espacial de estas capas posibilita la aplicación de la fórmula del IVC y la generación de mapas de vulnerabilidad clasificados por rangos, facilitando la identificación de zonas críticas y la priorización de medidas de gestión. En síntesis, los SIG actúan como el eje técnico que permite transformar datos multidisciplinarios en información geoespacial útil para la planificación costera y la toma de decisiones basadas en evidencia científica.

2.9. ETAPA 2: CUANTIFICACIÓN DE VARIABLES

En esta etapa se procede con la cuantificación de variables asignando puntuaciones, usualmente en una escala semi cuantitativa (escala de Likert, 1932).

2.9.1. Rangos de IVC y valores de las variables

Los rangos de vulnerabilidad establecidos en la propuesta son cinco “Muy bajo”, “Bajo”, “Moderado”, “Alto” y “Muy alto”, de acuerdo al modelo de Thieller et al. (1999), a cada uno de los cuales le corresponde un color: azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente. La tabla 5 muestra las variables del IVC, que incluyen información cuantitativa y cualitativa. A las variables cuantitativas se les asigna una clasificación de vulnerabilidad con base en sus valores reales, mientras que la variable litológica y geomorfológica no

numérica se clasifica cualitativamente según la susceptibilidad relativa de una forma terrestre dada al cambio físico (Thieler et al., 2000).

2.9.1.1. Cálculo y clasificación de la variable: “Tipo de Costa”

Para establecer los rangos y valores de la variable “Tipos de Costa” se utilizaron mapas topográficos a escala 1:25 000 del IGN correspondientes a la zona costera del país, así como el atlas geomorfológico de Costa Rica a escala 1:100 000 (Bergoing & Brenes, 2017). También se emplearon mapas de relieve, imágenes satelitales de la compañía PlanetScope y Google Earth, fotografías aéreas del proyecto Terra (1997) y ortofotos del período 2014-2017 del IGN, además de datos LIDAR proporcionados por la CNE. Se consideraron asimismo trabajos previos sobre la geomorfología y los tipos de costas en diferentes regiones del territorio nacional, realizados por Lizano (2013); Cárdenes et al. (2005); Lizano et al. (2001) y Aguilar (2013).

La categorización de las principales formas de relieve (geoformas) que se dan en el territorio nacional y que se estableció como rango para esta variable son: acantilado, plataforma de abrasión, plataforma de abrasión con acantilado, desembocadura de río, playa y llanura de marea, y playa antropizada. Dentro del rango de valores, se le asignó un valor numérico de 1 a 5, donde 1 corresponde a muy baja vulnerabilidad y 5 a muy alta. Véase en tabla 5.

2.9.1.2. Cálculo y clasificación de la variable: “Litología”

Esta variable expresa la resistencia física relativa de los diferentes tipos de rocas que constituyen la zona costera. Los rangos se establecen con el enfoque de calidad de la roca considerando su dureza, compactación, descomposición o alteración química y deformación y fracturamiento de la roca.

Los rangos para la variables se obtienen a partir del mapa geológico a escala 1: 750 000 de Denyer & Alvarado (2007), de los mapas geológicos a escala 1:50 000 y 1.25 000, los cuales se encuentran en el visor de la base datos de la DGM (<https://www.geologia.go.cr/>), de mapas geológicos a diferentes escalas de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica UCR (<https://www.ucr.ac.cr/directorio/escuela-centroamericana-de-geologia/>), de trabajos anteriores publicados en la Revista Centroamérica de Geología de la UCR <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/>) la base de datos de SENARA (https://tramites.da.go.cr/registro_nacional_pozos) y de la base de datos de pozos de la DA (https://www.senara.or.cr/tramites_y_servicios/db_pozos.aspx). Asimismo, se utilizó trabajos anteriores cuyas referencias se adjuntan en la sección V. También fue esencial la disponibilidad de documentación de campo y registro fotográfico. Con este bagaje documental se procede a establecer los criterios de clasificación que se muestran en la tabla 5.

Los rangos establecidos son: rocas muy resistentes a la abrasión (muy poco fracturado y no meteorizado), rocas resistentes a la abrasión (poco fracturado y ligeramente meteorizada), rocas moderadamente resistentes a la abrasión (moderadamente fracturado y meteorizado), rocas poco resistentes a la abrasión (muy fracturado y altamente meteorizado) y depósitos inconsolidados. El sistema de clasificación utilizado exige la asignación

Guía Metodológica

a cada tramo costero (100 m) de un valor entre 1 y 5 de vulnerabilidad (Tabla 5). Estos rangos establecidos para una variable cualitativa, aunque aquí expresada cuantitativamente, exige una detallada información sobre la litología del área estudiada.

2.9.1.3. Cálculo y clasificación de la variable: “Pendiente Costera”

La “Pendiente Costera” es una de las variables más importantes en el cálculo de IVC porque influye directamente en la forma en que las zonas litorales responden a procesos dinámicos como la erosión, el ascenso del nivel del mar y el impacto de tormentas o tsunamis.

En costas con pendientes suaves, las olas rompen de manera gradual, lo que incrementa la interacción del agua con la franja costera. Esto significa que un pequeño ANM puede desplazar la línea de costa varios metros hacia el interior. Esta situación favorece la erosión y la inundación, ya que el mar puede penetrar más tierra adentro. En cambio, las costas con pendientes pronunciadas tienden a disipar la energía con mayor rapidez, reduciendo la extensión de la zona de inundación. Una pendiente pronunciada implica un menor retroceso costero ante el mismo ANM.

Los rangos y valores se determinaron construyendo Modelo Digital del Terreno (MDT), utilizando los datos LIDAR de la franja litoral Pacífico y Caribe de Costa Rica suministrados por la CNE del año 2013 y archivos de curvas de nivel a 1 m, con los cuales se construyó el MDT. De este modelo se derivó un subproducto de pendientes en grados, delimitado posteriormente por un área de influencia de 10 m tierra adentro desde la línea de costa. Como resultado, se estableció que la vulnerabilidad es muy baja cuando la pendiente supera los $7,5^\circ$ y muy alta cuando es inferior a $1,6^\circ$.

2.9.1.4. Cálculo y clasificación de la variable: “Tasa de Cambio De La Superficie Terrestre”

La “tasa de cambio de la superficie terrestre” mide qué tan rápido y en qué dirección se está modificando la franja costera a lo largo del tiempo (ya sea por erosión o por acreción/acumulación de sedimentos). Refleja la dinámica costera real y permite identificar si la costa está en retroceso (pérdida de playa/territorio) o en avance (ganancia de superficie).

En el caso del litoral del territorio nacional, la información disponible sobre el desplazamiento de la línea de costa es escasa. No obstante, para este estudio se estimó la tasa de cambio mediante el análisis comparativo de las líneas de costa correspondientes a los años 1997 y 2025. Dichas líneas se construyeron a partir de ortofotografías del proyecto TERRA 97 y de imágenes satelitales PlanetScope, siguiendo los mismos criterios descritos previamente en la sección 2.9.1.1 de este documento.

Una vez generadas ambas líneas de costa, se integraron con una cuadrícula de 100×100 metros y se procesaron mediante programación en Python dentro de un entorno interactivo de Jupyter Notebook. Para garantizar la correcta estimación de distancias, se trabajó con una proyección métrica. Posteriormente, se compararon las posiciones de las líneas de 1997 y 2025, calculando el desplazamiento neto de la línea en cada celda de la cuadrícula. La tasa de cambio en metros por año se obtuvo dividiendo el desplazamiento calculado entre el intervalo temporal de 28 años considerado en este análisis.

Los valores resultantes fueron asignados a cada celda de la cuadrícula, de manera que cada unidad espacial heredó un valor promedio representativo del comportamiento de la línea de costa en su área. Finalmente, estos valores se reclasificaron en rangos de vulnerabilidad definidos por el IVC, que varían desde una vulnerabilidad muy baja, cuando la tasa de cambio es mayor o igual a 1,109 m/año, hasta muy alta, cuando oscila entre $-2,040$ y $-0,0738$ m/año.

Esta reclasificación permitió integrar la tasa de cambio como una variable fundamental dentro del IVC, aportando una caracterización espacial de los sectores más expuestos a procesos de erosión o acreción en el litoral nacional.

2.9.1.5. Cálculo y clasificación de la variable: “Aumento del nivel del mar”

El ANM constituye un factor detonante que intensifica la mayoría de los procesos de riesgo en las zonas litorales. A medida que el mar asciende, áreas que anteriormente eran tierra firme quedan sumergidas, lo que provoca la pérdida de playas, manglares y terrenos costeros, además de favorecer la remoción de sedimentos y acelerar la degradación de playas y dunas.

A diferencia de fenómenos locales, como tormentas o marejadas, el ANM responde a una tendencia sostenida vinculada al CC. Por ello, representa un riesgo de largo plazo que debe considerarse de manera prioritaria en la planificación costera.

Para el cálculo de esta variable se empleó como referencia el modelo llamado Mapa de tendencias del nivel medio del mar en los océanos globales a partir de la reprocesamiento de observaciones, el cual abarca el período comprendido desde 1990 hasta la actualidad y presenta una resolución espacial adecuada para estudios regionales. Los datos del modelo están expresados en milímetros por año (mm/año), lo que facilita su interpretación. El procesamiento se realizó mediante la integración del servicio de mapas en línea en un programa SIG.

Complementariamente, se consideró la información del IPCC (2015) junto con el escenario SSP3-7.0, clasificado con un nivel de confianza bajo. La clasificación del aumento del nivel del mar se estableció en función de las tasas globales actuales, con base en publicaciones nacionales e internacionales. De este modo, valores $\leq -1,22$ mm/año corresponden a una vulnerabilidad muy baja, mientras que valores $\geq 2,43$ mm/año se clasifican como muy alta (Lizano, 2006; Proyectiva et al., 2024; BIOMARCC-SINAC-GIZ, 2013).

2.9.1.6. Cálculo y clasificación de la variable: “Altura Significativa De La Ola”

La altura significativa de la ola (Hs) corresponde al promedio del tercio más alto de las olas registradas en un intervalo de tiempo determinado y constituye un indicador representativo de la energía del oleaje en las costas. En este estudio, la variable se calculó a partir del modelo Análisis y Pronóstico de las Olas Oceánicas Globales, disponible en la plataforma Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS).

Los datos de dicho modelo se encuentran expresados en metros, lo que facilita su interpretación. El procedimiento consistió en la integración del servicio de mapas en línea en un programa SIG, a partir del

Guía Metodológica

cual se extrajo el valor promedio de cada píxel analizado para ambas costas del país. La resolución espacial utilizada fue de aproximadamente 10 km por celda. Finalmente, la altura significativa de la ola se clasificó en rangos de vulnerabilidad que van desde muy baja (0,02 – 0,22 m) hasta muy alta (1,09 – 1,33 m).

2.9.1.7. Cálculo y clasificación de la variable: “Amplitud máxima de la marea astronómica”.

La amplitud máxima de la marea astronómica representa el rango natural de variación del nivel del mar debido a la atracción gravitacional de la Luna y el Sol. Su importancia radica en que determina la línea base sobre la cual actúan otros procesos marinos. Al integrar la marea astronómica en el IVC, se puede modelar con mayor precisión el impacto de la combinación entre marea + ascenso del nivel del mar + tormentas.

En el caso de la marea astronómica, se utilizaron datos satelitales de altimetría del servicio AVISO+ (<http://www.aviso.altimetry.fr/>), para lo cual se siguió un proceso que combina descarga de datos, filtrado y análisis armónico siguiendo los siguientes pasos:

- Acceder a los datos de satelitales de altimetría AVISO+: En este proyecto se utilizó el modelo FES2014 (Solución de Elementos Finitos, por sus siglas en inglés), el formato es NetCDF4, la cobertura geográfica es global, este modelo hidrodinámico integra datos altimétricos de distintas plataformas satelitales. El modelo incluye 3 componentes: elevaciones de marea (amplitud y fase), corrientes de marea (u y v) y carga de marea en una cuadrícula de $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ (equivalente a 7km x 7km) de resolución espacial de acuerdo a Global Tide - FES, n.d. y a Lyard. Allain, Cancet, Carrere & Picot (2021).
- Se procede con la organización de los datos, a partir de este punto y los siguientes se trabajó mediante lenguaje de programación Python utilizando un entorno de desarrollo interactivo del proyecto Jupyter. En este se verifica que los archivos posean la proyección EPSG: 4326-WGS84, datos de amplitud, phase y las constantes armónicas disponibles: M2 (lunar semidiurno), S2 (solar semidiurna), K1 (lunar-solar diurna) y O1 (lunar diurno) tal como lo describe Lizano (2006).
- Una vez definidas las componentes armónicas a extraer, se procede con una interpolación con la cuadrícula del área de estudio definida. De esta forma cada celda de la cuadrícula hereda los valores de las componentes y se genera el valor medio de la marea astronómica. Los rangos definidos corresponden a una vulnerabilidad muy baja entre 2,57 y 2,98 m hasta muy alta entre 4,10 y 4,56 m., de acuerdo a referencias en BIOMARCC-SINAC-GIZ (2013).

Tabla 5. Variables y rangos utilizados para la estimación del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC). Fuente: Datos propios, (2025).

Variables	Muy bajo 1	Bajo 2	Moderado 3	Alto 4	Muy alto 5
Tipos de costa (geomorfología)	Acantilado	Plataforma de abrasión, plataformas de abrasión con acantilado	Desembocadura de río	Playas y Llanuras de marea	Playa antropizada
Litología	Rocas muy resistentes a la abrasión (muy poco fracturado y no meteorizado)	Rocas resistentes a la abrasión (poco fracturado y ligeramente meteorizada)	Rocas moderadamente resistentes a la abrasión (moderadamente fracturado y meteorizado)	Rocas poco resistentes a la abrasión (muy fracturado y altamente meteorizado)	Depósitos inconsolidados
Pendiente costera (°)	>7,5°	7,4° - 4,7°	4,6° - 2,9°	2,8° - 1,7°	<1,6°
Tasa de cambio de la superficie terrestre costera (m/año)	≥ 1,109	0,489 - 1,108	- 0,059 - 0,488	- 0,737 - (- 0,060)	- 2,040 - (- 0,738)
Aumento del nivel del mar (mm/año)	≤ -1,22	-0,48 - 0,24	0,25 - 0,97	0,98 - 1,70	≥ 2,43
Altura significativa de la ola, Hs (m)	0,02 - 0,22	0,22 - 0,63	0,63 - 0,86	0,86 - 1,09	1,09 - 1,33
Amplitud máxima de la marea astronómica (m)	2,57 - 2,98	2,98 - 3,45	3,45 - 3,76	3,76 - 4,1	4,1 - 4,56

2.10. CARTOGRAFÍA DE LAS VARIABLES

El proceso de cartografía de las variables, una vez que estas han sido identificadas y se ha definido una puntuación cuantitativa, consiste en procesar los datos mediante un SIG, como por ejemplo los programas ArcGIS y QGIS. Estos datos se consolidan en una geodatabase que incluye: la línea de costa, las cuadrículas de cada una de las variables a analizar y clasificar, la rasterización de dichas variables, el mapa geológico y el mapa geomorfológico, datos LIDAR, modelos digitales de elevación, ortofotografías del proyecto Terra correspondientes a los años 1997 y 2014-2017, imágenes satelitales, información de campo y los puntos generados a partir de la base de datos de campo. Un aspecto importante a considerar para el proyecto que se va a utilizar en el SIG es contar con mapas base que faciliten la visualización de las mareas o de los cambios significativos en la dinámica costera, antes de la digitalización de la línea de costa.

La línea de costa en la geodatabase fue previamente digitalizada utilizando distintos insumos descritos anteriormente. Una vez validada, se procede a crear una cuadrícula que cubre toda su extensión, siguiendo el contorno definido por la línea. Asimismo, esta cuadrícula se empleará para cada una de las variables en su asignación de los insumos definidos.

Para la construcción de las cuadrículas segmentadas en elementos espaciales de 100 m de lado, se considerará la disponibilidad de la información utilizada para cada una de las variables. En esta guía metodológica, su aplicación está definida para una escala 1:25 000, que es la oficial para la generación de productos regionales y nacionales según el IGN.

Guía Metodológica

Las cuadrículas para cada variable están definidas por campos numéricos y alfanuméricos. En una columna se describirá el atributo correspondiente al nombre de la variable a trabajar, y en otra columna se incluirá la valoración según la escala utilizada, con valores entre 1 y 5. Un ejemplo puede observarse en la Figura 6

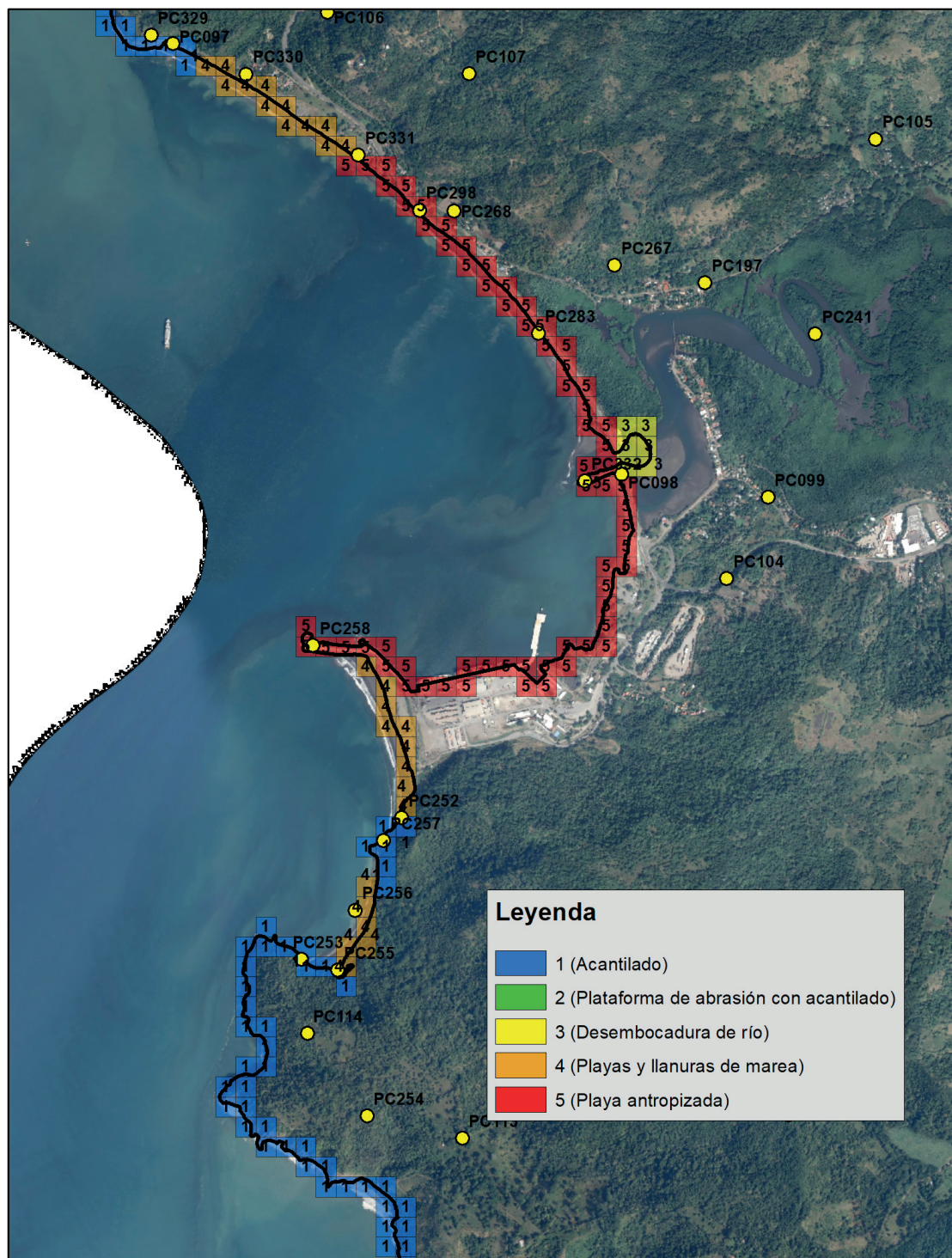


Figura 6. Ejemplo de la cartografía de variables. Grillas establecidas sobre la línea de costa para la valoración correspondiente. Fuente: Datos propios, (2025).

2.10.1. Cartografía de la variable “Tipo de Costa”

Se elaboró un proyecto en el cual se integraron los datos geoespaciales previamente mencionados, junto con la información de campo y el registro fotográfico, con el propósito de facilitar la consulta y validación de cada uno de los tramos a evaluar, conforme a los rangos establecidos (tabla 5).

Para la asignación de valores de vulnerabilidad de la variable “Tipo de Costa”, se empleó una cuadrícula de 100 x 100 metros a lo largo de la línea de costa. A cada celda se le asignó un valor y un color de acuerdo con lo establecido en la tabla 5, según la forma de relieve correspondiente.

2.10.2. Cartografía de la variable “Litología”

Al igual que la variable “tipo de costa”, se procede a trabajar sobre el proyecto creado, considerando los rangos establecidos (tabla 5).

Para la asignación de valores se utilizó una cuadrícula de 100 x 100 m a lo largo de la línea de costa, a los cuales se asignó el valor de acuerdo a la tabla 5 de acuerdo a las características litológicas (ver sección IV). La asignación de los valores se realiza de acuerdo a los siguientes criterios:

1. El valor de la vulnerabilidad corresponde a la unidad litológica que predomina en la cuadrícula.
2. Para la asignación del valor es importante el análisis integral del tipo de roca y de sus características físicas y químicas tal como el grado de fracturamiento y la meteorización y/o alteración de la roca.
3. Las estructuras antrópicas que se encuentran sobre la LC, son consideradas como un depósito litológico para su evaluación, tomando en cuenta las características físico-mecánicas que determinan su comportamiento en términos de consistencia y resistencia.

Posteriormente se asignan los colores según las valoraciones realizadas de acuerdo a los rangos establecidos en la tabla 5.

2.10.3. Cartografía de la variable “Pendiente Costera”

Se incorporó al proyecto el raster de pendientes derivado del Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 10 metros, previamente recortado al área de estudio. Para facilitar su análisis e integrar la información al IVC, los valores de pendiente fueron reclasificados utilizando la herramienta Reclassify del módulo Spatial Analyst, estableciendo intervalos desde valores menores a 1,6° hasta pendientes superiores a 7,5°.

Posteriormente, se aplicó la herramienta Zonal Statistics as Table, considerando como zonas las celdas de la grilla de análisis y seleccionando como estadístico el valor medio de pendiente en cada celda. El resultado fue valores medios de pendiente, que se vinculó a la capa de la grilla mediante el identificador común de cada polígono.

Finalmente, se creó en la grilla un campo denominado IVC, en el cual se clasificaron los valores de pendiente de acuerdo con los rangos del IVC de la tabla 5.

2.10.4. Cartografía de la variable “Tasa de cambio de la superficie terrestre costera (m/año)”

Para representar esta variable se empleó la capa vectorial generada a partir del procesamiento programático de las líneas de costa. Esta cobertura incluye un campo denominado tasa_cambio, en el cual se registran los valores de variación de la superficie terrestre costera expresados en metros por año (m/año). Con base en esta información se incorporó un nuevo campo denominado IVC, en el que los valores de la tasa de cambio fueron clasificados de acuerdo con los rangos establecidos (tabla 5). A cada categoría se le asignó la paleta de colores correspondiente.

2.10.5. Cartografía de la variable “Aumento del nivel del mar (mm/año)”

La construcción de la cartografía de esta variable se construyó interpolando la capa de cuadrículas generada de 100m x 100m con los datos de distintos autores. Para ello, se usó como base la cobertura del modelo de tendencia de la altura de superficie del mar y posteriormente se ajustaron los valores más próximos a los lugares de interés. A cada categoría se le asignó la paleta de colores correspondiente.

2.10.6. Cartografía de la variable “Altura significativa de la ola (m)”

La cartografía de la variable se elaboró incorporando los datos del modelo “Tendencia del nivel medio del mar a nivel mundial (OMI_CLIMATE_SL_GLOBAL_REGIONAL_TREND)” en la cuadrícula desarrollada para este estudio. Para ello, se creó una columna denominada SWH (siglas de Significant Wave Height), que contiene los valores extraídos del modelo.

Los datos faltantes a lo largo de la franja costera se interpolaron utilizando un criterio de proximidad, basándose en la información disponible del modelo. Posteriormente, estos valores se analizaron mediante la herramienta Zonal Statistics as Table de ArcGIS, permitiendo obtener estadísticas resumen de cada celda de la cuadrícula.

A continuación, se generó una nueva columna denominada IVC, en la que los valores de SWH se clasificaron según los rangos definidos por el índice empleado en este trabajo. A cada categoría se le asignó la paleta de colores correspondiente.

2.10.7. Cartografía de la variable “Amplitud máxima de la marea astronómica”

La variable se construyó a partir de la capa vectorial generada en Python y posteriormente incorporada en el software SIG. Se toman los valores de la cuadrícula, almacenados en la columna Promedio Marea Astronómica, fueron clasificados de acuerdo con la escala del IVC, asignando simbología diferenciada mediante una paleta de colores por categoría.

2.11. CÁLCULO DEL IVC

El cálculo relaciona las siete variables asignadas mediante una cuadrícula con elementos de 100 m de tamaño, de forma cuantitativa, para expresar la vulnerabilidad relativa en función de los cambios físicos a los que puede estar sujeta la costa, según los parámetros medidos en dichas variables. Los pasos a seguir son siete, tal como se observa en la Figura 7.

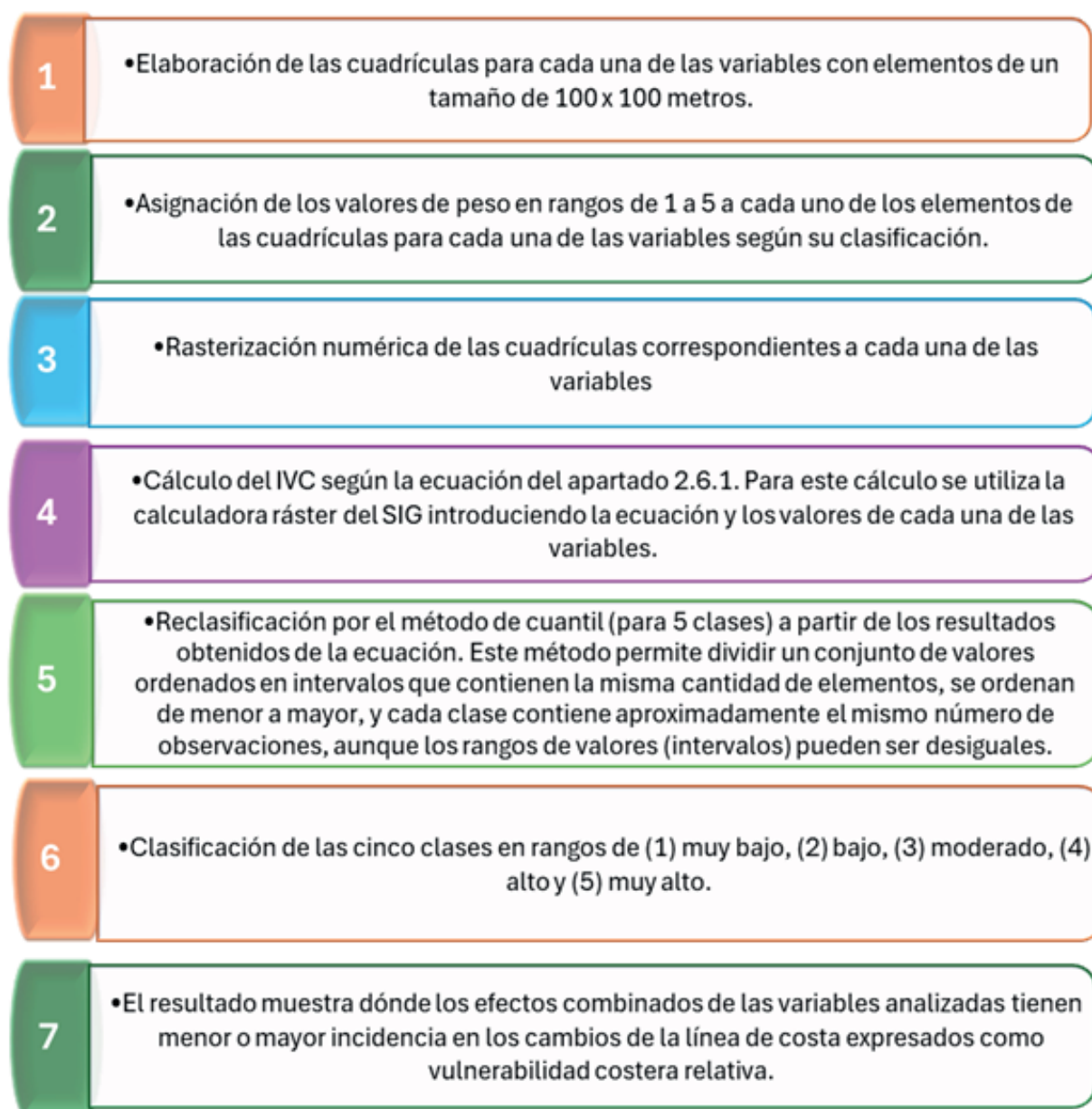


Figura 7. Pasos esenciales a seguir en la etapa "Cálculo del IVC". Fuente: Datos propios, (2025).

2.12. PRUEBA Y VALIDACIÓN DEL IVC

La prueba y validación son etapas para asegurarse de que el índice realmente refleja la vulnerabilidad de la zona costera frente a amenazas naturales y procesos de cambio.

2.12.1. Prueba del IVC

Básicamente, es una etapa de ensayo en la que se verifica si el índice funciona como se esperaba. En esta etapa también se podría realizar otra visita de campo para comprobar si los resultados corresponden a la realidad.

Durante la prueba, se analiza la coherencia de los resultados obtenidos, verificando si las áreas clasificadas coinciden con observaciones de campo, registros históricos o estudios previos. Este proceso permite identificar limitaciones técnicas, como problemas relacionados con la escala de los mapas, la resolución de las imágenes satelitales o la calidad y disponibilidad de los datos utilizados.

En esencia, se trata de una fase exploratoria o de ensayo que permite verificar si el índice se comporta de acuerdo con lo esperado en función del contexto local y la información disponible.

2.12.2. Validación del IVC

La validación del índice se realiza a través de procesos participativos y revisión técnica, involucrando tanto a expertos como a actores locales. Para ello, se organizan talleres con comunidades, instituciones y especialistas, donde se analizan los resultados a la luz del conocimiento técnico del territorio.

Este proceso contribuye a fortalecer la legitimidad y utilidad del índice, asegurando que sus resultados sean comprendidos, aceptados y utilizados por los distintos actores involucrados en la gestión costera.

3. SECCIÓN III-ESTUDIO DE CASO

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El lugar donde se aplicó la metodología propuesta es la región del Pacífico Central, que abarca aproximadamente un área de 271 km² y cuenta con una línea costera de 116,3 km. Esta región se encuentra en la provincia de Puntarenas, limitando al norte con la desembocadura del río Barranca y al sur con la playa Esterillos Oeste. Los cantones incluidos en el área de estudio son Puntarenas (distritos de Barranca y El Roble), Esparza (distritos Espíritu Santo y San Juan Grande) y Garabito (distritos Jacó, Tárcoles y Parrita); véase la Figura 8.

Entre los poblados importantes se pueden mencionar Esterillo Oeste, Playa Hermosa, Jacó, Herradura, Punta Leona, Quebrada Ganado, Tárcoles, Guacalillo, Tivives, Caldera y Barranca. Asimismo, las playas relevantes situadas en el área de estudio son 23, tal como se muestra en la tabla n.º 6. Estas localidades representan actualmente focos de población significativos con un alto crecimiento socioeconómico. Las municipalidades que se encuentran en el área de estudio, de norte a sur, son Esparza y Garabito. En el área de interés también se ubican las Áreas Silvestres Protegidas Ara Macao y Marítimo Playa Blanca.

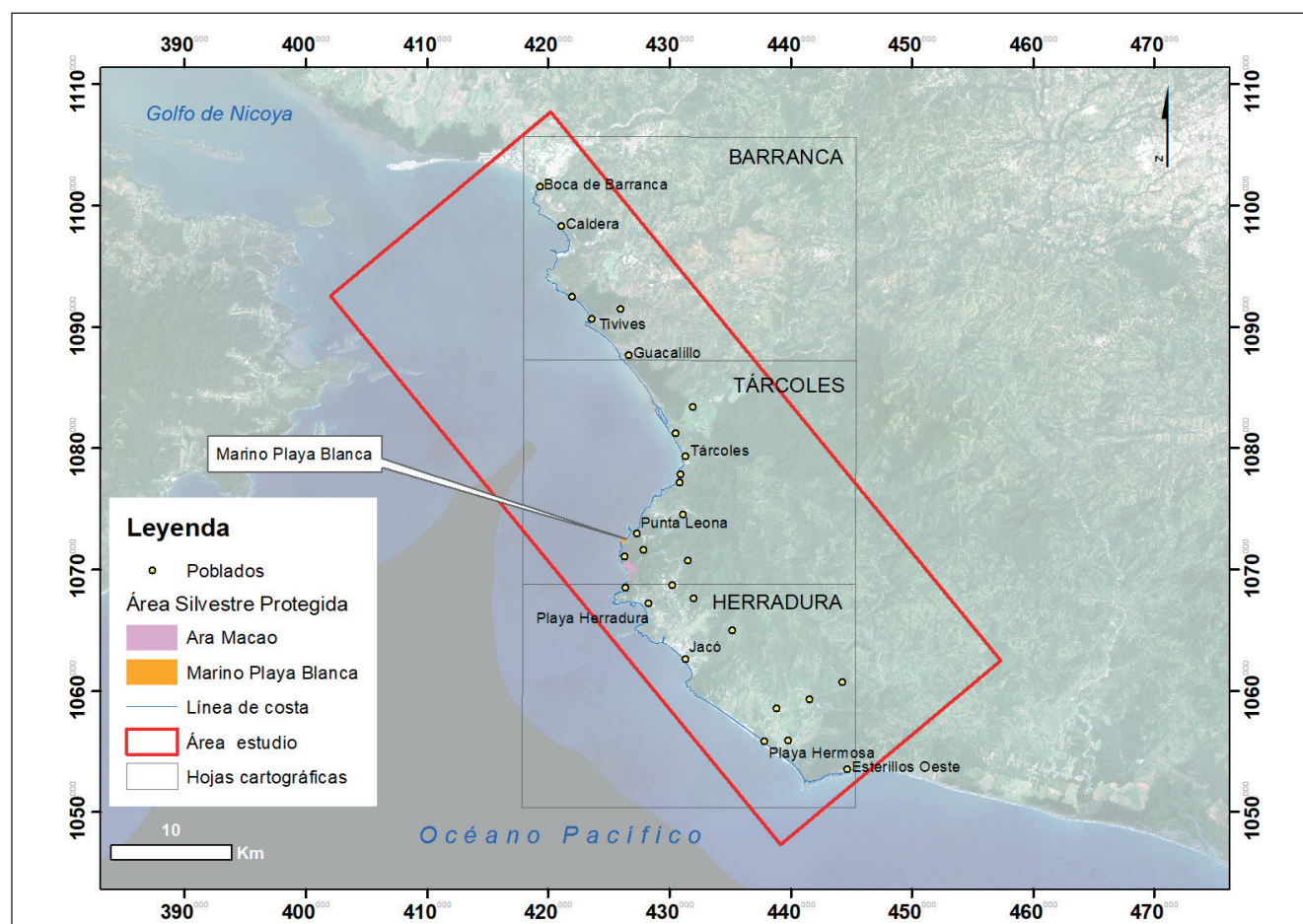


Figura 8. Área de estudio en la región pacífico central desde la localidad de Boca de Barranca (distrito de El Roble) hasta Esterillos Oeste (distrito Parrita).

Tabla 6. Listado de playas incluidas en la longitud de línea de costa estudiada.

	Nombre de Playa	Longitud (m)
1	Playa Agujas	611
2	Playa Azul	998
3	Playa Bajamar	3029
4	Playa Blanca	530
5	Playa Boca Barranca	735
6	Playa Caldera	3988
7	Playa Puerto Caldera	877
8	Playa Caletas	209
9	Playa Carrizal	507
10	Playa Corralillo	632
11	Playa Doña Ana	253
12	Playa Esterillos Oeste	613
13	Playa Guacalillo	6125
14	Playa Hermosa	10586
15	Playa Herradura	1811
16	Playa Jacó	4108
17	Playa Mantas	559
18	Playa Matapalo	407
19	Playa Pirata	110
20	Playa Pita	961
21	Playa Pógeres	298
22	Playa Tárcoles	2191
23	Playa Tivives	3177
	TOTAL	43,3 KM

3.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Para el sector comprendido entre Boca Barranca y Punta Judas (sector Playa Esterillos Oeste), la identificación de las variables utilizadas en el cálculo del IVC se realizó mediante un proceso sistemático que integra criterios científicos, técnicos y contextuales específicos de esta zona litoral. Dicho proceso consideró las características geomorfológicas, litológicas, oceanográficas y topográficas propias del sector, así como la disponibilidad y calidad de la información espacial. La metodología se estructuró en cuatro etapas principales: selección de variables físicas e hidrodinámicas, recopilación de datos base, análisis espacial y temporal de las fuentes, y, finalmente, integración cartográfica. Este procedimiento se resume en la Figura 2, que ilustra la secuencia metodológica aplicada.

El trabajo de campo fue necesario para validar las variables identificadas, así como para realizar el levantamiento geológico del área de estudio, dado que el lugar carecía de dicha información.

Como resultado de esta etapa, se elaboró el mapa geológico a escala 1:25 000, el cual será ampliado en el apartado 4.2.

Desde el punto de vista geológico, las playas están conformadas principalmente por depósitos inconsolidados que varían desde arenas finas hasta gruesas, en muchas ocasiones con contenido detrítico bioclástico, minerales pesados como la magnetita, así como con gravas y guijarros cerca de las desembocaduras de ríos y quebradas. Estas desembocaduras también están constituidas por depósitos inconsolidados de arenas finas a gruesas, gravas y guijarros provenientes del material transportado por los ríos, además de limos y lodos ocasionales en las proximidades de manglares, esteros y llanuras de marea.

3.3 CUANTIFICACIÓN DE VARIABLES

Se realizó una cuadrícula con elementos de 100 x 100 metros de norte a sur a lo largo de toda la línea de costa analizada, constituida en total por 1321 elementos. Para cada una de las siete variables se generó un archivo shape vectorial con los valores clasificados de 1 a 5 para cada elemento según la definición de variables del IVC. Esta información se integró en una geodatabase para cada variable, con el propósito de aplicar la fórmula del IVC mediante el uso del campo denominado “Valor IVC”, donde se registran los valores normalizados de cada parámetro para su posterior análisis e interpretación.

3.4 CARTOGRAFÍA DE VARIABLES

Se presenta la cartografía de cada una de las variables físicas e hidrodinámicas analizadas para la determinación del IVC en la RPC (ver desde la Figura 9 hasta la 15). Se generaron siete mapas: tipo de costa (geomorfología), litología, pendiente costera, tasa de cambio de la línea de costa, aumento del nivel del mar, altura significativa de la ola y amplitud máxima de la marea astronómica. Cada uno muestra la distribución espacial y magnitudes de valoración para cada variable.

Es importante mencionar que para la cartografía del ascenso del nivel medio del mar se tomó un valor constante de 2,43 mm/año clasificado en el rango de muy alto según la definición de variables del IVC.

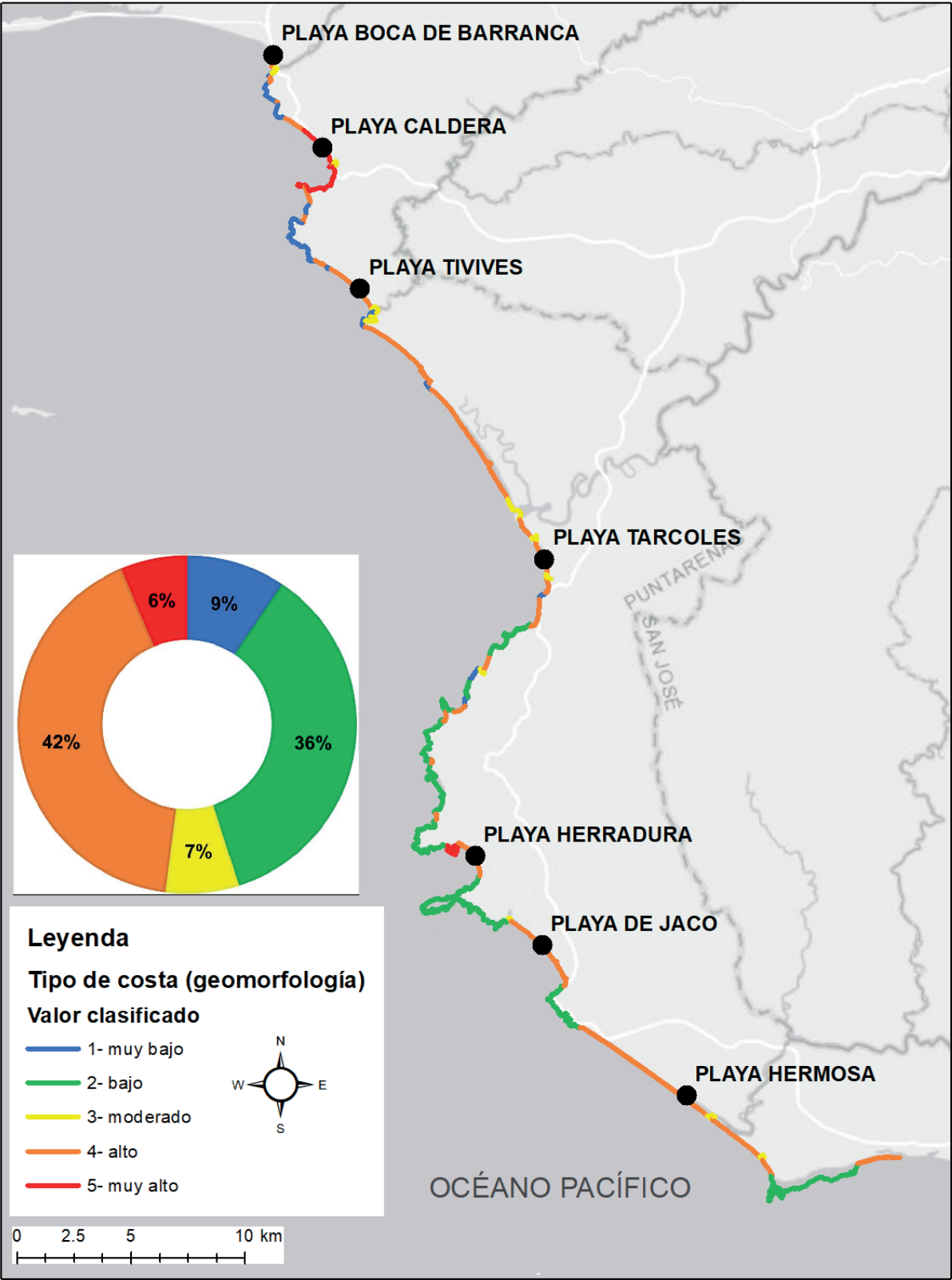


Figura 9. Cartografía y distribución de la variable “tipo de costa (geomorfología)” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios,(2025).

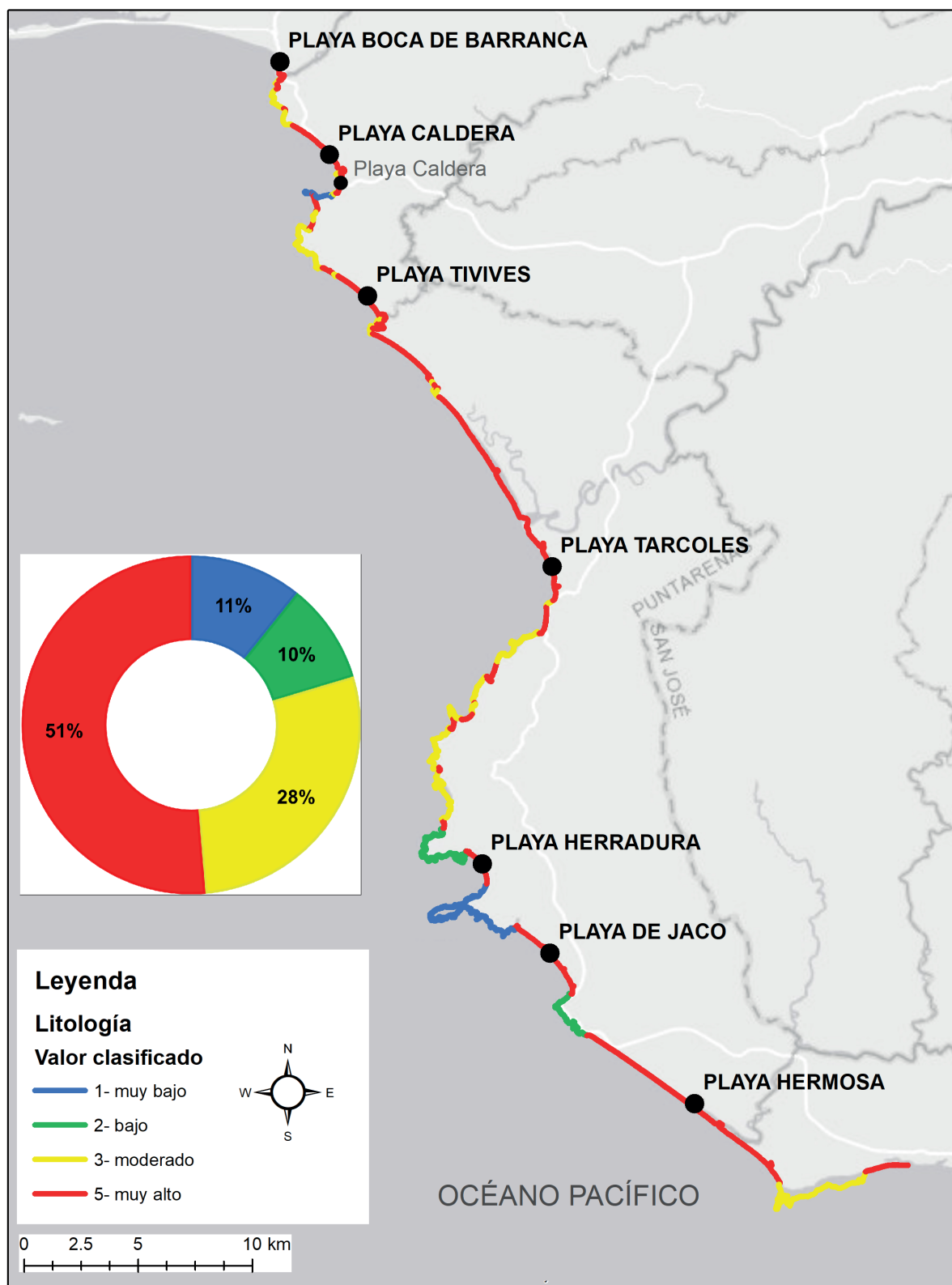


Figura 10. Cartografía y distribución de la variable “litología” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, (2025).

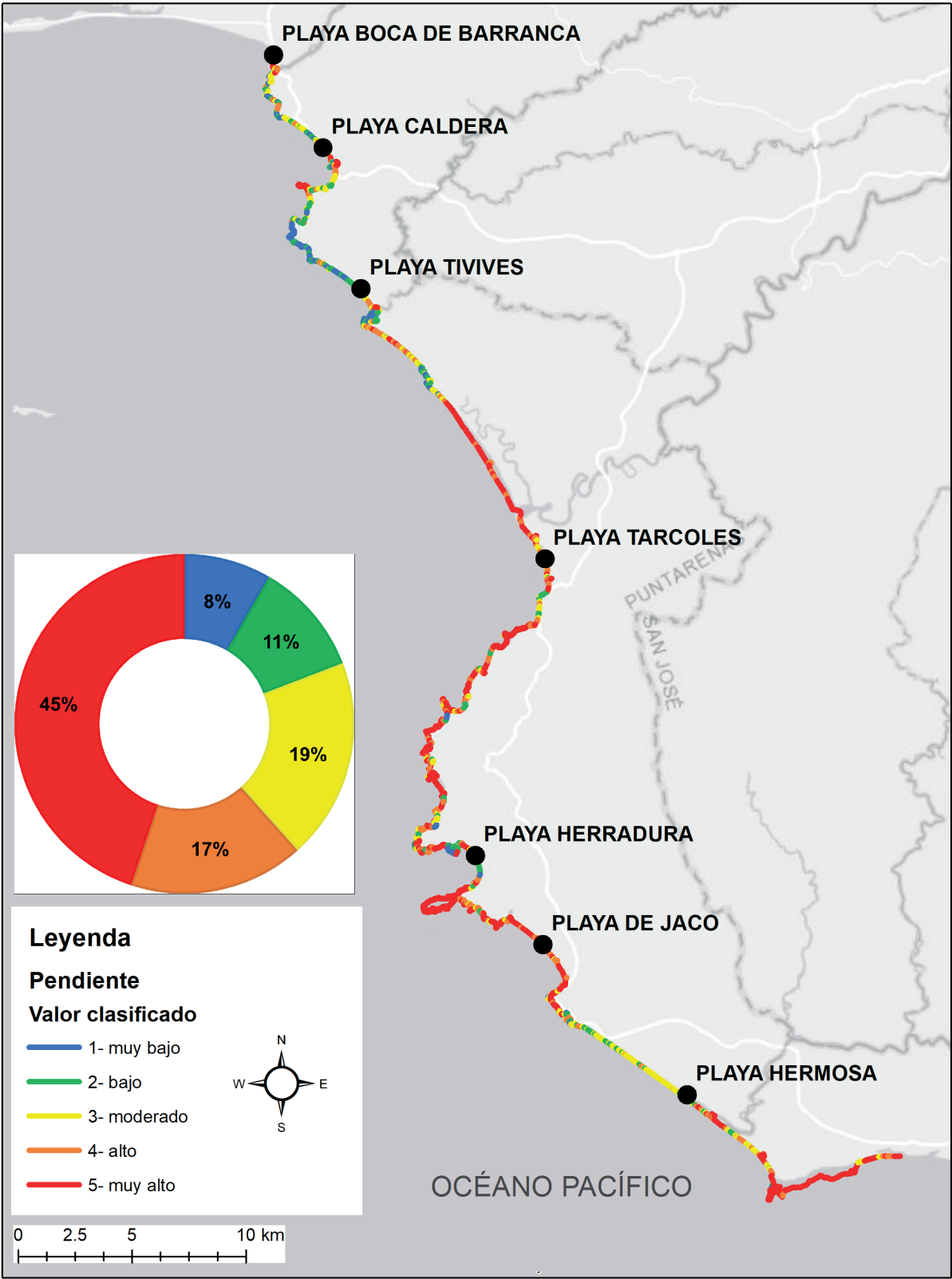


Figura 11. Cartografía y distribución de la variable “pendiente” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, (2025).

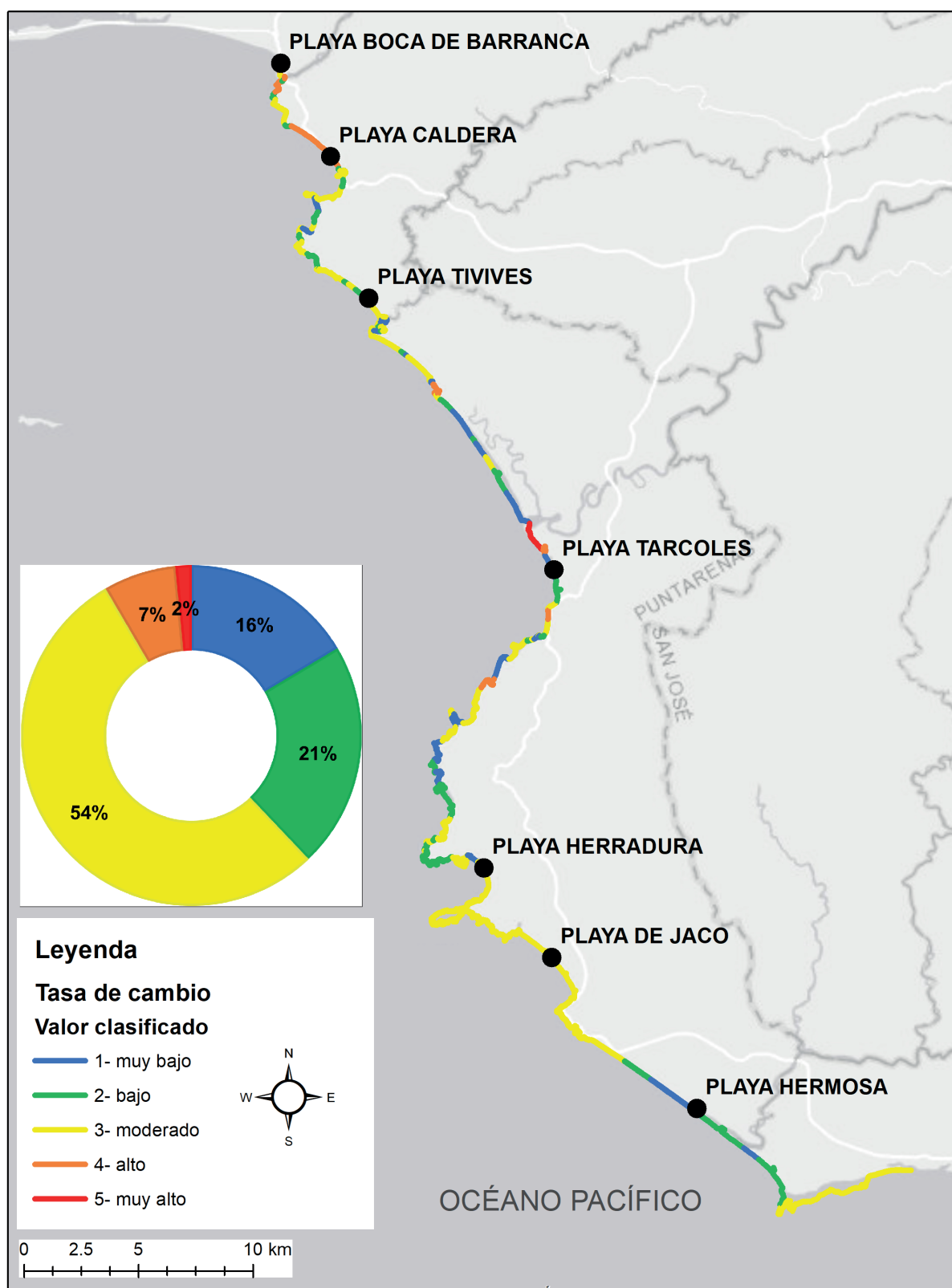


Figura 12. Cartografía y distribución de la variable “tasa de cambio” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, (2025).



Figura 13. Cartografía y distribución de la variable “aumento del nivel del mar” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: Datos propios, (2025).

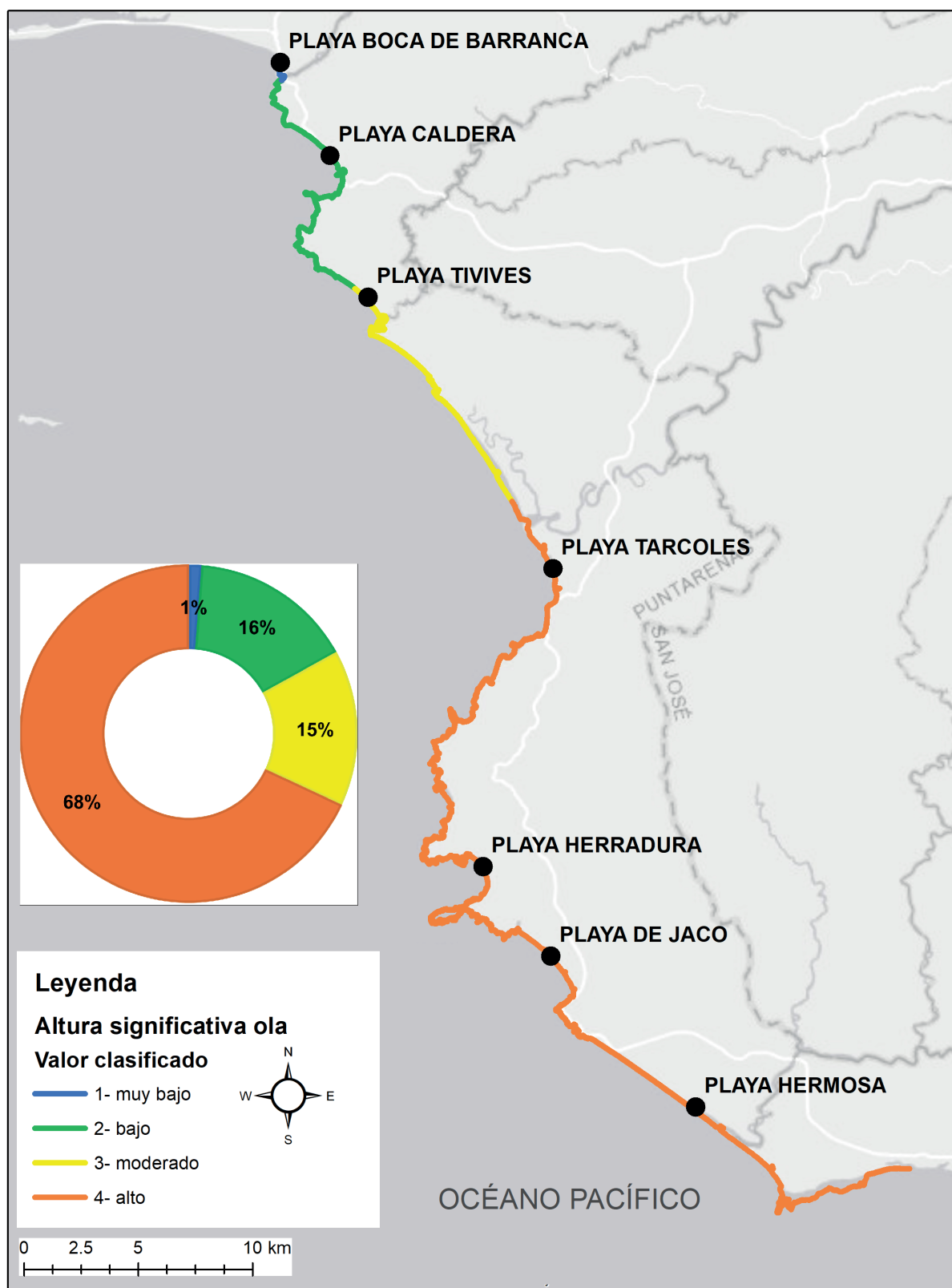


Figura 14. Cartografía y distribución de la variable “altura significativa de ola” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km).
Fuente: Datos propios, (2025).

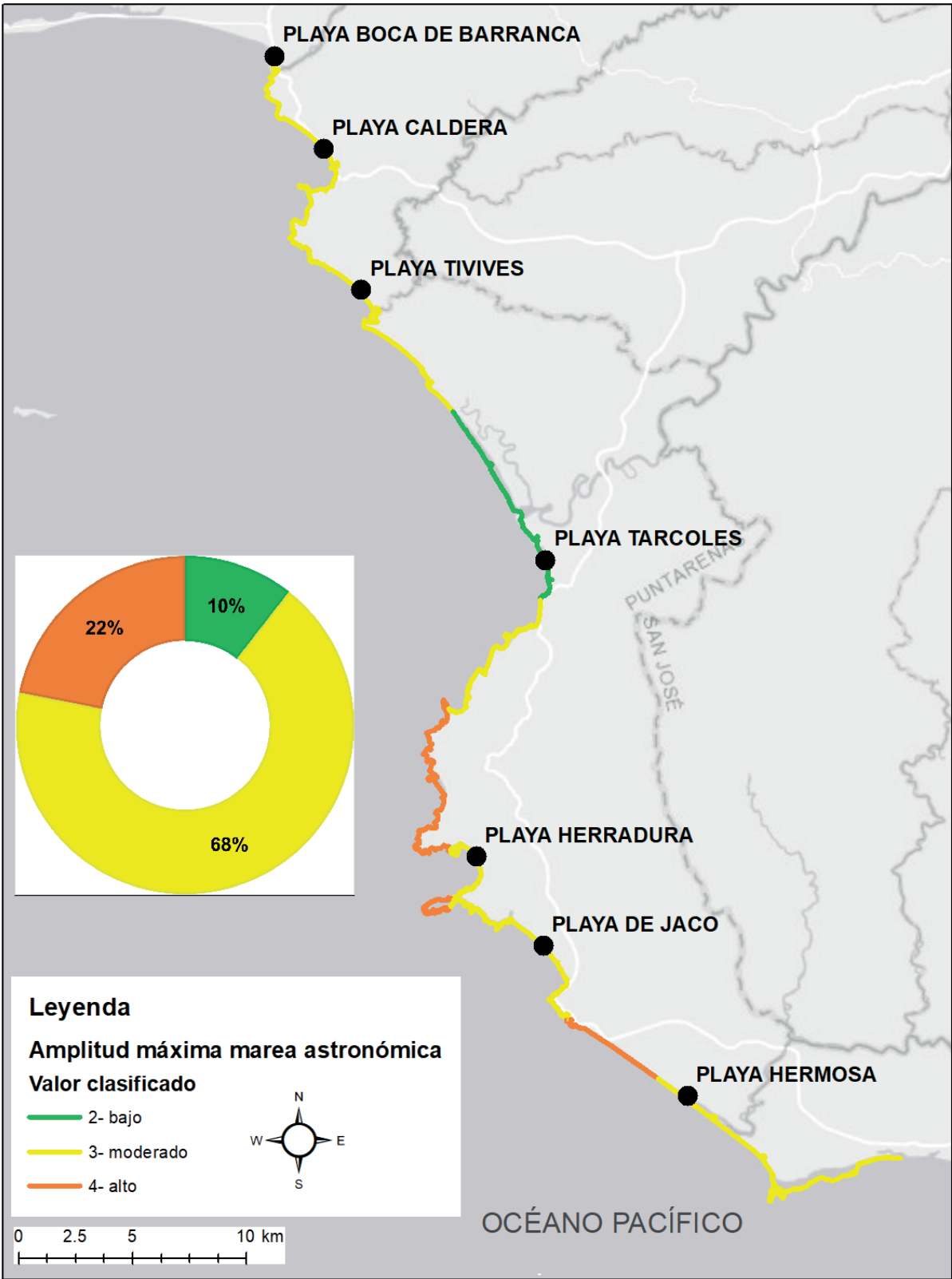


Figura 15. Cartografía y distribución de la variable “amplitud máxima de la marea astronómica” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km). Fuente: datos propios, (2025).

3.5. CÁLCULO DEL IVC

A partir de la cartografía de las variables se aplicó la ecuación del IVC dando como resultado el mapa final (Fig. 16), que integra las variables según los valores clasificados en rangos de 1 a 5. Este producto sintetiza las condiciones físicas y dinámicas del litoral, permitiendo identificar los sectores con mayor exposición a procesos erosivos y los de menor susceptibilidad ante la dinámica marina.

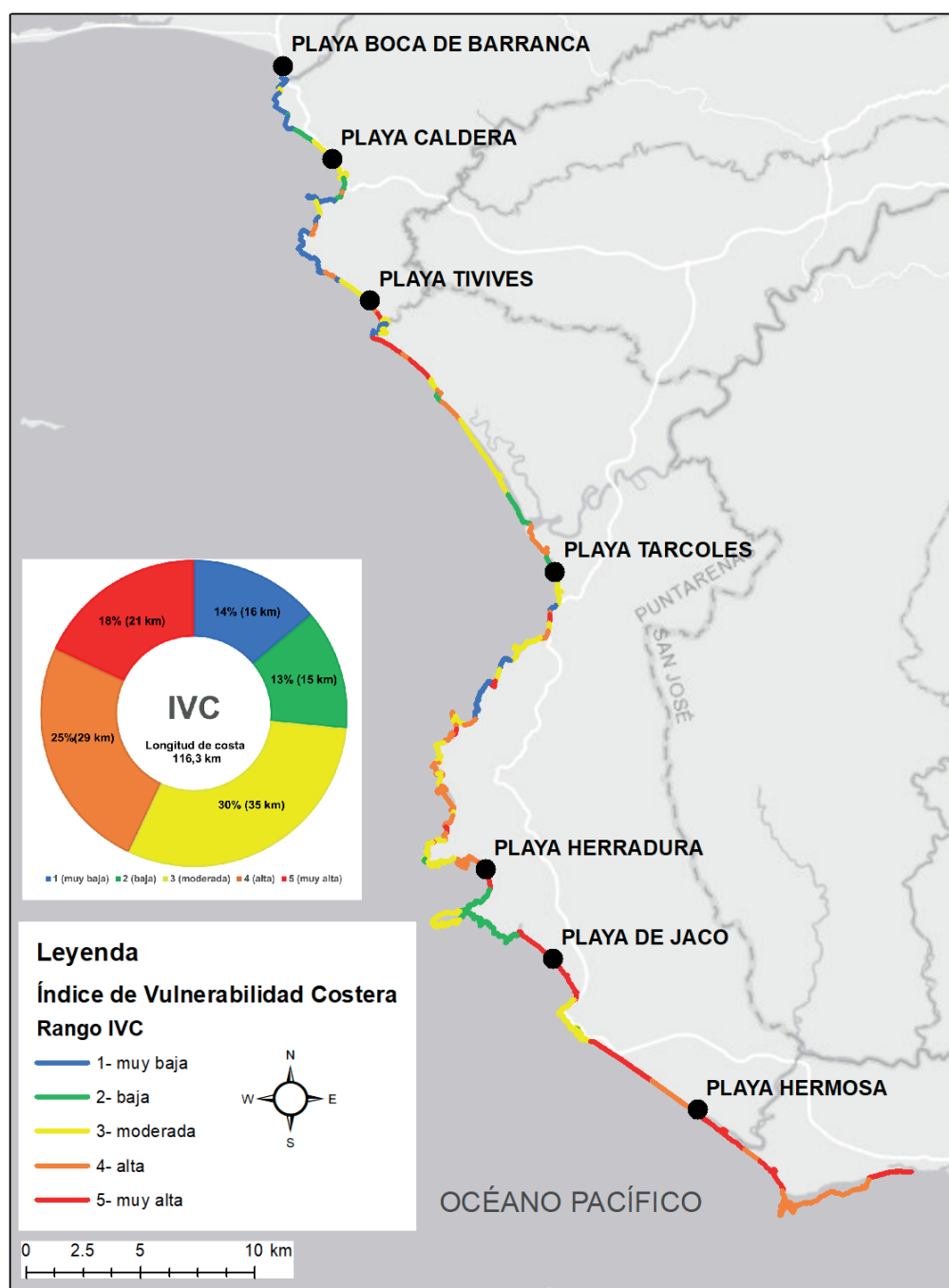


Figura 16. Cartografía y distribución del “Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC)” a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km).
Fuente: Datos propios, (2025).

3.5.1. Datos resultantes del cálculo del IVC

La cartografía de la costa desde Boca Barranca hasta Punta Mala, incluyendo Esterillos Oeste abarcó un total de 116,3 km de zona costera, de los cuales 16,1 km (13,8%) representa vulnerabilidad muy baja; 14,8 km (12,7%) vulnerabilidad baja; 35,4 km (30,4%) moderada; 29 km (24,9%) alta; y 21,09 km (18,1%) muy alta. Esto demuestra que la mayor parte de la zona costera presenta vulnerabilidad moderada, alta y muy alta respectivamente, véase Figura 17.

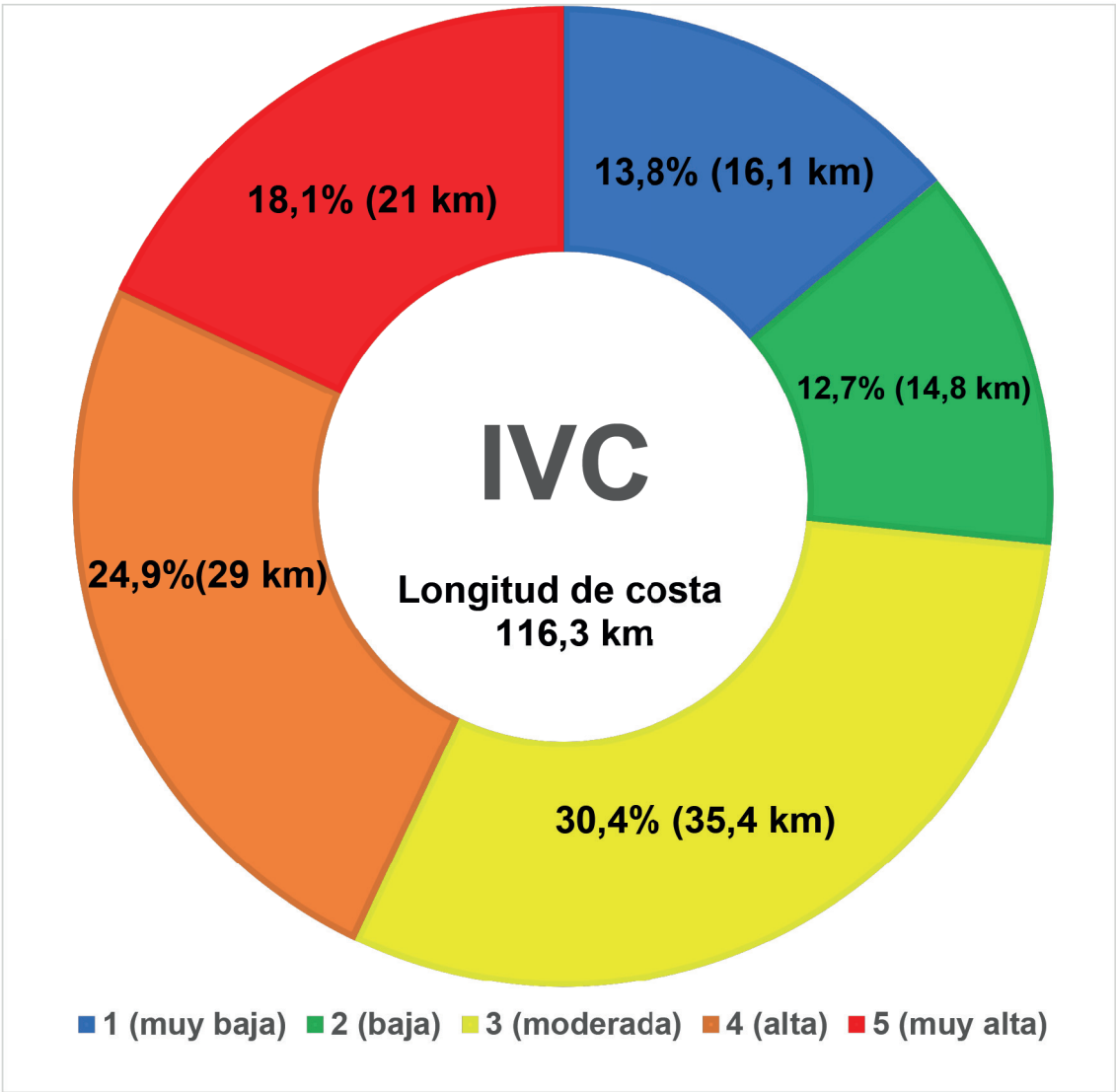


Figura 17. Distribución del IVC de la línea de costa analizada (116,3 km) con el porcentaje correspondiente a cada valor de vulnerabilidad.
Fuente: Datos propios, (2025).

Con respecto a los depósitos inconsolidados (por ejemplo, playas y desembocaduras de ríos), según el mapa geológico del Cuaternario, 0,4 km representan vulnerabilidad muy baja; 4,1 km, vulnerabilidad baja; 11,1 km, moderada; 10,5 km, alta; y 17,2 km, muy alta (Fig. 18). Es importante señalar que algunas playas presentan dos o más niveles de vulnerabilidad.

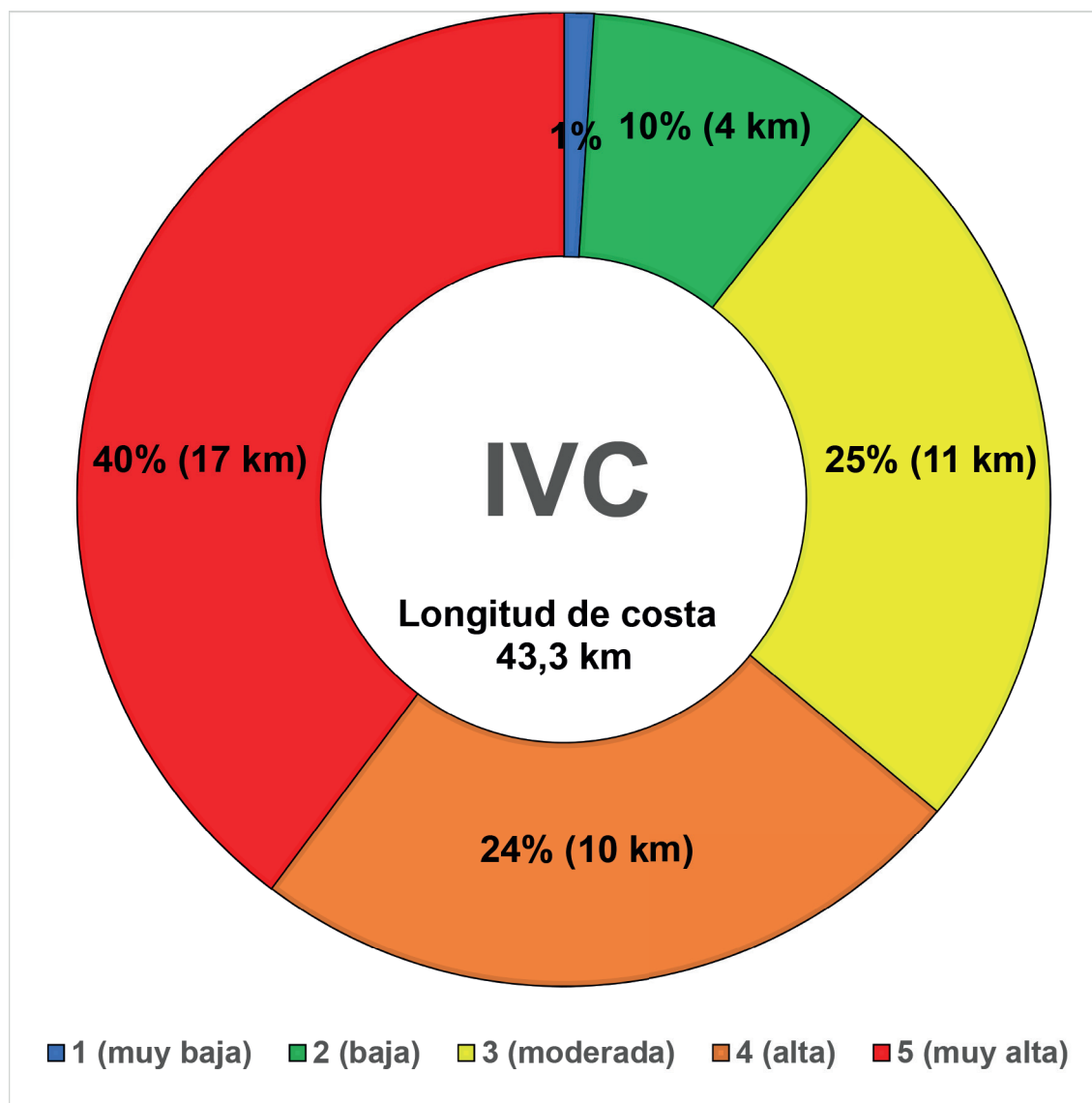


Figura 18. Resultado general del IVC de los depósitos inconsolidados (43,3 km) con el porcentaje correspondiente a cada valor de vulnerabilidad. Fuente: Datos propios, (2025).

Es importante indicar que en esta valoración el ascenso del nivel medio del mar se toma como un valor constante de 2,43 mm al año clasificado en el rango de “muy alto” según la tabla de valores del IVC propuesto (tabla 5).

A continuación, el análisis de cada uno de los rangos obtenidos:

VULNERABILIDAD MUY ALTA (VALOR 5)

Constituye un total de 21,09 km (18,1%), correspondientes a los tipos de costa de 11 playas (17,2 km), 5 desembocaduras de ríos (3,9 km) y un estero (0,57 km), véase en la tabla 7. Estos representan depósitos inconsolidados que, de acuerdo con la Figura 18, equivalen al 40% del IVC (Fig. 18). La susceptibilidad muy alta corresponde a segmentos extensos de playa, como es el caso de las playas Bajamar, Esterillos Oeste, Hermosa, Herradura y Jacó. Es importante señalar que las playas con este tipo de vulnerabilidad coinciden, en nuestro caso, con lugares no entrozados.

Las playas y desembocaduras de ríos asociadas a este resultado se dan en zonas donde la influencia marina es más directa y, por tanto, más susceptibles a los efectos del oleaje y la pleamar. Estas áreas presentan pendientes bajas a muy bajas, según la definición de variables del IVC, lo que favorece la erosión y la deposición de sedimentos.

A continuación, el análisis de las variables:

Tipo de costa (geomorfología): Tipo de costa (geomorfología): se presenta en rangos moderados, con un valor de “3”, asociados principalmente a la presencia de desembocaduras de ríos y esteros que pueden ser susceptibles a la erosión, como es el caso del río Agujas, producto de la dinámica fluvial (Fig. 21). El rango alto, con valor “4”, está asociado a las playas. En general, corresponden a llanuras o mesetas que forman playas, barras arenosas, rías, valles fluviales y llanuras de marea. Aunque estas playas desarrollan bermas bien definidas, estas no superan los 1,5 m de altura y, por lo general, son playas muy extensas tanto lateralmente como hacia el océano, lo que indica una plataforma continental muy amplia y de bajo o muy bajo ángulo (Figs. 19, 20, 26, 27, 29, 32, 33). En términos generales, estas playas se encuentran en un tipo de costa rectilínea y arenosa donde predomina la acumulación (Figs. 19, 20, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 33); en pocos casos, pueden ser erosivo-acumulativas, como en la desembocadura del río Agujas, Playa Blanca, Mata Palo, Herradura y Hermosa (muy local) (Figs. 20, 21, 22, 24, 29). Algunas playas, como Jacó, se han formado en una bahía arenosa limitada por acantilados.

Litología: se presenta en el rango de muy alto, valor de “5”, en todos los segmentos de clasificación litológica analizados según la definición de variables del IVC y corresponden con los depósitos inconsolidados. Son playas generalmente constituidas por arenas finas hasta gruesas (Figs. 19C, 22A, 28, 29A y B, 30, 32A, 33B) con aporte de guijarros y gravas cerca de las desembocaduras de ríos (Figs. 19B, 21C, 24A, 26B).

Según las características morfotectónica, el área norte está constituida por un sustrato de rocas volcánicas (lahares) del Pleistoceno de la Fm. Tivives hasta la zona costera; la zona central por un sustrato de rocas sedimentarias del Mioceno (areniscas, grauvacas y lutitas fosilíferas) de los Miembros Roca Carballo y Caletas de la Fm. Punta Carballo; y la zona sur subyacente por areniscas de la Fm. Punta Judas del Mioceno y los basaltos toleíticos del Complejo de Nicoya del Cretácico y Paleógeno (Figs. 23 y 25).

Pendiente: se presentan en un rango variado de bajo, moderado, alto y muy alto dependiendo de la zona costera según la definición de variables del IVC, sin embargo, la mayor incidencia se desarrolla con valores en el rango de moderado, alto y muy alto. En estos sitios, la pendiente costera varía entre 1,7° y 4,7°, lo que representa una inclinación moderada entre la zona intermareal y la franja terrestre seca. Este tipo de morfología favorece la acumulación de sedimentos y el desarrollo de playas amplias incrementando la susceptibilidad a procesos de inundación y retroceso del frente costero.

Variables hidrodinámicas: el análisis conjunto de la pendiente y las variables hidrodinámicas evidencia que los sectores clasificados con valor “5” del IVC corresponden principalmente a playas muy extensas y zonas de desembocadura, tales como Bajamar, Herradura, Jacó y gran parte de Playa Hermosa (tabla 7).

Al incorporar las variables hidrodinámicas, se observa que la altura significativa del ola (Hs) se desarrolla para valores principalmente en el rango de alto y de menor importancia en el rango de moderado, oscilando entre 0,63 m y 1,09 m, mientras que la marea astronómica máxima se desarrolla principalmente para valores en el rango de moderado y en menor grado en el rango de alto alcanzando valores de hasta 3,45 m en los sectores de Jacó, Agujas, Pógeres y Bajamar, y de aproximadamente 4,1 m en el sector norte de playa Hermosa, así como en las playas Blanca, Matapalo y Esterillos Oeste. La combinación de una pendiente moderada con estos rangos mareales y alturas de ola constituye un factor determinante en la generación de inundaciones costeras y en la redistribución del sedimento. La tasa de cambio de la línea de costa se desarrolla principalmente para valores en el rango de moderado, aunque también se encuentran valores en el rango de alto y en menor grado en el rango de bajo, con valores entre $-5,9$ cm/año y $+40$ cm/año, evidencia un patrón de retroceso sostenido en varios sectores durante los 28 años analizados, especialmente en las zonas de desembocadura como la quebrada Pita y el río Agujas.

Estos resultados de las variables geomorfológica y litológica sumado a los factores hidrodinámicos, pendiente baja y a la presión antrópica, explican la clasificación de muy alta vulnerabilidad física (IVC = 5) para estos tramos del litoral.

Tabla 7. Resultados obtenidos para vulnerabilidad muy alta (5), a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 21,09 km (18,1 %) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de costa analizados para cada tipo de costa.

	Tipo de costa	IVC	Longitud (km)	Sector
1	Playa Agujas	5	0,078	Sector sur
2	Playa Bajamar		2,783	Sectores noroeste y sureste
3	Playa Blanca		0,369	Sectores central y sur
4	Playa Esterillos Oeste		1,963	Sector oeste
5	Playa Hermosa		6,795	Sectores noroeste y sureste
6	Playa Herradura		1,108	Sector central y sur
7	Playa Jacó		4,108	Toda la playa
8	Playa Matapalo		0,352	Sectores central y sur
9	Playa Pita		0,124	Sector norte
10	Playa Pógeres		0,197	Sector sur
11	Playa Tivives		0,387	Sector sur
12	Desembocadura Quebrada Bonita		0,338	Noroeste de Playa Jacó
13	Desembocadura Quebrada Cañablancal		0,482	Sector Playa Herradura
14	Desembocadura Quebrada Pita		0,074	Sector Pógeres
15	Desembocadura río Agujas		0,665	Sector Playa Agujas
16	Desembocadura río Tusubres		0,688	Estero Los Diegos
17	Estero rolo		0,574	Sector Punta Judas
TOTAL			21,09 km	

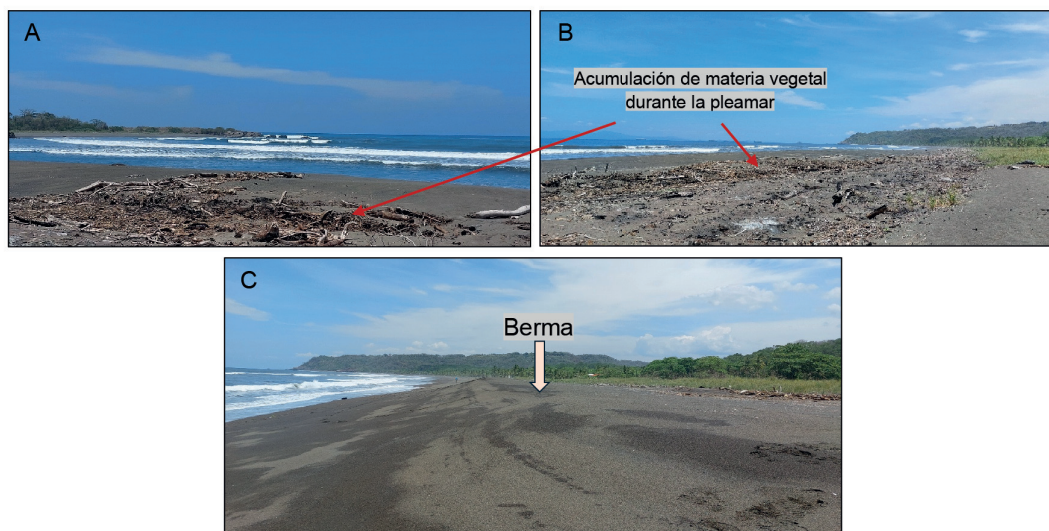


Figura 19. (PC285). Playa Tivives sector sur cerca de la desembocadura del río Jesús María. A y B) Se muestra un tipo de costa que desarrolla una playa muy extendida de bajo ángulo tanto lateral como hacia el océano con acumulación de materia vegetal por los efectos de la pleamar. C) indicativo de una plataforma continental muy extendida y una berma extendida a lo largo de la playa.

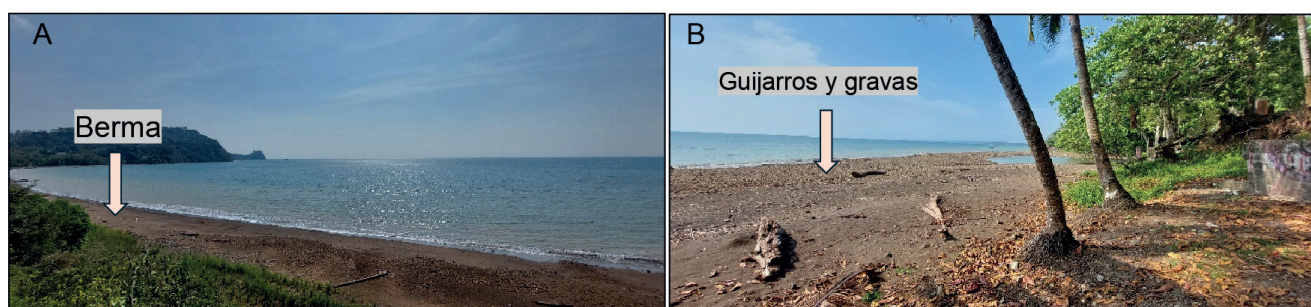


Figura 20. (PC205). Playa Pógeres sector sur cerca de la desembocadura de la Quebrada Pita. A) un tipo de costa con playa extendida de ángulo bajo a moderado con desarrollo de berma con vegetación. B) aporte de guijarros y gravas del río.



Figura 21. (PC061). Desembocadura del río Agujas y playa Agujas sector sur. (A y B) muestra la erosión costera proveniente de las avenidas del río Agujas. C) con aporte de guijarros y gravas del río que forman barras de arena y grava, cambiantes con el tiempo y la época del año por la dinámica del río.



Figura 22. (PC304). Playa Blanca sector central. A) muestra los taludes de suelo producto de la meteorización de areniscas del Miembro Caletas de la Fm. Punta Carballo, que se da por la transición natural del litoral continente – océano y la influencia del oleaje marino. A y B) se muestra también los muros de retención para evitar la erosión costera.



Figura 23. (PC054). Playa Matapalo sector sur. A y B) acantilados formados por las areniscas del Miembro Caletas de la Fm. Punta Carballo, con desarrollo de berma y vegetación trasera con alguna evidencia de erosión en la base de berma. Constituye una playa poco extendida hacia el océano cuyo basamento constituye plataforma de abrasión de la misma formación geológica.

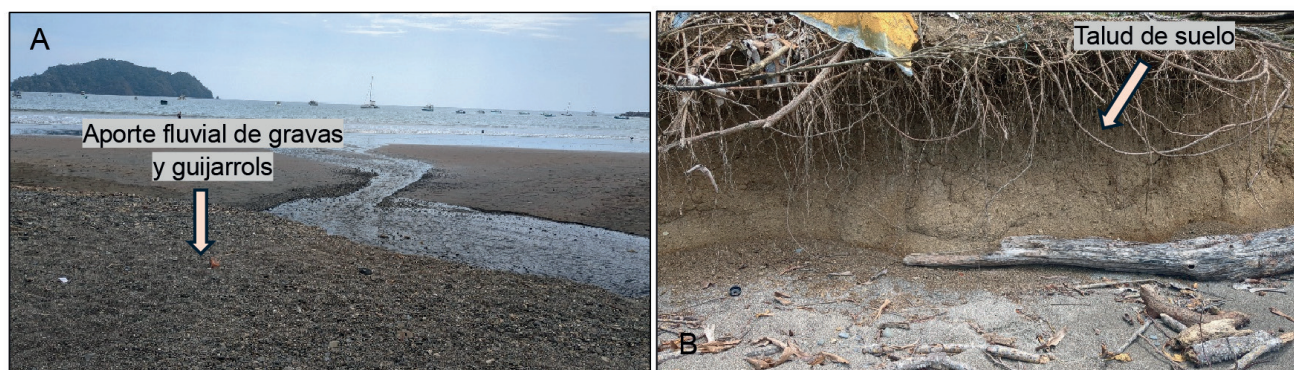


Figura 24. (PC314 y PC318). Playa Herradura sector central y sur respectivamente. A) El punto PCC314 es la desembocadura de la Quebrada Cañablancal. Constituye una playa extendida de noroeste a sureste con desarrollo de una berma trasera de poca altura. Se puede observar el aporte fluvial de gravas y guijarro en la desembocadura de rías que generan acreción. B) Talud de suelo producto de la meteorización de basaltos de Complejo de Nicoya con erosión costera producto del oleaje de pleamar.

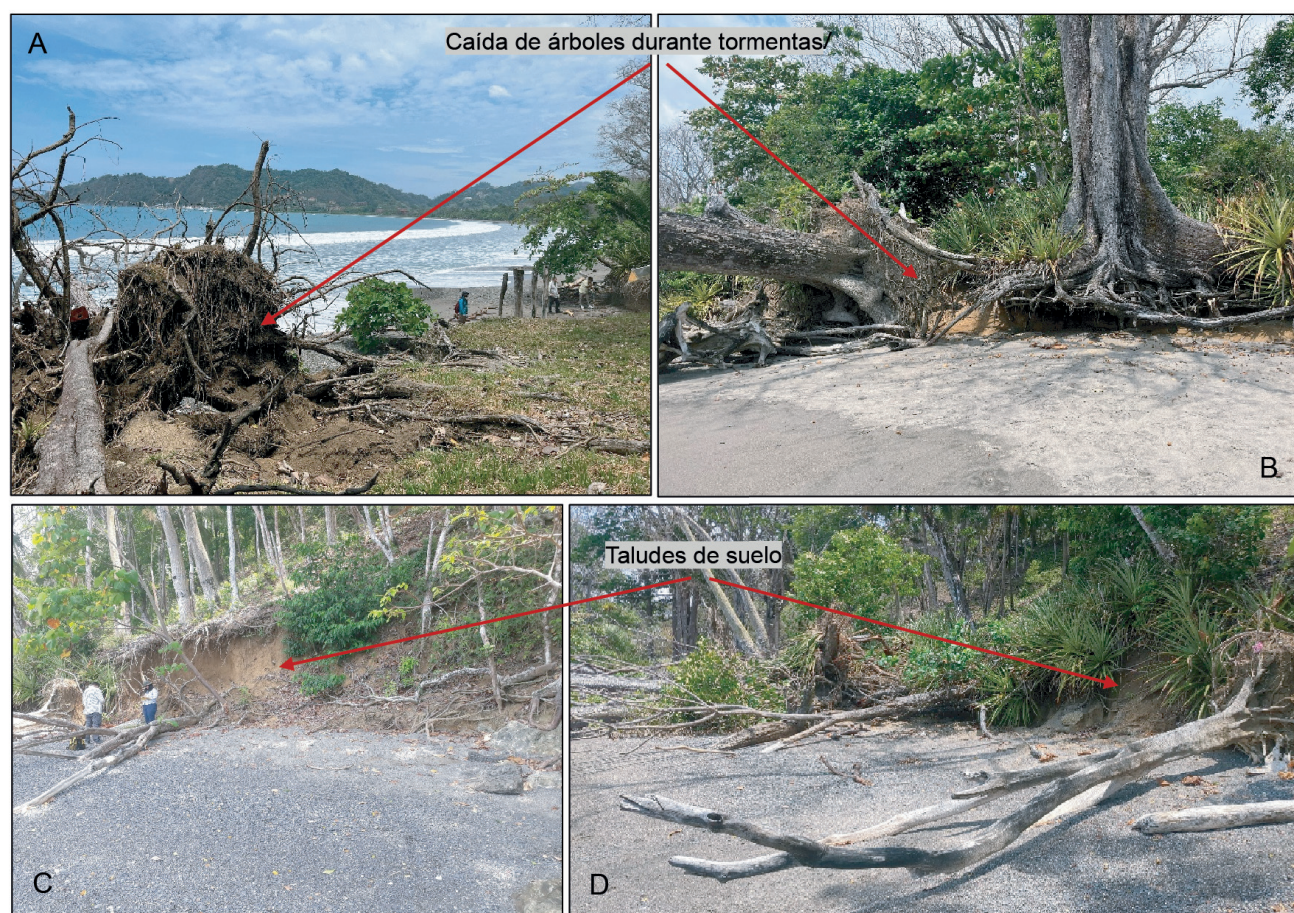


Figura 25. (PC312). Playa Herradura sector sur. A y B) caída de árboles producto del oleaje y episodios de tormentas. La playa limita con acantilados de la misma formación geológica. C y D) se observan taludes de suelo producto de la meteorización de basaltos del Complejo de Nicoya, con erosión costera.

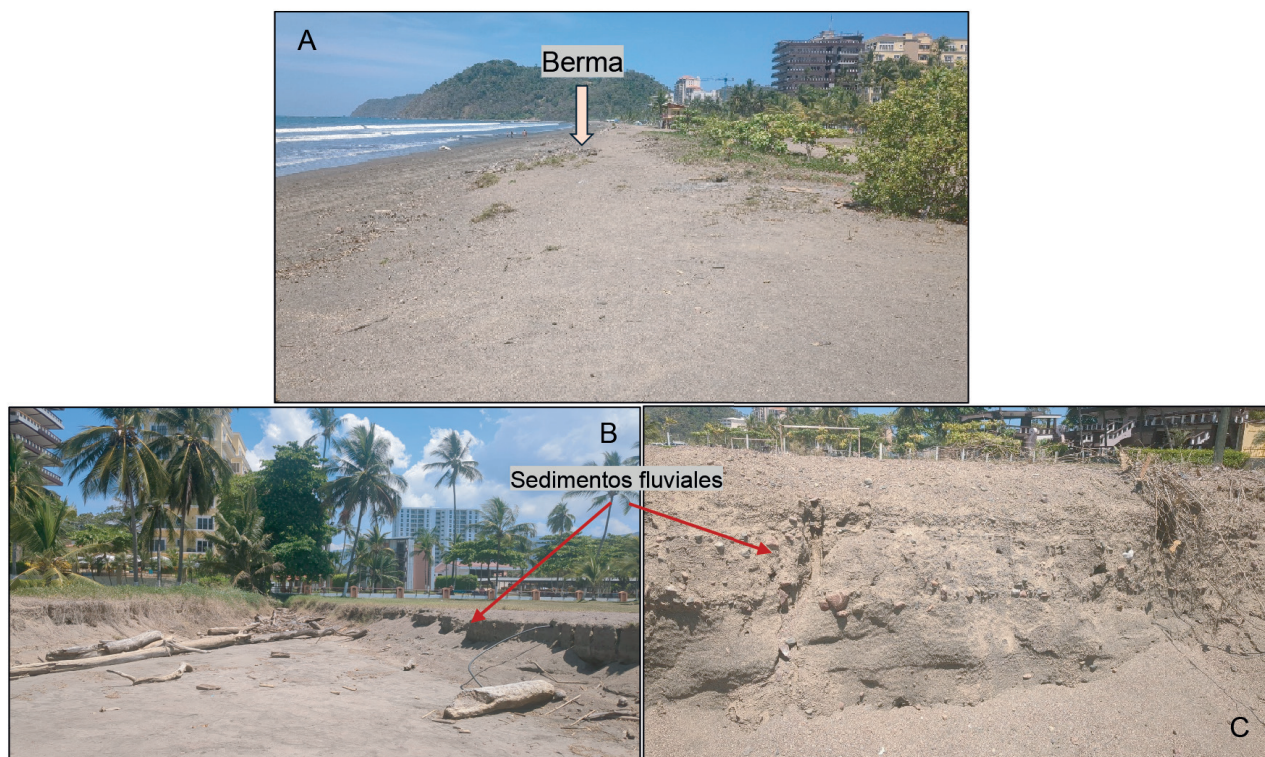


Figura 26. (PC022 y PC023). Playa Jacó sector norte. A) constituye una playa extendida tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental extendida, con una berma extendida paralela a la playa. B y C) hay aporte de sedimentos fluviales de rías cerca de la costa generando acreción costera.



Figura 27. (PC018). Playa Jacó sector sur. A) constituye una playa extendida tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental extendida, con mezcla de sedimentos fluviales y marinos cerca de la costa. B) en la línea litoral hay erosión producto del oleaje de pleamar.

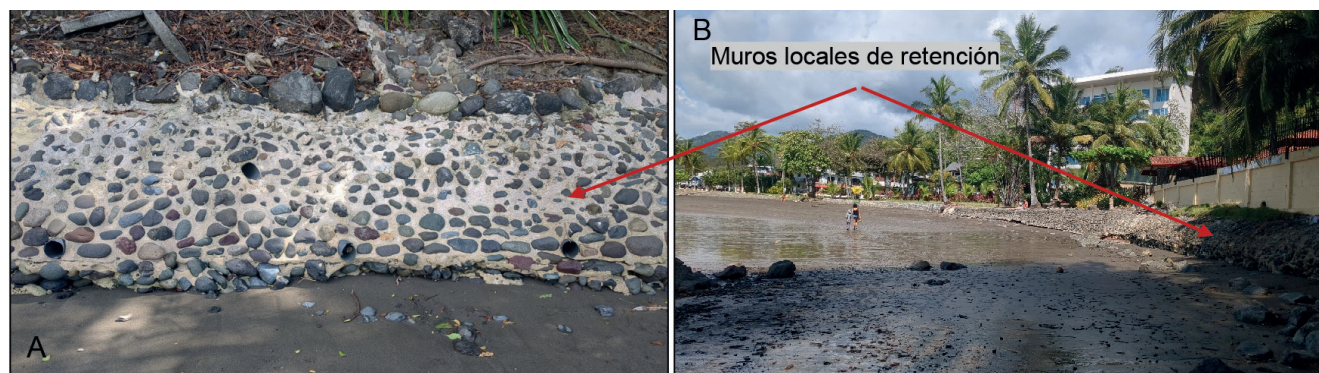


Figura 28. (PC017). Playa Jacó sector sur. A y B) muestra la extensión de la playa y la construcción de muros pequeños locales para evitar la erosión producto del oleaje de pleamar. El sector sur está más sometido a los efectos del oleaje y erosión en relación al sector norte donde hay acreción.

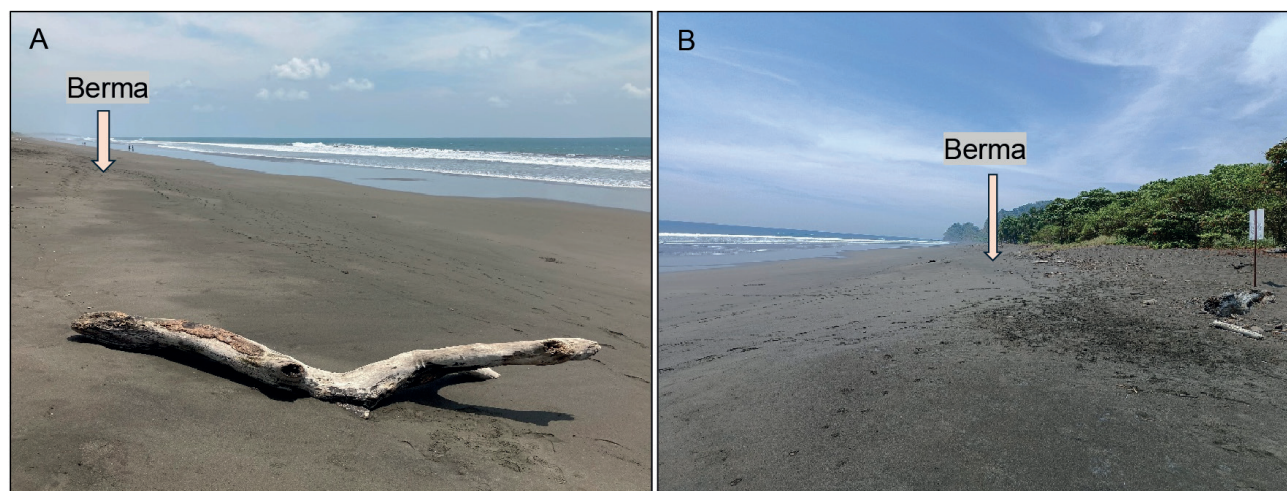


Figura 29. (PC034). Playa Hermosa sector noroeste. A y B) muestra la gran extensión de esta playa tanto lateral como hacia el océano indicativo de una plataforma continental muy extendida, con el desarrollo de una berma bien definida paralela a la playa, lo cual favorece la disipación de la energía del oleaje producto de las mareas y de la pleamar.

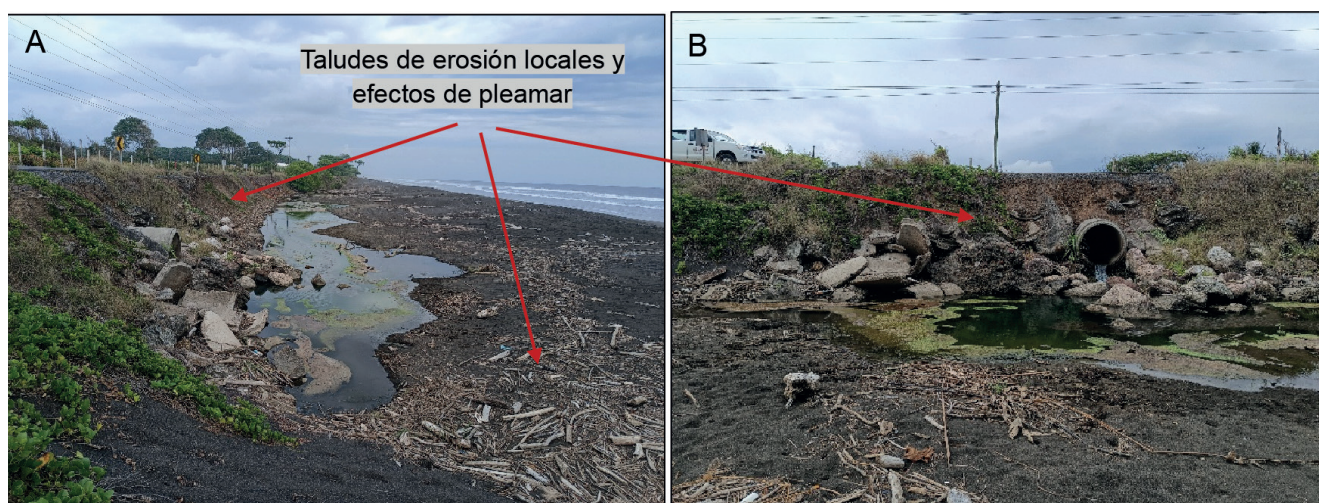


Figura 30. (PC276). Playa Hermosa sector noroeste. A y B) muestra localmente el desagüe de drenajes de pequeñas quebradas hacia la costa con taludes de erosión menores a 2 metros y la presencia de materia vegetal por los efectos de la pleamar.

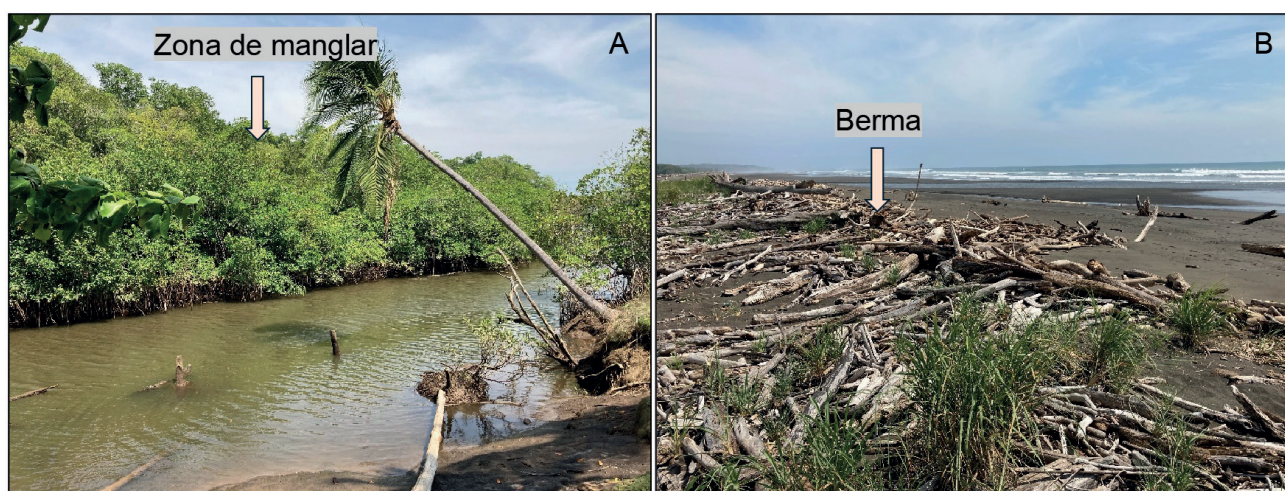
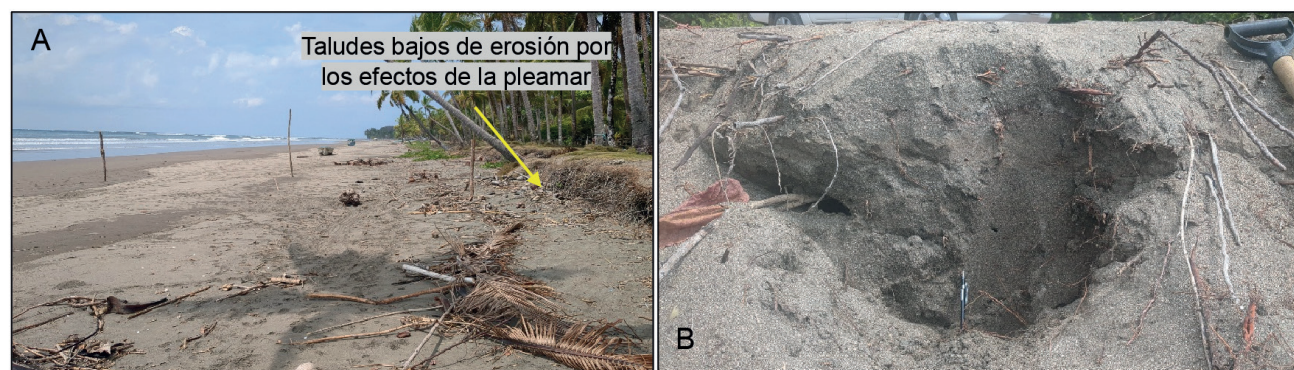
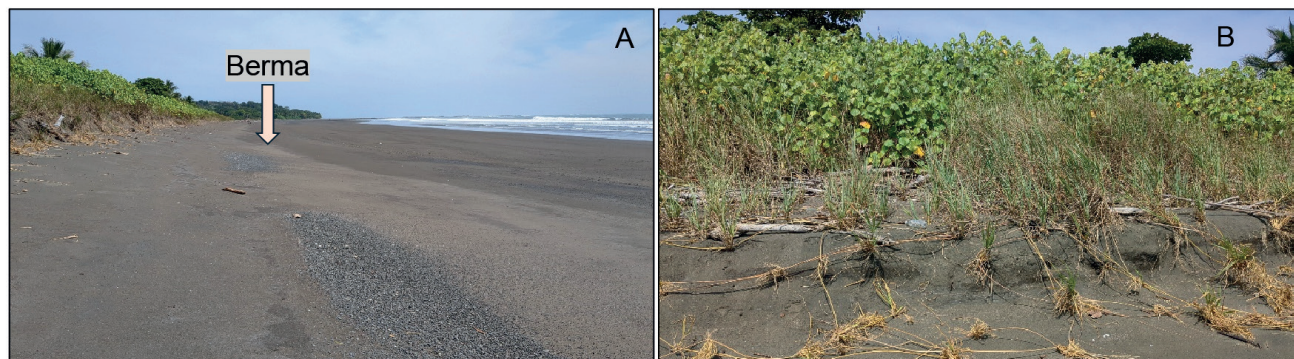


Figura 31. (PC035). Playa Hermosa sector central. A) muestra la presencia de manglares cerca de la costa que actúan como amortiguadores naturales. B) evidencias de las mareas durante la pleamar en las bermas de playa con la acumulación de troncos en un tipo de costa de playa muy extendida y de muy baja pendiente.



VULNERABILIDAD ALTA (VALOR 4)

Corresponde a una extensión total de 29 km (25%), y constituye geoformas tal como se indica en la tabla 8 (playa, playa antropizada, desembocaduras de río y una zona lagunar).

A lo largo de 10 km de la línea de costa, predominan depósitos inconsolidados, principalmente de tipo playa, que evidencian una vulnerabilidad alta (Fig. 8).

Las playas antropizada abarcan 2,4 km en el sector central del área de estudio (Marina Los Sueños en Herradura y cerca de las desembocaduras de las Quebradas Vázquez y Camaronal); las desembocaduras de ríos comprenden 1,3 km en el sector central; y la zona lagunar ocupa 0,5 km en el sector norte.

Es relevante destacar que, en este estudio, las zonas correspondientes a plataformas de abrasión y plataformas de abrasión con acantilados se identifican como áreas de alta vulnerabilidad, a pesar de que, de acuerdo con el rango de variables (tabla 5), presentan valores bajos o muy bajos. Sin embargo, los procesos geológicos e hidrodinámicos observados en el sector evidencian una erosión activa y una exposición constante al oleaje, lo que justifica su clasificación dentro de este nivel de vulnerabilidad. No obstante, la actuación de otras variables aumenta la vulnerabilidad de esta.

Los segmentos de playa con esta vulnerabilidad se dan en distancias de moderada extensión (tabla 8), excepto en playa Hermosa y playa Guacalillo. Las plataformas de abrasión con acantilado presentan igual extensiones moderadas, excepto la ubicada cerca de Caletas. Los segmentos de costa igualmente importantes clasificados como plataformas de abrasión son los de Punta Judas – Punta Mala con 7,6 km de extensión y otro de menor extensión en el sector de Punta Leona. En cuanto a las desembocaduras de ríos constituyen segmentos de playa de poca extensión tal como se observa en la tabla 8, excepto la del sector de Playa Azul. Otro sector de playa de no menos importancia es el de Laguna Carrizal en el sector de Bajamar.

Un factor determinante que justifica su clasificación dentro del rango alto de vulnerabilidad, requiriendo la implementación de medidas preventivas y correctivas es la amplitud máxima de la marea astronómica. Requiriendo la implementación de medidas preventivas y correctivas.

A continuación, el análisis de las variables:

Tipo de costa (geomorfología): se presentan en los rangos de bajo, moderado, alto y muy alto en todos los segmentos de tipos de costas analizados según la definición de variables del IVC. Los de rango muy alto (valor 5) corresponden a las playas antropizada; los de rango alto (valor 4) corresponden con playas; los de rango moderado (valor 3) corresponden a las desembocaduras de ríos; los de rango bajo (valor 2) corresponden a las plataformas de abrasión con acantilados y plataformas de abrasión (Figs. 41, 42, 43).

Las playas desarrollan bermas bien definidas y en algunos casos poco desarrolladas, estas no superan los 2 m de altura y generalmente son playas muy extendidas tanto lateralmente como hacia el océano, indicando una plataforma continental muy extensa de bajo o muy bajo ángulo (Figs. 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40). Este factor favorece la disipación de la energía por el efecto del oleaje y la pleamar. En términos generales las playas están contenidas en un tipo de costa rectilínea y arenosa donde predomina la acumulación (Figs. 34, 35, 35, 37, 38, 39, 40). Algunas playas como Mantas, Corralillo, Caletas y Herradura se han formado en una bahía arenosa limitada por acantilados y plataformas de abrasión (Figs. 34, 40, 41, 42, 43).

Litología: Los resultados se distribuyen en los rangos de bajo, moderado y muy alto en todos los segmentos de clasificación litológica analizados, de acuerdo con la definición de variables del IVC (tabla 5). El rango muy alto (valor 5) corresponde a los depósitos inconsolidados, el moderado (valor 3) a rocas con resistencia media a la abrasión, y el bajo (valor 2) a rocas altamente resistentes a la abrasión.

Los depósitos inconsolidados, característicos de las playas, están conformados por arenas finas a gruesas, con presencia de guijarros y gravas en las proximidades de las desembocaduras de los ríos.

Relacionado a las unidades litológicas que conforman el sustrato el área norte está constituida por rocas

Guía Metodológica

volcaniclásticas (lahares) del Pleistoceno de la Fm. Tivives y el Miembro Mata de Limón (tobas, tobitas e ignimbritas) del Mioceno; la zona central de rocas sedimentarias (areniscas, grauvacas y lutitas fosilíferas) de los Miembros Roca Carballo y Caletas de la Fm. Punta Carballo del Mioceno; y la zona sur subyugada por basaltos toleíticos del Complejo de Nicoya del Cretácico y Paleógeno.

Pendiente: presentan playas extensas con pendientes entre $2,9^\circ$ y $4,6^\circ$, además de sectores con plataformas de abrasión, especialmente en Punta Judas – Punta Mala, donde la superficie rocosa se extiende de forma continua. También se incluyen zonas acantiladas con bases de plataforma poco irregulares, expuestas a una fuerte acción del oleaje, particularmente antes y después de Caletas y Matapalo. En el sector de la Marina Los Sueños (Herradura), la pendiente es notablemente plana, influenciada por la desembocadura de las quebradas Cañablancal, Camaronal y Vásquez, mientras que en Playa Azul se observa un patrón similar asociado a la desembocadura del río Tárcoles.

Variables hidrodinámicas: el análisis conjunto de la pendiente y las variables hidrodinámicas permitió identificar sectores con valoración 4.

Las variables hidrodinámicas muestran una altura significativa de ola (H_s) entre 0,86 m y 1,09 m, concentrada en los sectores centrales y sur del área de estudio, como en playas Hermosa, Mantas, Blanca, Azul y Punta Judas. La amplitud máxima de la marea astronómica alcanza hasta 3,76 m en playas como Coyol, Caletas y playa Blanca, lo que, combinado con las pendientes moderadas, incrementa la susceptibilidad de estos tramos a la inundación costera y redistribución de sedimentos.

En cuanto a la tasa de cambio de la línea de costa (1997–2025), se observa una dinámica mixta con valores entre $-5,9$ cm/año y $+40$ cm/año. Se registran procesos de erosión en sectores como la desembocadura del río Tárcoles (Playa Azul), y de acreción en el sector norte de Guacalillo y en los extremos de Tivives. Estos resultados evidencian una dinámica costera activa, donde la interacción entre pendiente, oleaje y procesos sedimentarios genera condiciones de vulnerabilidad alta, especialmente en playas amplias sometidas a la influencia combinada del oleaje y las mareas astronómicas.

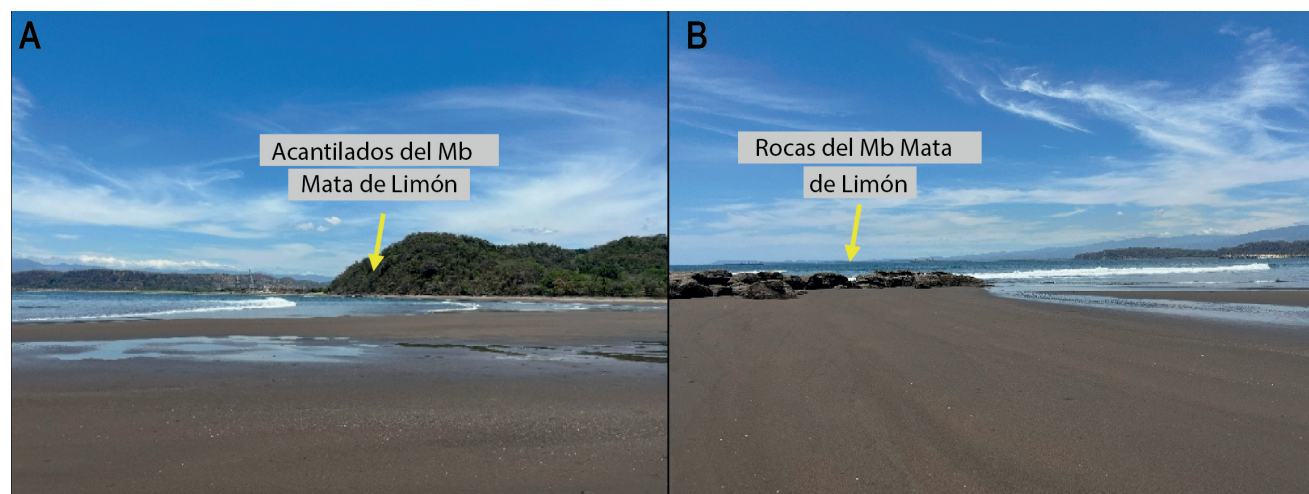


Figura 34. (PC256). Playa Corralillo. A) vista hacia el norte, se muestra un tipo de costa que desarrolla una playa muy extendida de bajo ángulo tanto lateral como hacia el océano. B) vista hacia el sur, se desarrolla entre acantilados y rocas del Miembro Mata de Limón.

Tabla 8. Resultados obtenidos para vulnerabilidad alta (4), a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 29 km (25%) del área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de costa analizados para cada tipo de costa

	Playa	IVC	Longitud (km)	Sector
1	Playa Tivives	4	0,619	Sector noroeste
2	Playa Tivives		0,839	Sector sureste
3	Playa Pógeres		0,101	Sector norte
4	Playa Pita		0,508	Sector sur
5	Playa Mantas		0,559	Toda la playa
6	Playa Herradura		0,388	Sector noroeste
7	Playa Hermosa		3,562	Sector sureste
8	Playa Guacalillo		1,137	Sector noroeste
9	Playa Corralillo		0,632	Toda la playa
10	Playa Caletas		0,209	Toda la playa
11	Playa Caldera		0,216	Sector sur
12	Playa Blanca		0,217	Sector norte
13	Playa Bajamar		0,391	Sector central
14	Playa Azul		0,998	Toda la playa
15	Playa antropizada (Marina Los Sueños)		2,206	Noroeste de Herradura
16	Playa antropizada		0,225	Noroeste de Herradura
17	Plataforma de abrasión con acantilado		0,835	Noreste de Punta Sucia
18	Plataforma de abrasión con acantilado		0,793	Caletas
19	Plataforma de abrasión con acantilado		2,665	Sureste de Caletas
20	Plataforma de abrasión con acantilado		0,913	Sector Coyol
21	Plataforma de abrasión con acantilado		0,901	Sector Matapalo y Fila Conejo
22	Plataforma de abrasión		0,626	Punta Leona
23	Plataforma de abrasión		7,602	Punta Judas-Punta Mala
24	Laguna Carrizal		0,521	Sector Bajamar
25	Desembocadura río (pantano)		0,800	Sector Playa Azul
26	Desembocadura río Tárcos		0,323	Sector sur
27	Desembocadura de río		0,207	Quebradas Vázquez y Camaronal, noroeste de Herradura
TOTAL			29 km	

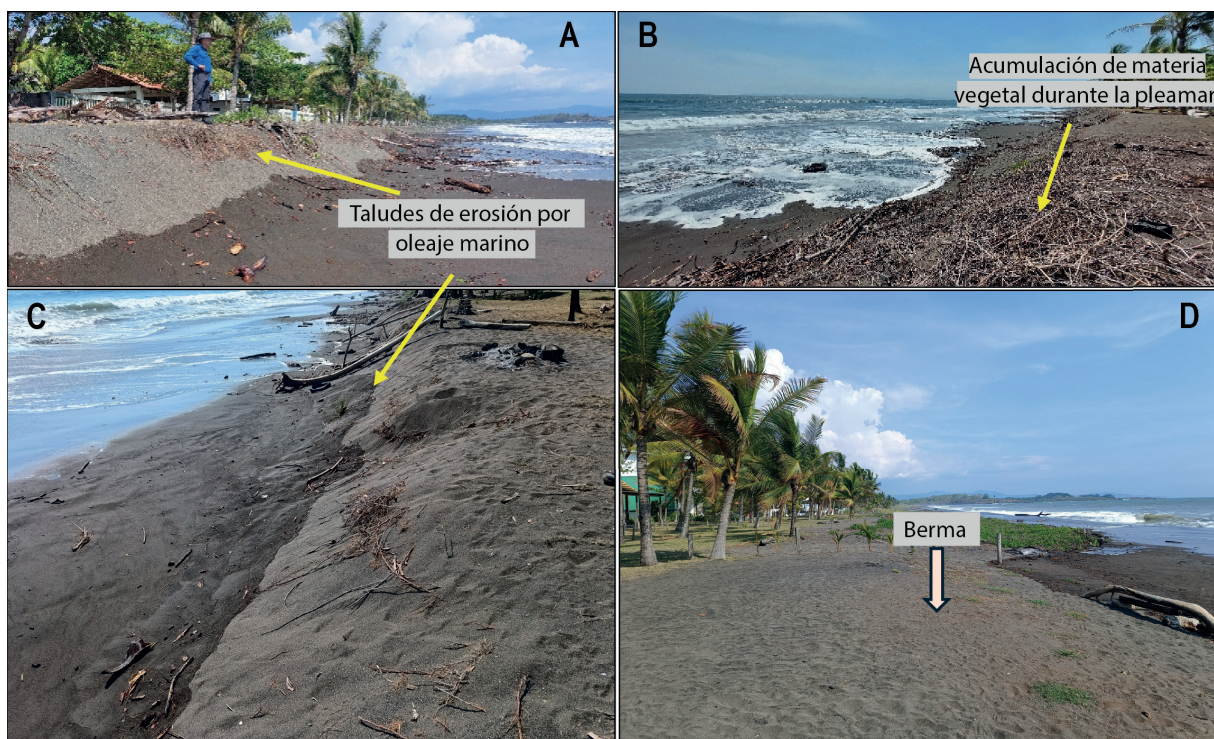


Figura 35. (PC289).Playa Tivives sector sureste. A y C) se muestran los efectos del oleaje y de pleamar en el borde costero y taludes de erosión. B) acumulación de materia vegetal por oleaje que indican el límite de la influencia marina, D) muestra una berma poco desarrollada.

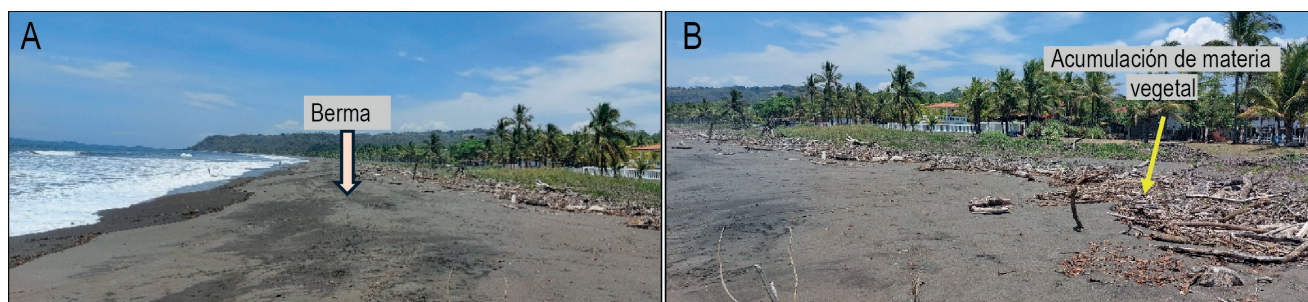


Figura 36. (PC286). Playa Tivives sector sureste. A) un tipo de costa que desarrolla una playa extendida y una berma bien desarrollada a lo largo de la playa. B) muestra los efectos de acumulación de ramas producto de la pleamar.

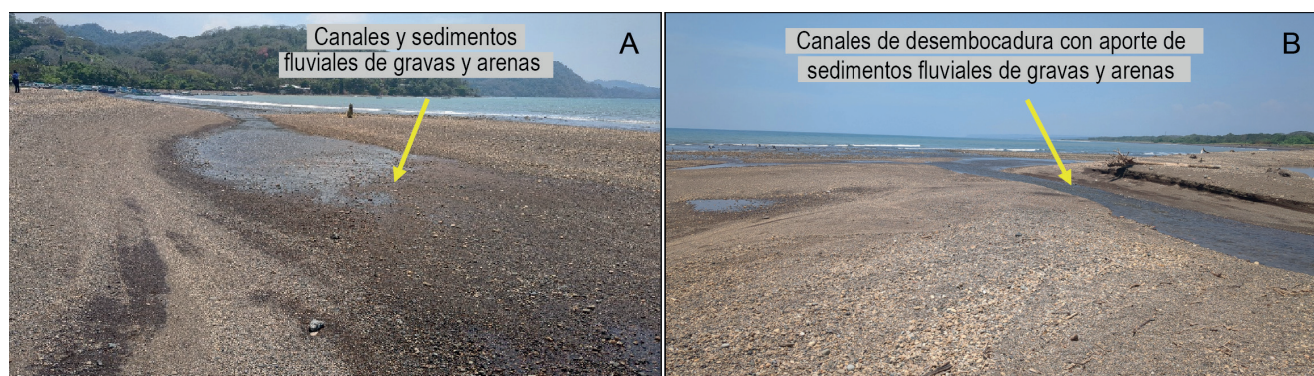


Figura 37. (PC148). Playa Azul. A) un tipo de costa cerca de zona de manglar con desarrollo de una playa gravosa B) se muestra mucho aporte de sedimentos del río Tárcoles (gravas y arenas).

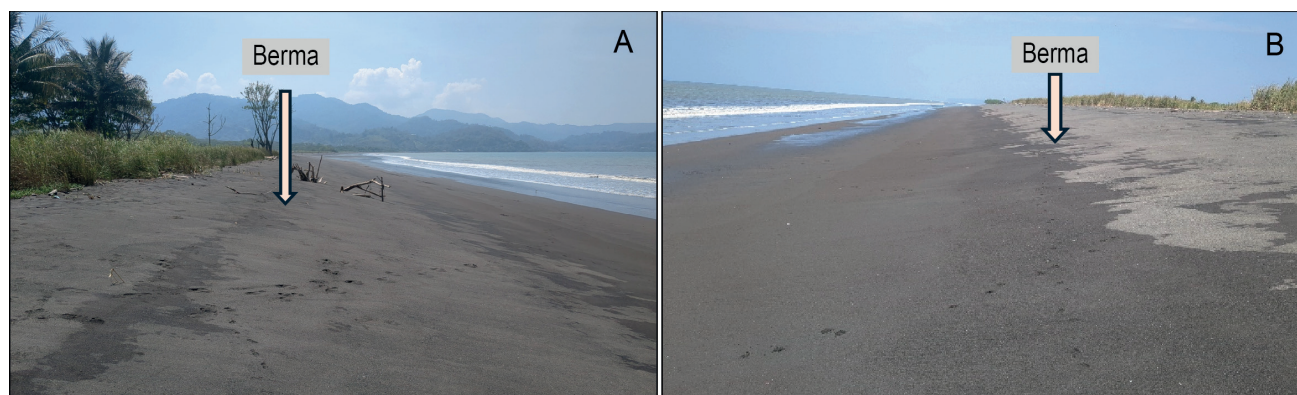


Figura 38. (PC146). Playa Azul. A y B) un tipo de costa de playa extendida con un buen desarrollo de berma y vegetación en la parte posterior (A vista hacia el sur y B hacia el norte).



Figura 39. (PC203). Playa Pógeres. C y D) un tipo de costa de playa extendida con poco desarrollo de berma. A) se muestra algunos sistemas de protección locales para evitar la acreción e influencia marina, B) aporte de sedimentos fluviales de la Quebrada Pita. E y F) se muestra también la presencia de las rocas del sustrato rocoso de la playa que conforman la plataforma de abrasión del Miembro Roca Carballo.



Figura 40. (PC059). Playa Mantas. C) un tipo de costa de playa formada en una bahía limitada por acantilados y plataforma de abrasión del Miembro Roca Carballo (norte de Punta Leona), B y D) se observa un buen desarrollo de berma A) se observa erosión en su base por efecto de la pleamar.

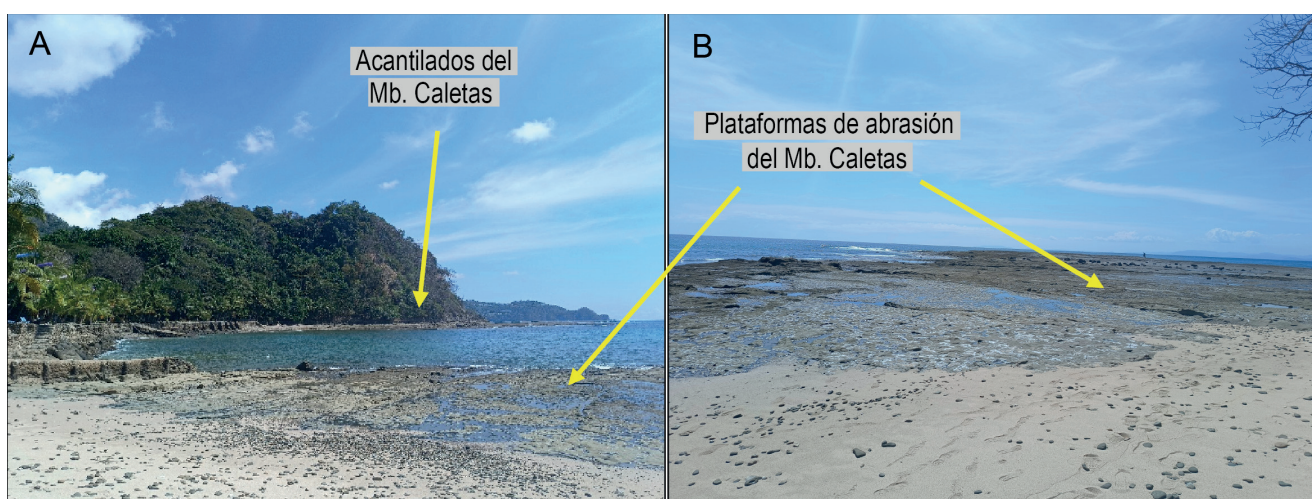


Figura 41. (PC043). Plataforma de abrasión con acantilado Caletas. A) tipo de costa con muy poco desarrollo de playa en una saliente rocosa limitada por acantilados. B) plataforma de abrasión constituido por rocas del Miembro Caletas (sector Caletas).



Figura 42. (PC055). Plataforma de abrasión con acantilado sector Coyol. A) tipo de costa con muy poco desarrollo de playa en una saliente rocosa limitada por acantilados. B) plataforma de abrasión constituido por rocas del Miembro Caletas.



Figura 43. (PC001). Plataforma de abrasión sector Punta Judas – Punta Mala. A y B) tipo de costa sin desarrollo de playa donde se expone la plataforma de abrasión constituida por areniscas de la Fm. Punta Judas.

VULNERABILIDAD MODERADA (VALOR 3)

Esta evaluación abarca los sectores costeros conformados por playas, acantilados, plataformas de abrasión y algunas desembocaduras fluviales. En conjunto, estos elementos representan cerca del 30,4 % del área de estudio, con una extensión aproximada de 35,4 km (véase Figura 17).

De la longitud total de costa clasificada con vulnerabilidad moderada, 10,5 km corresponden a tramos de playa; el resto se asocia principalmente con amplias plataformas de abrasión, como las localizadas entre Pita y Playa Agujas, así como con los acantilados presentes en los sectores de Punta Leona–Caletas y entre Jacó y Playa Hermosa. En menor medida, también se incluyen algunas desembocaduras de ríos.

Esto corresponde con zonas que por sus características físicas tienden a tener una mejor respuesta ante un eventual ascenso del nivel del mar. Se pueden mencionar playas como Caldera (sector norte a central y sector sur), Doña Ana, Guacalillo, Tárcoles, Pita, entre otras, como se muestra en la tabla 9, donde además se muestran las longitudes de los tramos de estas playas que presentan la valoración de vulnerabilidad moderada.

A continuación, el análisis de las variables:

Tipo de costa (geomorfología): la geomorfología costera asociada a este nivel de vulnerabilidad corresponde con “desembocadura de ríos” (tabla 5). Se pueden mencionar desembocaduras que incluyen esteros, estuarios y llanuras de marea, como el Estero Mata de Limón que desemboca en Playa Caldera, la boca del Río Jesús María, estero Loros en Tivives, desembocadura y delta del Río Tarcolitos, entre otros (tabla 9).

En el caso de Guacalillo y Tárcoles presentan berma trasera entre 1 y 2 m de altura con inclinación hacia el continente, son playas con longitud extensa y rectilínea; con esto se ha notado que este tipo de playas son menos propensas a la erosión y desarrollan por lo general bermas con vegetación asociada que le dan mayor estabilidad a las playas (Fig. 44).

También se puede mencionar el sector central de Playa Caldera donde se cataloga como playa antropizada por las características que presenta, como los enrocados de protección y la carretera que está muy cercana a la playa (Figs. 45 y 46).



Figura 44. (PC300): Playa Guacalillo. Desarrollo de bermas, playa extensa y con inclinación muy baja.



Figura 45. Espigón de enrocado en Playa Caldera, sector central.

Tabla 9. Resultados obtenidos para vulnerabilidad moderada (3) a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km) correspondiente a 35,4 km (30%) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de tipos de costa analizados.

	Tipo de Costa	IVC	Longitud (km)	Sector
1	Playa Doña Ana	3	0,253	toda la playa
2	Playa Caldera		1,921	sector central
3	Desembocadura de río		0,394	Estero Mata de Limón
4	Playa antropizada		0,655	Espolón Caldera
5	Playa Caldera sur		0,861	sector sur
6	Playa Tivives		1,331	sector central
7	Desembocadura río Jesús María		0,824	sector sur de playa Tivives
8	Desembocadura Estero Loros		0,696	sector Peñon Tivives
9	Playa Carrizal		0,898	toda la playa
10	Playa Guacalillo - Carrizal de Bajamar		4,137	toda la playa
11	Playa Tárcoles		0,905	sector sur
12	Desembocadura de río Tarcolitos		0,544	Río Tarcolitos
13	Playa Pógeres		0,329	al norte de playa Pita
14	Acantilados con plataforma de abrasión		2,933	al sur de Pita
15	Playa Agujas		0,533	sector central
16	Acantilados y plataforma de abrasión Punta Leona		0,957	Punta Leona sectores medios
17	Acantilado con plataforma de abrasión		1,783	Punta Sucia
18	Acantilado con plataforma de abrasión		0,813	Caletas
19	Playa Coyol		0,202	sector Norte
20	Acantilados y plataforma de abrasión Fila Conejo		5,424	Fila Conejo
21	Acantilado con plataforma de abrasión		4,763	Isla Herradura
22	Acantilado con plataforma de abrasión		4,248	Punta Guapinol
TOTAL			35,4 km	

Litología: la línea de costa correspondiente a este IVC son depósitos inconsolidados del Cuaternario, como arenas desde finas hasta gruesas y eventualmente con guijarros y gravas. Este es el ejemplo del sector central de Playa Agujas, en donde se observa una mezcla de arenas finas hasta gruesas con guijarros y gravas provenientes de la cercana desembocadura del Río Agujas. La playa Pita se conforma de arenas finas con algunos sectores con gravas y guijarros producto de las corrientes de resaca y por los depósitos de arrastre de la quebrada Pita (Fig. 47), además de poseer dos pequeñas salientes rocosas tipo plataforma de abrasión asociadas con rocas de la Formación Roca Carballo (sección IV), que también aportan sedimentos detríticos por la abrasión marina y a la vez dan un cierto grado de protección a la playa. Otras playas como Tivives, Guacalillo y Tárcoles son bastante extensas en longitud, con depósitos desde limos hasta arenas finas y gruesas.

Pendiente: el análisis de la pendiente junto con las variables hidrodinámicas permitió identificar sectores con valoración 3 del IVC, principalmente en playas extensas como Caldera, el sector norte de Tivives, Guacalillo, y áreas de acantilados en el peñón de Bajamar, Punta Sucia (posterior a Playa Blanca), Punta Conejo y plataformas de abrasión como Isla Herradura y Punta Guapinol (después del poblado de Jacó). También se incluyen playas de menor extensión como Doña Ana, el sector sur de Pógeres, Mantas y Caletas, que presentan pendientes entre $1,6^\circ$ y $2,8^\circ$, típicas de zonas de disipación moderada del oleaje.

En contraste, los acantilados presentan pendientes más pronunciadas, con valores entre $4,6^\circ$ y $7,4^\circ$, alcanzando los mayores registros en el peñón de Bajamar ($>7,4^\circ$). Estas diferencias morfológicas influyen directamente en la respuesta costera: las playas amplias con inclinación moderada tienden a mostrar vulnerabilidad media frente al oleaje, mientras que las zonas acantiladas, aunque más resistentes, evidencian procesos de erosión local en sus bases por impacto directo del oleaje. En este contexto, los poblados de Guacalillo y Tárcoles podrían verse más expuestos a la penetración del oleaje tierra adentro, sin embargo, tienen berma y vegetación de protección, mientras que en el sector norte de Tivives se observan signos de erosión y deterioro de infraestructura asociados al incremento de la pendiente y a la acción del oleaje.

Variables Hidrodinámicas: para el índice de vulnerabilidad moderado presentan una serie de características de acuerdo con los resultados obtenidos. La tasa de cambio de la línea de costa muestra un patrón de erosión marcado en Caldera y Doña Ana, con retrocesos de entre -73 cm/año y -6 cm/año. Al norte de Tivives, aunque se observa retroceso, la presencia de taludes naturales y estructuras antrópicas ha limitado el avance del mar. En cambio, se evidencian procesos de acreción en sectores del puerto de Caldera, Guacalillo y Playa Mantas, con valores superiores a 110 cm/año, así como en zonas de desembocadura río Jesús María y el estero Loros.

Localmente se observaron algunos indicios erosivos como en Playa Tivives donde se presenta un proceso activo de erosión de la playa, con un talud de $1,5$ - 2 m alto (arena) en donde se ubican casas de habitación las cuáles se encuentran a unos 3 m de ese borde (Fig. 48). Además, el oleaje en marea alta llega hasta dicho talud de erosión. Otro ejemplo es en playa Guacalillo, donde no se observaron evidencias de erosión, comportándose como playa estable, con una berma en contrabuzamiento y con vegetación en el límite (hacia tierra firme). La playa es ancha con muy baja inclinación y estable; presenta además acumulación de troncos y hojas por acción de las mareas, sin embargo, hay existencia de vegetación algunos metros atrás de la berma que funciona como protección natural. También es importante mencionar que en algunos sitios se observa erosión por ejemplo palmeras caídas, taludes o bermas erosionadas, entre otras evidencias, como lo es el caso de Playa Agujas (Fig. 49).

Guía Metodológica

La variable altura significativa de la ola presenta una variabilidad notable progresiva de norte a sur. En las playas al norte de la zona de estudio como Doña Ana, Playa Caldera Central y Sur, y Playa Guacalillo, tiene una valoración baja ($0,22 - 0,63$ m); posteriormente a partir de Playa Tivives y hasta Playa Tárcoles se presenta con valor moderado ($0,63 - 0,86$ m), y más hacia el sur, en las playas Pita, Agujas y parte de playa Coyol se presenta con valor alto ($0,86 - 1,09$ m). Esto indica que de norte a sur existe un aumento de la altura de la ola de aproximadamente 87 cm.

La marea astronómica más alta es una variable que para este rango de IVC presenta algunas variantes, pero principalmente con un valor moderado. Este es el caso del sector norte del área de estudio, en las playas Doña Ana, Caldera, Tivives, Carrizal (cerca de Bajamar), sector norte de playa Pita y sus plataformas de abrasión hacia el sur, playa Agujas y parte de Punta Leona, en donde esta variable da como resultado valor moderado ($3,45 - 3,76$ m). Para el caso de playa Tárcoles el valor de la variable es bajo ($2,98 - 3,45$ m), mientras que para el resto de costa más hacia el sur con IVC moderado como los acantilados y plataformas de abrasión en los alrededores de Caletas, Herradura y Jaco, presenta valoración alta ($3,76 - 4,1$ m).

En conjunto, la integración de la pendiente y las variables hidrodinámicas permite inferir que las áreas con pendientes suaves y oleaje moderado presentan cierto grado de susceptibilidad a procesos de inundación costera y redistribución sedimentaria, mientras que las zonas con pendientes abruptas concentran procesos erosivos localizados.

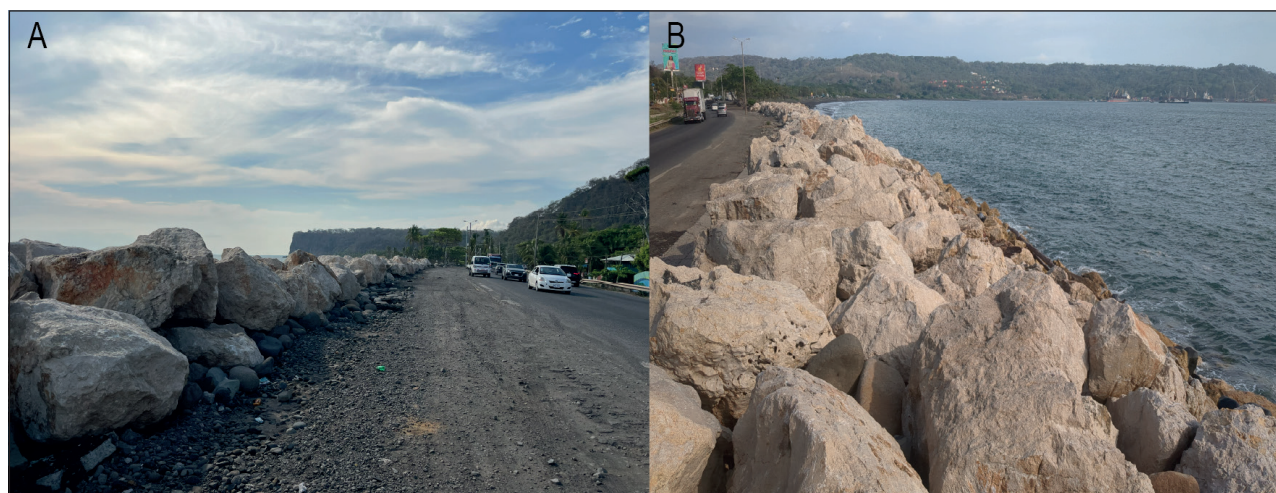


Figura 46. (PC298). Playa Caldera, sector norte. A y B) se muestra el enrocado de protección para ese sector de la costa por donde pasa la carretera.



Figura 47. Playa Pita. Se muestran arenas y gravas por corrientes de resaca. Playa con pendiente baja sin berma desarrollada.



Figura 48. (PC287). Playa Tivives, sector norte. Talud de berma erosivo de aproximadamente 1,5m de alto



Figura 49. Playa Agujas. Erosión de las bermas y raíces expuestas de palmeras.

VULNERABILIDAD BAJA (VALOR 2)

El índice de vulnerabilidad costera (IVC) correspondiente a la categoría de vulnerabilidad baja abarca una longitud de costa de 14,8 km, lo que representa aproximadamente el 12,7 % del total del área de estudio (116,3 km).

Dentro de esta categoría se incluyen las playas Boca Barranca, Pirata, Caldera, boca del estero Mata de Limón, Higuerón y Tárcoles (sector sur), así como las desembocaduras del río Tárcoles en las cercanías de las localidades de Pigres y Playa Azul. También se incorporan los acantilados ubicados al sur de Herradura y al noroeste de Jacó (véase tabla 10).

En términos generales, el valor del IVC para esta zona está determinado principalmente por la geomorfología de la línea de costa, además de variables como la altura significativa de la ola y la amplitud máxima de la marea astronómica, aspectos que se abordarán con mayor detalle más adelante.

A continuación, se presenta el análisis de las variables:

Tipo de costa (geomorfología): esta variable resulta influyente en este caso, ya que, aunque las playas presentan un valor de 4 en el rango de valores (tabla 5), en varios sectores se encuentran protegidas por acantilados marinos y salientes rocosas, como las plataformas de abrasión. Un ejemplo es Playa Pirata, una playa pequeña resguardada por acantilados rocosos en ambos extremos.

Asimismo, se observan desembocaduras de ríos, como la del estero Guacalillo y al norte de playa Tárcoles. Otro tipo de costa identificado en este tramo del IVC corresponde a los acantilados con plataformas de abrasión localizados entre playa Herradura y laja Jacó (Fig. 50).

Tabla 10. Resultados obtenidos para vulnerabilidad baja (2) de la línea de costa analizada (116,3 km), correspondiente a 14,8 km (12,7%) de área de estudio.

	Tipo de costa	IVC	Longitud (km)	Sector
1	Playa Boca Barranca	2	0,304	sector sur
2	Playa Pirata		0,110	sector sur
3	Playa Caldera		0,933	sector norte
4	Playa Caldera Sur		1,176	sector sur
5	Acantilado		0,620	Guacalillo norte
6	Playa y desembocadura de río		1,781	Pigres, al norte de Playa Azul
7	Playa Tárcoles		1,215	sector norte y central
8	Acantilado con plataforma de abrasión		0,407	Punta Conejo, al norte de Playa Herradura
9	Acantilado con plataforma de abrasión		8,135	entre Playa Herradura y Playa Jacó
10	Acantilado con plataforma de abrasión		0,109	al norte de Playa Hermosa
		TOTAL	14,8 km	

Litología: en general las playas que corresponden a este índice de vulnerabilidad se componen de sedimentos cuaternarios de playa de arenas finas hasta gruesas, que además están protegidas por acantilados laterales compuestos por secuencias de areniscas de resistencia media a alta de la Formación Punta Carballo.

En el caso del sector norte de playa Caldera está protegida en parte por el acantilado de Roca Carballo, además, se observó una mayor inclinación de la playa y una berma. También se puede mencionar a playa Higuerón donde se encuentra el Peñón de Guacalillo, que está conformado por paredes de rocas formadas por lahares con bloques de sobretamaño en una matriz arenosa consolidada de la Formación Tivives (Fig.51, sección 4).

En el sector sur del área de estudio se encuentran los acantilados del sector sur de Herradura y sector noroeste de Jacó, los cuales presentan un índice de vulnerabilidad costera bajo debido a sus características morfológicas de tipo de costa (acantilados) y litológicas (rocas sedimentarias y volcánicas con resistencia moderada a alta).

Pendiente: las pendientes varían entre los valores de 2,9° y 4,6° en sectores como Playa Caldera, sector sur de Bajamar, sector norte de Tárcoles y sur de Herradura; y pendientes entre 1,6° y 2,8° en el norte de Playa Tárcoles y Playa Bajamar sector sur. Estas inclinaciones moderadas reflejan una morfología costera estable, donde la energía del oleaje es parcialmente disipada y los procesos erosivos son limitados. En Punta Bocana y Playa Basal, la presencia de acantilados y plataformas de abrasión contribuye a reducir el impacto directo del oleaje sobre la base de los taludes, lo que atenúa los procesos erosivos.

Guía Metodológica

Variables hidrodinámicas: relacionado a la tasa de cambio de la línea de costa entre 1997 y 2025 evidencia una dinámica predominantemente estable, con sectores localizados de erosión leve en Boca de Barranca, Playa Pirata y el norte de Caldera, donde se registran valores entre -2 y -4 cm/año. En contraste, se observa acreción asociada a la dinámica fluvial en Playa Tárcoles y el sur de Bajamar, con valores entre 50 cm/año y 110 cm/año, lo que indica aportes sedimentarios positivos provenientes de la desembocadura del río Tárcoles. También se dan valores bajos y muy bajos principalmente cercanos a desembocaduras, como en el caso del Estero Guacalillo en Pigres y la desembocadura del Río Tarcolitos, en donde se da un fenómeno de sedimentación por el aporte de material de los ríos. (Fig. 52). En contraste sucede lo contrario en lugares como Playa Higuierón y Punta Carrizal, en donde se observan cuevas formadas por la erosión del oleaje contra los paredones de los lahares de Fm Tivives. (Fig. 53). Otro sitio importante de mencionar es el sector norte de Playa Caldera donde se sabe del fuerte oleaje por marejadas que causan erosión e ingreso del mar en la zona.

La altura significativa del oleaje (H_s) varía entre 0,02 m y 1,09 m, con los mayores registros en el sector sur de Bajamar y el norte de Tárcoles, y los más bajos en Boca de Barranca. La amplitud máxima de marea astronómica alcanza 2.98 m; sin embargo, sectores con pendientes suaves, como Playa Azul y Bajamar, no presentan una susceptibilidad considerable a inundaciones, ya que se encuentran protegidos por la margen fluvial del río Tárcoles y por estructuras naturales como el peñón de Tivives, que atenúan la energía de las olas incidentes.

En síntesis, los sectores clasificados con valor 2 del IVC presentan una combinación de pendientes moderadas, oleaje bajo y procesos de acreción localizados, condiciones que favorecen una baja vulnerabilidad física ante la acción marina y mantienen una estabilidad costera relativa.

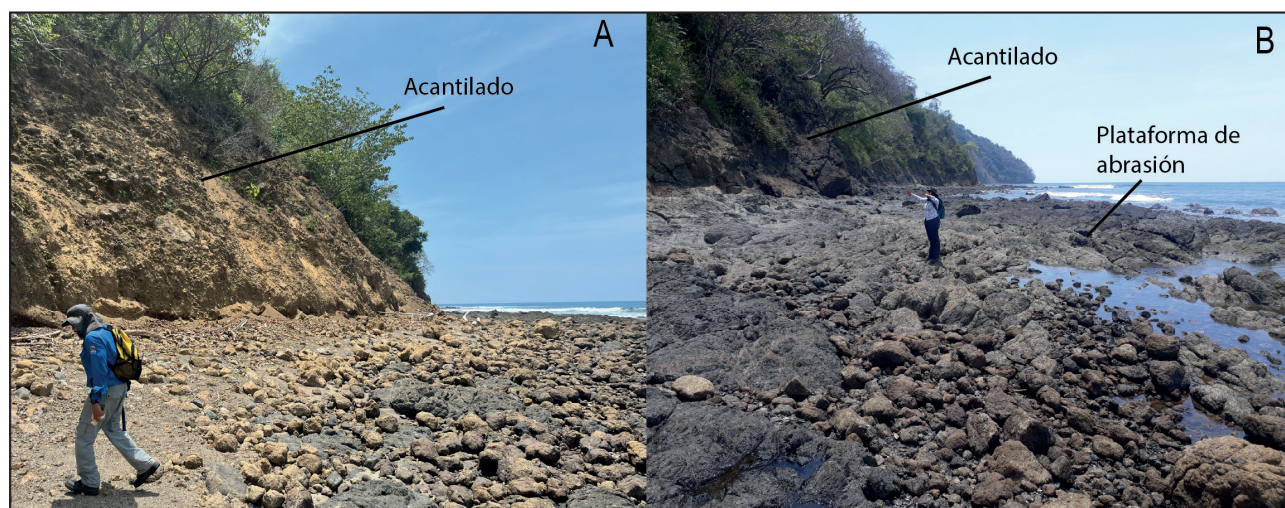


Figura 50. (PC313). Acantilados rocosos entre playa Herradura y Jacó. A) se muestra un acantilado al sur de Playa Herradura. B) acantilados con plataformas de abrasión de basaltos del Complejo de Nicoya, Playas Herradura y Jacó..

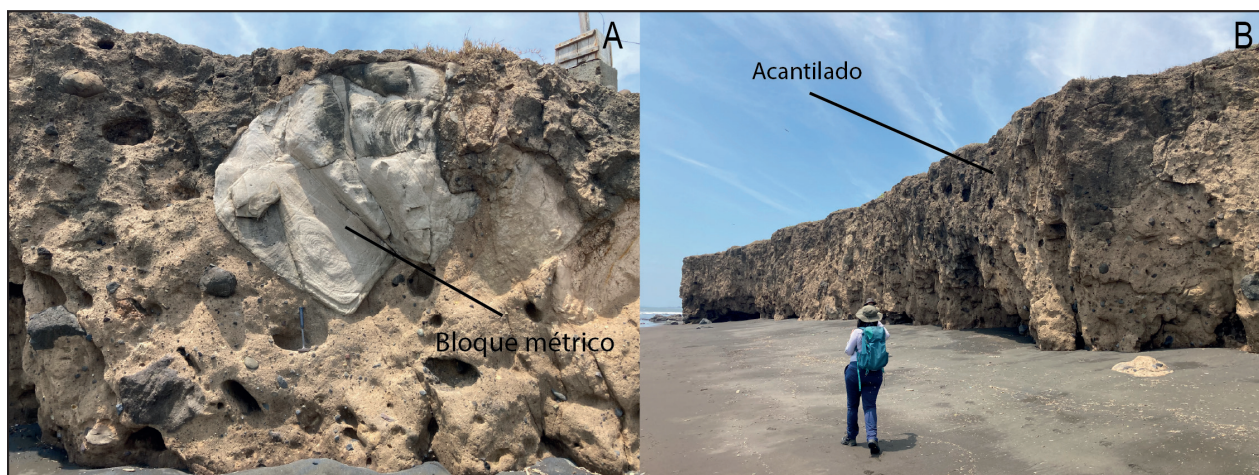


Figura 51. (PC234). Playa Higuerrón al norte de Guacalillo. A) Se muestra labar con bloques de sobretamaño métrico en una matriz arenosa consolidada; B) Acantilados de la Formación Tivives.



Figura 52. (PC148). Sedimentación por transporte de material de Estero Guacalillo.



Figura 53. (PC235). Playa Higuerón al norte de Guacalillo. Cuevas formadas por la erosión del oleaje. A) Vista hacia el norte, cuevas en acantilado. B) Vista hacia el sur. Se observan las cuevas erosivas y sus dimensiones aproximadas en proporción con la escala de las personas.

VULNERABILIDAD MUY BAJA (VALOR 1)

El índice IVC muy bajo está representado por una longitud de costa de 16,1 km, lo que corresponde al 13,8% del total del área de estudio.

A continuación, el análisis de las variables:

Tipos de costa (geomorfología): los acantilados suelen presentar valores bajos dentro de la clasificación del IVC, sin embargo, en este estudio también presentan valores muy bajos geoformas que se mencionan en la tabla 11: playa, desembocadura de río, acantilados y acantilados con plataforma de abrasión.

Los acantilados son los rasgos predominantes dentro de este IVC y están representados por un total de 9,8 km, las plataformas de abrasión con acantilados por 3,3 km, finalmente Puerto caldera considerado una playa antropizada tiene una extensión de 1,9 km.

La playa de Boca Barranca y la desembocadura del río Barranca representan solo 0,2 km y 0,67 km respectivamente y son los únicos dos sitios con rasgos geomorfológicos de valores muy bajos que presentan formas del terreno planas o casi planas.

Tabla 11. Resultados obtenidos para vulnerabilidad muy baja (1) a lo largo de la línea de costa analizada (116,3 km) correspondiente a 16,1 km (13,8 %) de área de estudio. Se muestra la longitud de los segmentos de tipos de costa analizados.

	Tipo de costa	IVC	Longitud (m)	Sector
1	Playa	1	294	Boca de Barranca
2	Desembocadura Río		671	Boca del río Barranca
3	Acantilados		2886	Desde Playa doña Ana, hasta el sur de Playa Pirata
4	Playa antropizada		1916	Puerto Caldera
5	Acantilados		4830	Desde de Playa Corralillo hasta Playa Icacó
6	Acantilados		1672	Peñón de Tivives
7	Acantilados		492	Norte de Playa Pógeres
8	Acantilado con plataforma de abrasión		904	Norte de Playa Agujas
9	Acantilado y acantilado con plataforma de abrasión		2441	Desde playa agujas hasta al norte de Playa Mantas
TOTAL			16,1 km	

Litología: en las inmediaciones de Boca Barranca convergen tres tipos diferentes de costa: playa, desembocadura y acantilado (Figura 54), con valores respectivos de 4, 3 y 1 (de norte a sur). La litología en esta zona presenta depósitos inconsolidados en la playa y desembocadura del río, con muy baja resistencia a la abrasión, mientras que los acantilados están formados por rocas sedimentarias del Miembro Roca Carballo, que poseen una resistencia media a la abrasión (sección 4)



Figura 54. En la imagen se observa los tres tipos de costa que se observan en Boca del Barranca

Guía Metodológica

En Puerto Caldera, clasificado también con IVC muy bajo, se identifica una playa antropizada (valor 5 en tipo de costa), debido a la intervención humana que ha modificado significativamente la línea de costa, haciéndola más susceptible a inundaciones. No obstante, la infraestructura costera está compuesta de hormigón, que litológicamente actúa como un macizo rocoso con alta resistencia a la abrasión (valor 1), lo que contribuye significativamente a reducir el valor final del IVC en este sector. Véase Figura 55



Figura 55. A) La figura muestra el cambio de la costa por la infraestructura de hormigón de Puerto Caldera. B) Se observan los rompeolas que protegen la infraestructura.

Las salientes rocosas en los alrededores de Punta Corralillo y Playa Icaco corresponden a acantilados (valor 1) formados por la Formación Mata de Limón, compuesta por rocas volcanosedimentarias con resistencia media a la abrasión (valor 3). Estas formaciones, de alta pendiente y con variables hidrodinámicas de valores medios a bajos, mantienen un índice de vulnerabilidad costera muy bajo. Véase Figura 56.



Figura 56. A) Muestra un acercamiento de la conformación de los acantilados de la Formación Mata de Limón. B). El Peñón de Tivives son acantilados compuesto por lahares.

El Peñón de Tivives son acantilados que litológicamente están compuesto por lahares con una matriz de ceniza y bloques heterogéneos decamétricos, de la Formación geológica conocida con el mismo nombre Tivives. Esta formación presenta una matriz muy consolidada en superficie sana lo que le confiere una gran resistencia a la abrasión, sin embargo, al ser una roca tan heterogénea con bloques de sobretamaño estos acantilados presentan grandes caídas y desprendimientos de bloques que permiten la formación cuevas, arcos marinos y farallones, lo que le confiere un valor moderado de resistencia de abrasión. Véase Figura 57.



Figura 57. Sector norte de playa Mantas, se observa plataforma de abrasión con acantilado de la del Miembro Roca Carballo.

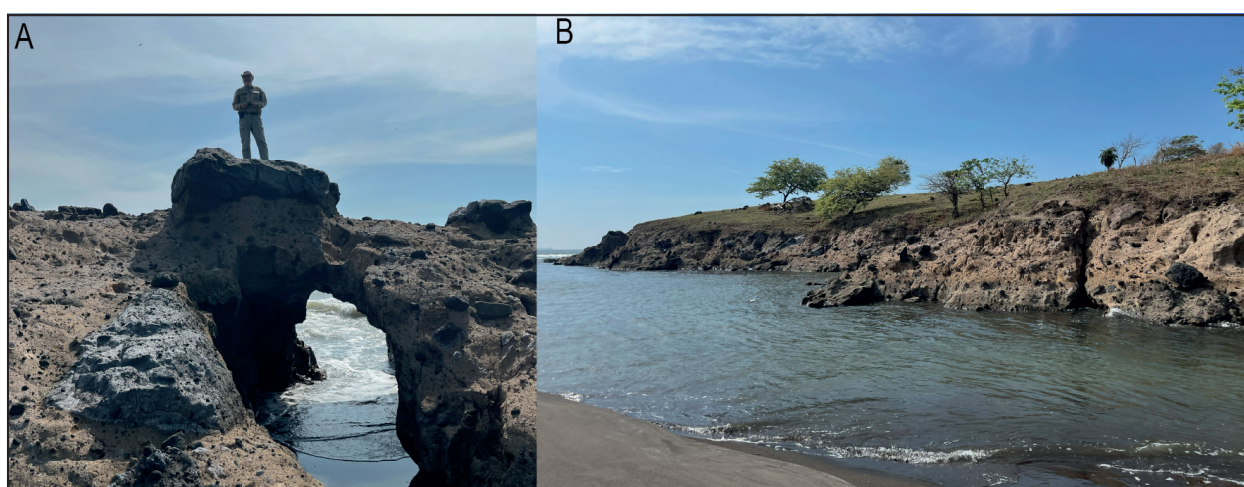


Figura 58. A) Arcos formados por erosión en la Formación Tivives. B) Sector del Peñón de Tivives, muestra cuevas y socavamientos, pero se trata de salientes rocosas muy consolidadas de alta dureza. En la desembocadura del Estero Loros.

Guía Metodológica

En Punta Mala y los alrededores de Playa Agujas y sector norte de Playa Mantas (Figura 58) predominan los acantilados y acantilados con plataformas de abrasión, indicando un retroceso costero previo que ha dado lugar a la formación de estas plataformas. Estas zonas están formadas por rocas sedimentarias de intercalaciones de areniscas del Miembro Roca Carballo, que presentan una resistencia moderada a la abrasión (valor 3).

Variables Hidrodinámicas: el análisis conjunto de la pendiente y las variables hidrodinámicas permitió identificar los sectores con valoración 1 del IVC, correspondientes a áreas de muy baja vulnerabilidad física. Estos sectores se localizan principalmente en acantilados, Peñón de Tivives (poblado Tivives), el río Barranca, y en pequeñas playas como Pirata, Terciopelo e Icaco. Asimismo, la infraestructura portuaria de Caldera se incluye en esta categoría debido a su condición estructural y a la morfología circundante.

Las pendientes en los acantilados, puntas y salientes rocosas presentan valores entre $4,7^\circ$ y más de $7,5^\circ$, lo que representa un relieve abrupto con alta capacidad de resistencia frente a la acción del oleaje. Esta morfología actúa como una barrera natural que protege las pequeñas playas intercaladas entre acantilados y limita los procesos erosivos (ver fotografías de campo).

Las variables hidrodinámicas muestran una altura significativa del oleaje (H_s) que oscila entre 0,22 m y 0,63 m, correspondientes a condiciones de baja energía y oleaje poco intenso, lo que minimiza el transporte de sedimentos y el impacto sobre los acantilados y playas adyacentes. La marea astronómica máxima alcanza 3,45 m, sin embargo, su efecto sobre estos sectores es reducido debido a las pendientes pronunciadas y a la limitada extensión de la zona intermareal.

En cuanto a la tasa de cambio de la línea de costa durante el periodo 1997–2025, se observan variaciones localizadas con valores que oscilan entre -59 cm/año (erosión) y $+110$ cm/año (acreción), sin representar alteraciones significativas en la estabilidad general del litoral. Estos cambios reflejan la acción puntual de la dinámica marina sobre zonas específicas, más que una tendencia regional de retroceso costero.

En síntesis, los sectores clasificados con valor 1 del IVC presentan una combinación de pendientes altas, oleaje de baja energía y procesos de cambio costero limitados, condiciones que favorecen una muy baja vulnerabilidad física y una alta estabilidad morfodinámica frente a la acción marina.

3.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El conocimiento geológico es fundamental para los estudios de vulnerabilidad costera porque permite comprender las diferentes características del sustrato, factores y procesos del entorno donde se asientan los diferentes ecosistemas, recursos naturales e infraestructura económico - social. Así mismo, la cartografía geológica es una herramienta base importante no solo en sí misma, sino también por su interrelación con el resto de las variables que se consideran en la estimación del IVC.

La aplicación del IVC permite diferenciar a una escala regional, que trasciende los límites locales, los segmentos del litoral con mayor exposición a procesos erosivos, ascenso del nivel del mar y dinámica del oleaje integrando variables geológicas, topográficas e hidrodinámicas, creando un precedente de la situación actual del área de estudio a lo largo de la franja costera.

Los resultados, de manera individual y/o como parte de estudios interdisciplinarios, ofrecen un insumo base para orientar la planificación territorial, la gestión del riesgo y la implementación de medidas de adaptación y resiliencia frente a los impactos del cambio climático en esta región altamente dinámica y productiva.

La guía metodológica aporta las premisas y orientación para el proceso sistemático y normalizado del estudio de la vulnerabilidad costera, la cual debe perfeccionarse en la medida de su implementación e incorporación de información sobre el conjunto de variables y la participación de nuevos actores.

Es importante señalar que los resultados obtenidos en este trabajo corresponden a una escala regional. No obstante, el método también puede aplicarse a otras escalas. En caso de requerir su uso en una escala menor, se recomienda realizar una toma de datos acorde con dicha escala y considerar la incorporación de información adicional generada del trabajo de campo, con el fin de obtener los resultados esperados. Esto se debe a que el método pondera las variables a partir de sus datos, los cuales pueden variar según la escala y el nivel de detalle, generando resultados distintos a los obtenidos en una escala mayor o más regional.

4. SECCIÓN IV- MAPA GEOLÓGICO DE LA REGIÓN PACÍFICO CENTRAL, SECTOR BOCA BARRANCA - PUNTAS JUDAS, ESCALA 1: 25 000

El área cubierta por el mapeo incluye parte de las hojas topográficas Barranca, Tárcoles y Herradura a escala 1:50 000 del IGN. Comprende los poblados como Boca Barranca, Caldera, Tivives, Guacalillo, Quebrada Ganado, Herradura, Jacó, Playa Hermosa, Esterillo Oeste, Punta Judas.

La campaña geológica se llevó a cabo en marzo de 2025, como un trabajo conjunto entre el DGM y ČGS, en el marco de la cooperación triangular financiada por el Programa Adelante 2 de la UE.

El objetivo de este trabajo es elaborar el insumo fundamental para la elaboración de mapas de vulnerabilidad costera en el extremo litoral de la RPC.

La metodología de trabajo se fundamentó en un levantamiento de campo realizado en un área costera de 271 km², durante el cual se registraron 352 puntos de referencia y se recopiló un archivo fotográfico de más de 2 000 imágenes. Se realizaron muestreos de rocas para distintos análisis de laboratorio. Para la caracterización petrográfica se estudiaron 20 muestras representativas de las unidades litológicas identificadas en el campo, mientras que 10 muestras se destinaron a la identificación de minerales mediante difracción de rayos X. La correlación estratigráfica se llevó a cabo mediante un estudio micropaleontológico. Asimismo, para la correlación de las unidades litológicas, se tomaron como referencia las unidades definidas por diversos autores, entre los que destacan Arias (2003), Barboza, Barrientos & Astorga (2011), Corrales (2017), Denyer, Aguilar & Alvarado (2003).

El análisis de secciones delgadas, así como el estudio petrográfico micropaleontológico, se realizaron en los laboratorios del ČGS en Praga, República Checa.

El presente proyecto, tanto en su trabajo de campo como en el desarrollo de sus productos geoespaciales, utiliza SIG y se encuentra sujeto al marco normativo nacional establecido por el IGN, conforme a la siguiente documentación: a) NTIG_CR01:06.2023 (2023): Sistema de Referencia Geodésico de Costa Rica. b) Decreto Ejecutivo N° 40962-MJP (2018): Actualización del Sistema Geodésico de Referencia Horizontal Oficial para Costa Rica.

4.1. MARCO GEOLOGICO REGIONAL Y TRABAJOS ANTERIORES

La zona de estudio se ubica en la RPC de Costa Rica entre la localidad de Boca Barranca hasta Punta Judas. Desde el punto de vista morfotectónico se localiza en el ante-arco de Costa Rica, en las cuencas sedimentarias de Nicoya y Parrita (Barboza et al. 2011), donde las formaciones geológicas sedimentarias y volcánicas comprenden desde el Cretácico hasta el Holoceno.

El desarrollo estructural de estas dos cuencas se inicia en el Eoceno Medio, relacionado con esfuerzos de cizallamiento causados por la rotación en el sentido de las manecillas del reloj de la porción sur del territorio costarricense a lo largo de una zona principal de falla transcurrente. La configuración del relleno sedimentario

ha sido controlada por la transtensión y la subsidencia a lo largo de una serie de fallas transversales a la costa, las cuales están activas actualmente, en algunos casos.

El Bloque Herradura se ubica en la zona centro-occidental y en el sector central y sur del área de estudio, y abarca hasta 1500 km². Desde el sureste de la Península de Nicoya hacia la Zona de Falla Sinistral de Nicoya Oriental y la Falla Longitudinal Dextral de Costa Rica, se encuentran las fallas maestras de deslizamiento de rumbo, que actúan como un sistema conjugado, al noreste y noroeste respectivamente. Este sistema es el resultado de la deformación compresiva dominante de norte a sur (Arias, 2000).

La estratigrafía regional está organizada desde las rocas más antiguas hacia las rocas más jóvenes:

CRETÁCICO-PALEÓGENO

Complejo de Nicoya (Cretácico Inferior tardío-Eoceno Inferior)

Las rocas que forman el Complejo de Nicoya han sido muy estudiadas por diversos autores, desde sus primeras interpretaciones estratigráficas, origen, características petrográficas, clasificación litoestratigráfica y edad, tales como Sapper (1905, 1937), Romanes (1912a, b), Sears (1919), Webber (1942), Robert (1944), Dengo (1960, 1962a, b), Lloyd (1963), Weyl (1965), Henningsen & Weyl (1967), Pichler & Weyl (1973), Dengo (1962a), Weyl (1969), Kuijpers (1979), Baumgartner Mora, Butterlin, Sigal, Glacon, Azéma & Bourgois (1984), Boer (1979), Schmidt-Effing (1979, 1980) Gursky & Schmidt-Effing (1982), Wildberg, Gursky, Schmidt-Effing, & Strebin (1981), Wildberg (1984), Kuijpers (1980), Sick (1989), Frisch, Meschede, & Sick (1992), Gursky, Schmidt-Effing, & Wildberg (1984).

Relacionado a los sedimentos pelágicos asociados al Plateau Oceánico Caribe (P.O.C) en el bloque Herradura, Arias (2000) describe a:

Sedimentos Silíceos: del Campaniano son los más antiguos del bloque. Se caracterizan por estar fuertemente tectonizados o incluidos dentro de los basaltos y se restringe a pequeños afloramientos limitados por fallas, principalmente al oeste del Bloque Herradura

Sedimentación epiclástica-calcárea (Campaniano y/o inicios del Maastrichtiano): representa la continuación de la sedimentación pelágica, pero carbonatada, que fue interrumpida abruptamente por una sedimentación volcanoclástica. Esta sedimentación se atribuye al levantamiento de la placa Caribe, como consecuencia del calentamiento ocurrido durante el sill event y/o a la caída drástica de la profundidad de compensación de carbonatos (CCD) durante el Campaniano/Maastrichtiano en el Caribe (Ramsay, 1973), el Pacífico (Thierstein, 1979) y mar de Tethys (Hardebol et al., en prensa según Arias, 2000).

Hauff (1998) realiza análisis químicos e isotópicos en las cercanías de Jacó y concluye que se trata de una continuación del terreno Nicoya; tectónicamente separado y originado en el punto caliente de Galápagos hace aproximadamente unos 90 Ma y un mínimo de 75 Ma.

Formación Tulín (Maastrichtiano Medio-Superior hasta Eoceno Inferior)

Inicialmente descrita y estudiada por Malavassi (1967) y Sáenz, Acuña, Castro, Gómez, López, Mederos, Monge, & Vargas (1982), asociando las rocas con una isla volcánica basáltica, relacionada probablemente al

Guía Metodológica

Complejo de Nicoya. Schmidt-Effing (1980) divide al Complejo en seis subcomplejos, según esta división, la Formación Tulín tendría afinidad con el sub complejo Quepos. Barrantes (1991) & Denyer & Arias (1991) cartografiaron esta unidad como Complejo de Nicoya. Tournon & Alvarado (1997) se refieren a un espesor significativo de basaltos que se encuentran desde el nivel del mar hasta el cerro Turrubares (1500 m) y que están constituidos por coladas masivas, en almohadillas, brechas e intercalaciones piroclásticas y sedimentarias. Arias (2000) propone según la asociación faunística presente en los sedimentos intercalados con los basaltos, una edad Maastrichtiano Medio-Superior hasta Eoceno Inferior. Hauff (1998) y Hauff, Hoernle, Bogaard, Alvarado, & Garbe-Schön-Berg (2000) consideraron que esta unidad se encuentra litológicamente relacionada con los basaltos de la península de Nicoya, pero de una menor edad. Alfaro & Barrantes (2002), cartografiaron una unidad ígnea constituida por basaltos (masivos, columnares y en almohadillas vesiculares), dioritas y gabros, caracterizados por la paragénesis plagioclasa básica (Plg > 60%), clinopiroxenos (Cpx 10- 5%), opacos (\approx 5%) y ortopiroxenos (Opx \approx 1%). Arias O. (2003) redefine la Formación Tulín alMaastrichtiano-Eoceno inferior), relacionada con un vulcanismo que se dio sobre el Plateau Océánico Caribe (P.O.C), posterior a la Formación Golfito (sedimentos calcáreos hemipelágicos del Campaniano) y anterior a las Calizas de Damas y Unidad Parrita (calizas de plataforma).

Formación Espíritu Santo (Paleoceno Superior-Eoceno Inferior)

Fue definida por Calvo & Bolz (1991), los cuales realizaron el primer hallazgo y significado de dos secuencias neríticas con sistemas de plataformas carbonatadas, cuya edad se basó en la asociación de macroforaminíferos. Estas son la secuencia del Cerro Espíritu Santo en la cuenca del Tempisque y la secuencia del flanco sur de la Fila Chonta, margen NE de la cuenca neógena de Parrita.

La formación se asocia a sistemas transgresivos de plataforma carbonatada autóctonas con macroforaminíferos y algas rojas que se encuentran sobreyaciendo de forma discordante al Complejo de Nicoya en las regiones marginales neríticas del arco externo “pacífico” de Costa Rica. Se distribuyen de forma latitudinal de NW a SE a lo largo del litoral pacífico de Costa, conformando depósitos de materiales alóctonos y resedimentados.

Arias (2000) menciona que en los alrededores del Bloque Herradura se hallan unas calizas, ricas en macroforaminíferos del Eoceno Medio – Superior. La formación de estas calizas fue favorecida por el cese de la actividad volcánica de la Formación Tulín en el Eoceno Inferior.

NEÓGENO

Formación Punta Carballo (Mioceno Inferior -Mioceno Superior):

Denyer et al. (2003) se refieren a los antecedentes de esta formación de forma muy detallada. Romanes (1912), Mac Donald (1920), Hass (1942) Dengo (1961,1962) describen el tipo de rocas que la componen y restringen su distribución geográfica. Hass (1942) la restringe a la edad al Mioceno Medio. Madrigal (1970) con base en las diferencias litológicas define el Miembro Inferior Mata de Limón (Puerto Caldera y playa Corralillo) y, el Miembro Superior Punta Carballo (desembocadura del Río Barranca). Kuijpers (1979) denomina al miembro superior como Miembro Roca Carballo. Sprechmann et al. (1994) hace mención que la Formación Punta Carballo está constituida por el Miembro Caletas (inferior) y el Miembro Roca Carballo (Superior), con una edad Miocena Inferior/Medio y dejan a Mata de Limón como una unidad Pliocena. Fischer & Aguilar (1995) proponen que la edad de Roca Carballo debe extenderse hasta el Mioceno Superior, lo que concuerda con Fischer (1981) y Amann (1993). Denyer et al. (2003) concuerda con Madrigal (1970) y Kuijpers (1979) que

Roca Carballo sobreyace a Mata de Limón y también con Laurito (1988) que el Miembro Mata de Limón descansa concordantemente sobre una unidad marina, muy similar a Roca Carballo (Miembro Caletas).

Miembro Caletas (Mioceno Inferior)

Laurito (1988) define su origen de ambiente de plataforma y estuario profundo y lo propone como miembro inferior de la Formación Punta Carballo. Según su estratotipo se ubica en los acantilados de Playa Caletas, en donde el autor describe de manera detallada la variación de facies que se presentan a partir de criterios sedimentológicos y correlaciona con las unidades de sedimentos detríticos, desde ligeramente carbonatados hasta inertes al HCL, descritas por Cervantes (1985), Soto (1985). Resumiendo, las descripciones e interpretaciones de Madrigal (1970), Kuijpers (1979b), Soto (1985), Seyfried et al. (1987), Laurito (1988) y Denyer et al. (2003) se considera que el Miembro Caletas corresponde a un ambiente de plataforma abierta.

El espesor es de 250 m según Cervantes (1985), aunque en total podría alcanzar hasta 450 m según otros autores.

Regionalmente se le correlaciona con el Miembro Caletas de la Formación Punta Carballo según Sprechmann et al. (1994), y se le asigna una edad de Mioceno Inferior con base en la Miogypsina (Sprechmann, 1985, comunicación escrita; en Soto, 1985).

Miembro Icaco (Mioceno Inferior)

Laurito (1988b) interpretó estas rocas como parte del Miembro Roca y Carballo. Es definida formalmente por Denyer, et al. (2003), que lo describen como un afloramiento localizado, en un acantilado con un espesor de 7 m, conformado por intercalaciones de estratos de areniscas con muchos foraminíferos planctónicos y lutitas de color gris. Las areniscas son gruesas de color gris verdoso con abundantes thalassinoides ramificados, con diámetro de hasta 10 cm y ophiomorpha nodosa, además de algunos lentes de conglomerados y niveles de arenisca brechosa. Esta unidad se desarrolló en un ambiente sedimentación de alta energía posiblemente litoral. El contacto inferior no se observa y el contacto superior con el Miembro Mata de Limón se caracteriza por la presencia de una toba de lapilli acrecional y troncos en posición vital y le asignan una edad de Mioceno Inferior por relación estratigráfica.

Miembro Mata de Limón (Mioceno Inferior)

Denyer et al. (2003) realizaron una revisión de los principales autores que han estudiado estas rocas en el área (Madrigal, 1970; Kuijpers, 1969, 1979; Baxter, 1975; Fischer, 1981; Laurito, 1988a, b; Sprechmann, Astorga, Fernández y Calvo, 1994). Estas unidades litológicas se encuentran bien expuestas en el tramo comprendido entre playa Corralillo y puerto Caldera, donde actualmente se localiza el paraestratotipo, sobre la carretera principal Orotina–Caldera.

Las rocas corresponden a depósitos volcaniclásticos, compuestos por brechas conglomerádicas (de debris flow y pumice flows), areniscas y limolitas rojas o moradas, que adquieren tonalidades verdosas cuando presentan abundante vidrio volcánico pumíceo. También se observan intercalaciones de tobitas blanquecinas, algunos conglomerados verdosos, afloramientos aislados de ignimbritas, y tobas con lapilli acrecional y xilópalos (Denyer et al., 2003).

Guía Metodológica

Un rasgo destacable de esta unidad es la presencia de lapilli acrecional en tobitas, ignimbritas y depósitos de debris flow, lo que evidencia actividad volcánica contemporánea a la sedimentación. En la base de la secuencia se identifica un bosque fósil con troncos en posición de vida, lo que refuerza la interpretación de un entorno subaéreo con influencia volcánica (Denyer et al., 2003, y referencias citadas en ese trabajo).

La distribución areal de esta unidad es reducida, limitada a las hojas geológicas Barranca y Miramar. Su edad corresponde al Mioceno Inferior. El contacto inferior es neto con el Miembro Icaco, mientras que hacia arriba es transicional con la Roca Carballo, marcada por la aparición de ostrácidos, lo cual indica el inicio del miembro Roca Carballo en un ambiente continental con influencia mareal (Denyer et al., 2003).

Miembro Roca Carballo (Mioceno Inferior-Mioceno Medio)

Por su grado de exposición y detalle se ha considerado que el estratotipo de esta unidad aflora desde las localidades de Roca Carballo hasta playas de Doña Ana (Denyer et al., 2003).

En general constituye una secuencia de lutitas, areniscas, conglomerados, brechas y tobas, estructuras sedimentarias de laminación paralela, estratificación cruzada y ondulada, bioturbaciones, gran cantidad de moluscos, con espesores desde los 65 m hasta los 300 m (Denyer et al., 2003; Madrigal, 1970; Kuijpers, 1979).

Dada las posibles variaciones laterales en la sección estratotipo desde baja a mucha energía, se han considerado tres facies: Facie Río Paires constituida por areniscas de grano fino a medio, areniscas fosilíferas, intercalaciones de conglomerados, con presencia de moluscos. Facie Doña Ana constituida por areniscas de grano medio a grueso con abundantes fósiles recristalizados principalmente de moluscos, foraminíferos, restos de equinodermos, tenazas de cangrejos y placas de balanídeos. Facie Caldera constituida por areniscas volcanoclásticas de grano medio, con intercalaciones de areniscas conglomerádicas y conglomerados, con materia orgánica y troncos, en la parte superior un estrato de caliza bioclástica (Denyer et al., 2003).

Su contacto inferior es transicional con el Miembro Mata de Limón y su edad puede variar desde el Mioceno Inferior hasta el Mioceno Medio (Denyer et al., 2003). y referencias ahí citadas).

Formación Punta Judas (Mioceno Medio)

La Formación Punta Judas fue determinado por Kruckow y publicado por Seyfried et al, (1985). Según los autores tiene un espesor aproximado de 1300 m y documenta la evolución de un estuario durante el Mioceno Medio Bajo y está conformado por sedimentos marinos costeros desde depósitos de estuario abierto y culmina con sedimentos de manglar y de estuario interno de aguas salobres e hiperhalinas.

La especie *Hemipristis Serra Agassiz* se reporta para la Formación Punta Judas del Mioceno Medio (Kruckow in Seyfried et al., 1985).

Schmidt H. & Seyfried H. (1991) describen la localidad de Punta Judas como la sección tipo de la cuenca de Parrita compuesta de sedimentos volcanoclásticos principalmente litareníticos que muestran una mezcla intrincada de dos poblaciones de granos uno proveniente del complejo de Nicoya y otros del arco calco alcalino.

Barboza et al. (1995), incluye a la Formación Punta Judas en la secuencia estratigráfica de la cuenca Parrita y la describe como depósitos clásticos neríticos y costeros formados por un frente deltaico en la base y

depósitos litorales en la sección media y depósitos influenciados por mareas que pasan a un frente deltaico en la parte superior de la esta formación.

CUATERNARIO

Formación Tivives (Pleistoceno)

Fue descrita primeramente por Romanes (1912) como un aglomerado volcánico sin estratificación el cual tiene enormes bloques de roca volcánica observados entre las localidades de Cascajal y Cambalache en los cortes de camino a lo largo de la línea del tren, los cuales también contienen ocasionalmente trazas de materia orgánica. También fueron descritos como lahares que sobreyacen a las ignimbritas de Orotina (Dengo, 1961), y posteriormente se mencionan los acantilados de Tivives en la desembocadura del Río Jesús María por el Peñón de Bajamar en playa Guacalillo, donde Madrigal (1970) le da el nombre de Formación Tivives.

De acuerdo con Denyer et al. (2003) la Formación Tivives está constituida por una brecha volcánica con un 30% de clastos de tamaño métrico hasta centimétrico, de composición principalmente andesítica y en menos frecuencia de composición ignimbrítica, flotando en una matriz lítico-cristalina compuesta por detrito volcánico con plagioclasas, piróboles, cuarzo y micas, así también litoclastos de lava, fiammes y pómez. Esta formación fue catalogada como un lahar, sin embargo, según Denyer et al. (2003) se trata de un debris avalanche transformado a un debris flow por varias características en la estructura de la unidad.

Estratigráficamente la ubican sobreyaciendo disconforme a la Formación Punta Carballo y al Grupo Aguacate y es sobreyacida disconformemente por las formaciones Tigre, Avalancha Ardiente y Orotina (Denyer et al., 2003). De acuerdo con Madrigal (1970) la Formación Tivives alcanza un espesor de 100 m.

En cuanto a la edad de esta formación, si bien es cierto Madrigal (1970) le asignó Mioceno-Plioceno, Marshall, Idleman, Gardner, & Fisher (2003) data esta unidad y le reasigna una edad Pleistoceno (1,7 – 1,1 Ma).

Formación Orotina (Pleistoceno Superior)

La Formación Orotina fue definida primeramente por Dengo (1961) como una ignimbrita con fiammes, observada en afloramientos en los ríos Jesús María y Machuca. Madrigal (1970) describe una secuencia de tobas de flujo de cenizas y sedimentos volcanoclásticos; posteriormente Pérez (2000) describe ignimbritas de color gris azulado con fiammes de vidrio tipo obsidiana, bombas escoriáceas negras de tamaño centimétrico, clastos de pómez alargados inmersos en una matriz de detritos fina con cristales de plagioclasa y piroxenos.

Marshall et al. (2003) identificaron una toba soldada de riodacítica y horizontes de ceniza blanca al que le ha llamado “Flujo snake”, que aflora desde la garganta del río Tárcoles hasta el Valle Central donde se fusiona con las ignimbritas de la Formación Avalancha Ardiente.

Posteriormente fue redefinida por Denyer et al. (2003) con base en los trabajos de Marshall et al. (2003) y Pérez (2000) ya que eliminan la parte superior de esta formación.

Guía Metodológica

La edad de la Formación Orotina es aproximada a los 400.000 años de acuerdo con dataciones radiométricas realizadas por Marshall et al. (2003), y estratigráficamente sobreyace a la Formación Punta Carballo y Grupo Aguacate.

4.2. GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA LOCAL

CUENCA NICOYA

CRETÁCICO-PALEÓGENO

Complejo de Nicoya y Formación Tulín

Cretácico Medio- Paleógeno Inferior

El basamento del área de estudio está formado por los basaltos del Complejo de Nicoya, considerados por Arias (2003) y Denyer et al. (2003) como el P.O.C. Además, Arias (2003), redefinió la Formación Tulín, mencionando que está constituida por depósitos epiclásticos, cumulitas de olivino, gabros, brecha piroclástica y basaltos que difieren en composición y edad con los basaltos del P.O.C. Además, está conformado por calizas pelágicas que Denyer et al. (2003) y Arias (2003), correlacionan con la Formación Tulín. Véase la Figura 59.

Las unidades basaltos del P.O.C. y de la Formación Tulín, serán descritas en forma conjunta, sin distinciones, por criterios relacionados al objetivo del proyecto, por lo que no fue posible realizar un estudio geoquímico y petrográfico más detallado, así mismo la meteorización y alteración de estas rocas no permite el reconocimiento macroscópico para su diferenciación.

El área abarca desde la cuenca del río Agujas en Quebrada Ganado al norte, los cerros Chiquero y Fila Negra al este, la zona litoral al oeste, y Quebrada Amarilla al sur.

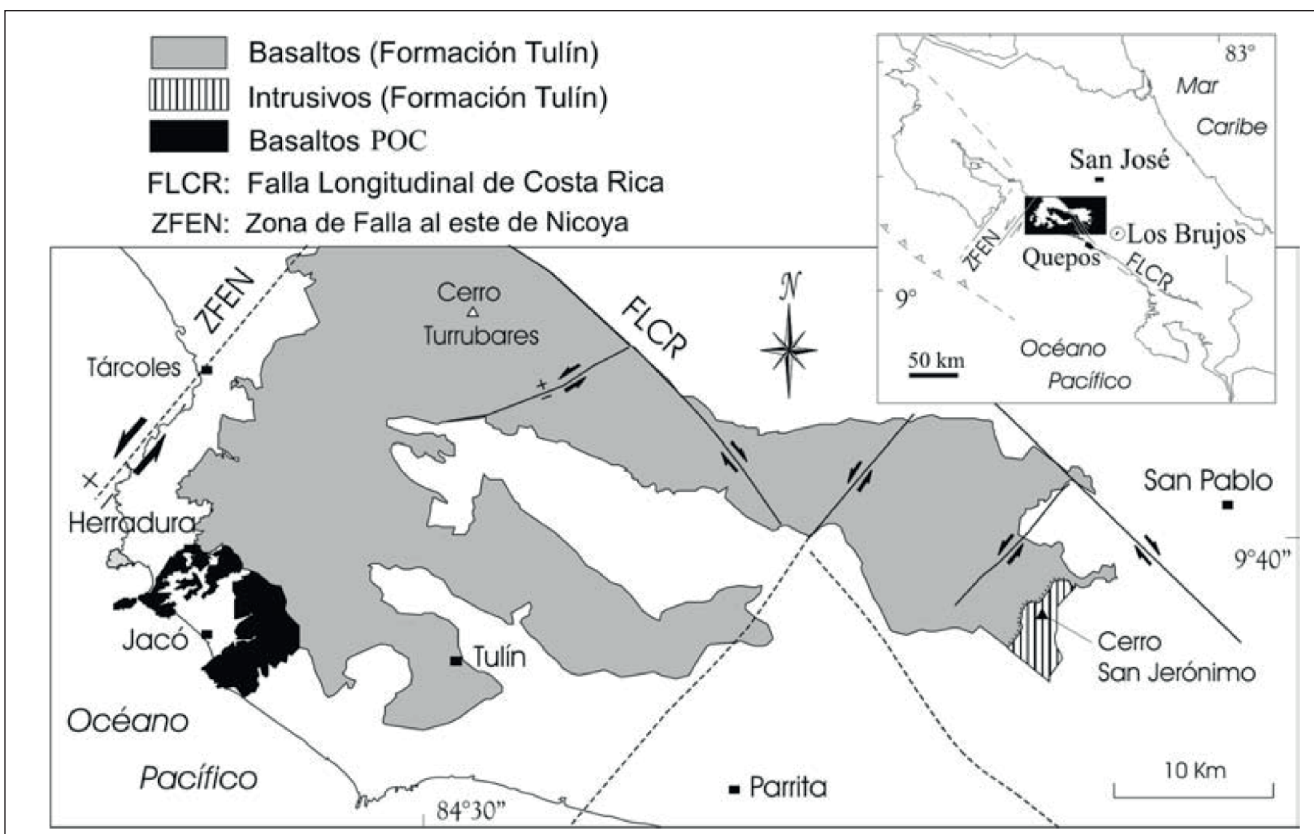


Figura 59. Mapa geológico simplificado del bloque Herradura según Arias. (2003).

Los afloramientos más expuestos forman los acantilados de Pueblo Escondido, Playa Conejo y Herradura, así como los ubicados entre Jacó y Playa Hermosa; un ejemplo se muestra en la Figura 60. También afloran en los cauces de ríos y quebradas, como el río Gloria; la quebrada sin nombre en Cañablancal; la quebrada Bonita; la quebrada sin nombre en la entrada a Mantas y Punta Leona; y la quebrada Mona que atraviesa el poblado con el mismo nombre.”

Basaltos (B)

Los basaltos del área de estudio son masivos, sin estructura interna claramente definida, y presentan colores que varían desde el negro y gris hasta tonalidades verdosas, rojizas o amarillentas en casos de meteorización muy avanzada (Fig. 61 y 63). Su textura es de fina a media; algunos basaltos son vesiculares. La mayoría muestran distintos grados de meteorización y alteración. Además, pueden contener xenolitos, como radiolaritas.

La mayoría se encuentran diaclasados y presentan varias generaciones de fracturas y vetillas rellenas de calcita y zeolita (principalmente laumontita), lo que indica su historia tectónica (Fig. 61). La gran mayoría son fracturas abiertas, con longitudes que varían desde milimétricas hasta centimétricas, rellenas predominantemente de calcita y zeolitas. En menor medida de material arcilloso o detrítico, tal como la esmectita.

Los basaltos tipo almohadilla (Fig. 62) no se encuentran bien preservados en el área de estudio; son vesiculares y presentan una matriz microcristalina compuesta por plagioclasas, piroxenos y olivinos.



Figura 60. Basaltos conformando plataformas de abrasión y acantilados de la zona litoral. Playa Punta Conejo (sitio PC050 a 1,4 km al noroeste de playa Herradura).

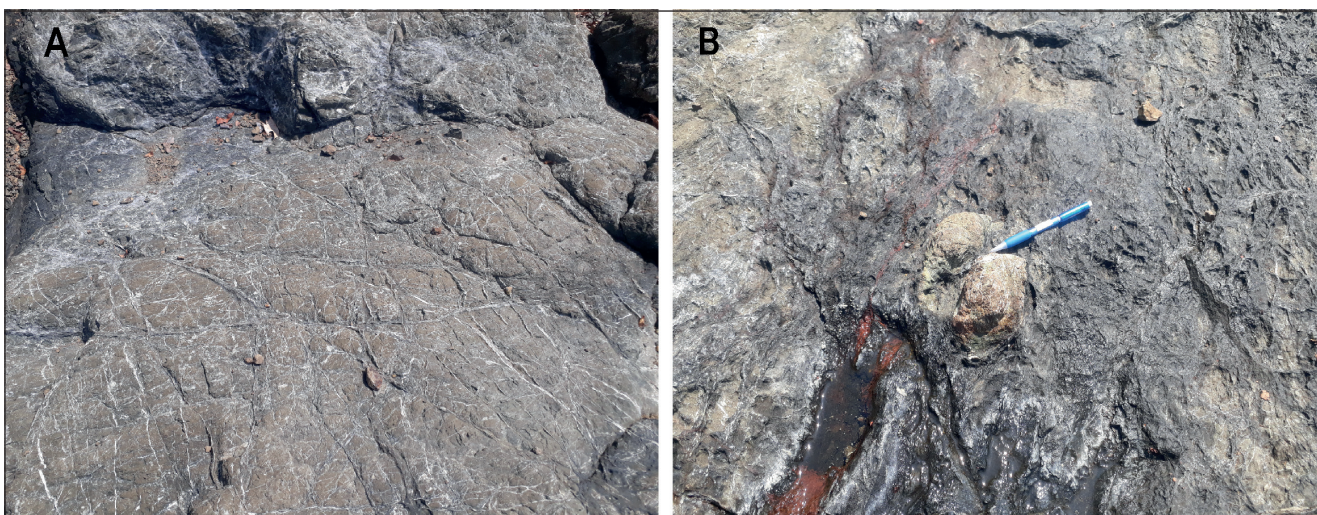


Figura 61. Basaltos en el sitio de playa Balsal (sitio PC311, 3,7 km al noroeste de Jacó, sureste de Punta Bocana). A) Basaltos mostrando varias generaciones de fracturas y vetillas rellenas posiblemente de sílice y calcita, indicativo de su historia tectónica; B) Xenolito de radiolarita emplazado o asimilado por los basaltos.



Figura 62. Basalto tipo almohadilla posiblemente de la formación Tulín. A) afloramiento en playa Faro Escondido al sur de Puerto Escondido, punto de documentación (PC119). B) afloramiento en quebrada sin nombre, calle Agüero a 1 km a noroeste de Cañablanca, PC049.



Figura 63. Basaltos muy meteorizados que presentan un color rojizo. Quebrada Bonita, sureste de playa Herradura, PC029.

El contacto de los basaltos con unidades sobreyacentes se encuentra solamente en la zona entre Herradura y Puerto Escondido. En la zona costera aflora contacto de basaltos con sedimentos del Miembro Caletas, que son calcilutitas calcáreas. El contacto es relativamente plano y buza por ángulos solamente de varios grados hacia NE. Otros contactos son interpretados como de origen tectónico.

Del análisis petrográfico de una muestra tomada en los acantilados del mirador ubicado al sur de la playa Jacó (Fig. 64), el basalto se describe como una roca masiva de grano fino, textura ofítica y un tamaño de grano de 0,05-0,3 mm; solo algunos fenocristales de piroxeno pueden alcanzar 1 mm. La roca está compuesta por largos cristales columnares de plagioclasa cálcica, que constituyen aproximadamente el 45 % de la muestra, y el 40 % de granos isométricos de clinopiroxeno y, con menor probabilidad, ortopiroxeno. El mineral opaco, probablemente magnetita, constituye aproximadamente el 5 %. Entre los fenocristales de plagioclasa también se encuentran agregados microcristalinos de color verde pardusco formados por clorita y posiblemente otros minerales secundarios de los grupos de la serpentinita y la esmectita, que podrían provenir de olivino descompuesto y constituir aproximadamente el 10 %. Las vetillas que atraviesan la muestra están formadas por zeolita, probablemente laumontita.

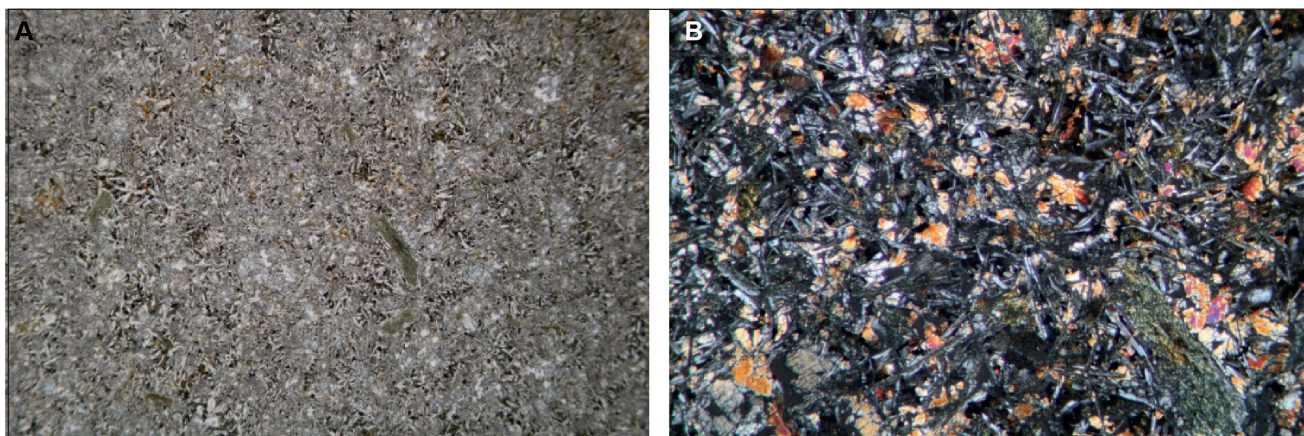


Figura 64. A) Textura de basalto. Formación Tulín, muestra PC030 (431350E/1060704N), polaroides //, ancho 10,5 mm. B) Textura de basalto. Formación Tulín, muestra C030, polaroides X, ancho 2,2 mm.

Caliza pelágica silicificada (Ca)

Eoceno Inferior

En las zonas altas de Fila Negra y en las proximidades de los cerros de Mata de Plátano, afloran bloques masivos de caliza, con tamaños que varían desde centimétricos hasta métricos, de color gris a rosado, con vetillas de calcita. La caliza se encuentra silicificada y presenta laminación (“packstone” radiolario-esponjosa). Véase en la Figura 66.

El estudio petrográfico de la muestra PC323 (Fig. 65) indica que se trata de una caliza micrítica de grano fino, ligeramente amarillenta, compuesta principalmente por conchas redondeadas de radiolarios de 0,05 a 0,2 mm de tamaño y, con menor frecuencia, por agujas de esponja de hasta 1 mm de longitud. Contiene vetas delgadas con un relleno de calcita esparita fina, de 0,05 a 1 mm de espesor. Algunas vetas presentan un borde marrón de hasta varios milímetros de ancho, debido a la penetración de pigmento. La mayor parte de los radiolarios y esponjas están calcificados, aunque una porción está compuesta por cuarzo microcristalino. Micropaleontología: Los foraminíferos planctónicos predominan sobre los bentónicos; entre los radiolarios, los Spumellaria predominan sobre los Nassellaria. Foraminíferos planctónicos: Acarinina coalingensis, Morozovella subbotinae, M. lensiformis. Foraminíferos bentónicos: Lenticulina, Nodosaria, Pseudonodosaria. Otros: Porifera (sterraster), Spumellaria, Nassellaria (¿Lamptonium sp.?).

Interpretación bioestratigráfica: Eoceno Inferior, intervalo correspondiente a la zona de foraminíferos planctónicos E4-E6.

Paleoambiente: batial, mar abierto.

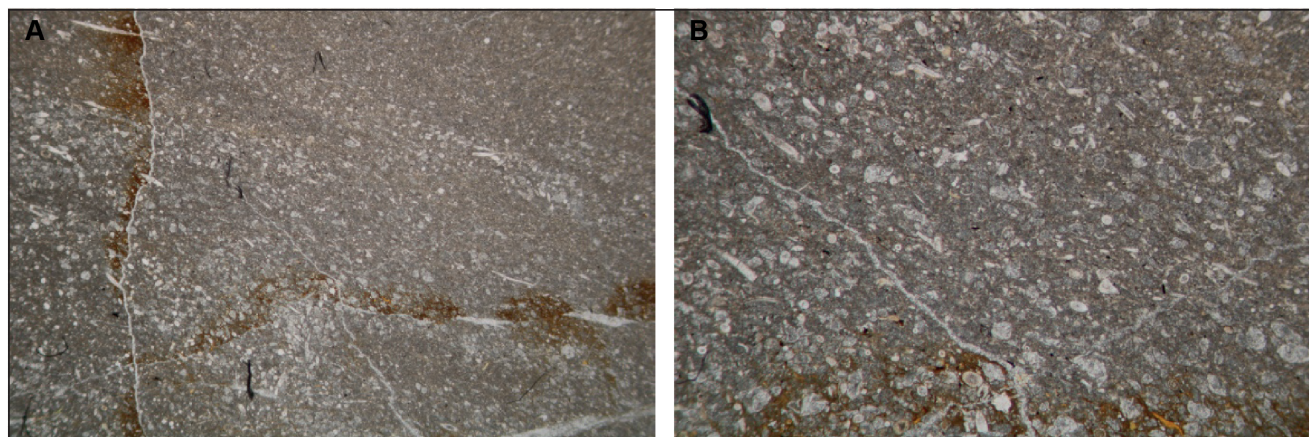


Figura 65. A) Textura de la caliza silicificada con laminación (“packstone” radiolario-spiculita), muestra PC323 (437904E/ 1060424N). Fm. Espíritu Santo o parte superior de Fm. Tulín, polaroides / /, ancho 10,5 mm. B) Textura de la caliza silicificada con laminación (“packstone” radiolario-spiculita), muestra PC323. Fm. Espíritu Santo o parte superior de Fm. Tulín, polaroides / /, ancho 2,2 mm.



Figura 66. Afloramiento de las calizas en Fila Negra, PC113.

Sedimentos pelágicos silicificados (Si)

Brecha silicificada

Las brechas silicificadas se encuentran en el cauce del río Gloria y en Fila Negra, como se muestra en la Figura 67. Se caracterizan por estar fuertemente tectonizadas, lo que sugiere un contacto de tipo falla con los basaltos. La brecha presenta colores gris claro, blanquecino y rosado, y contiene clastos de basaltos muy alterados. Esta unidad se limita a pequeños afloramientos, delimitados por un sistema de fallas con rumbo NNO-SSE.

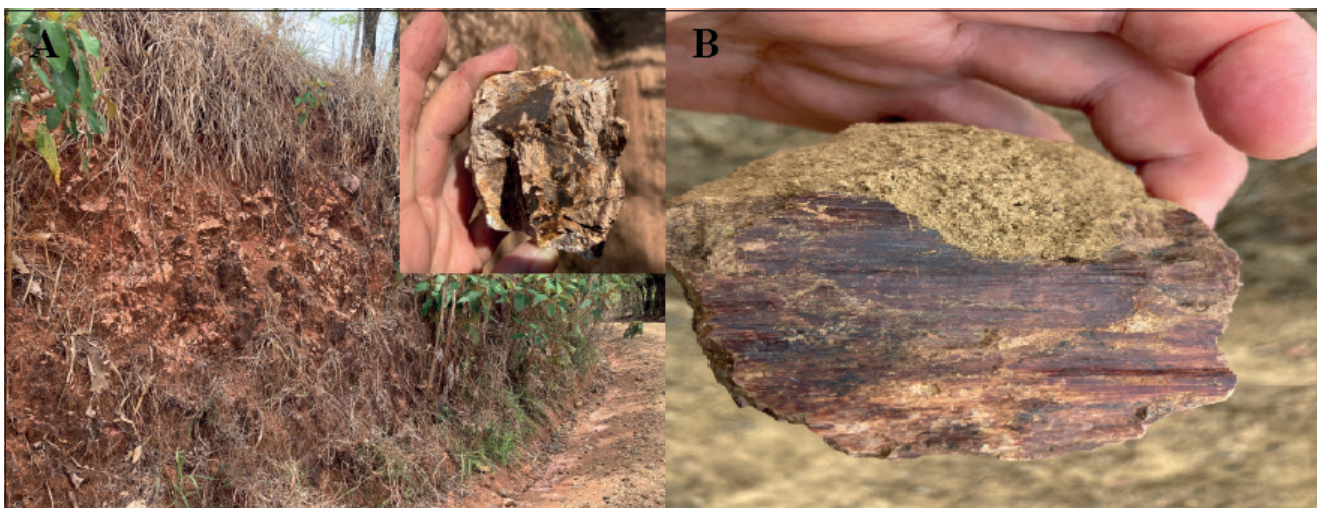


Figura 67. A) Brechas silicificadas color rosada que se observa en los cortes de camino hacia Fila Negra, PC 321, B) Muestra que claramente indica presencia de una falla cercana. PC 322

El análisis petrográfico de la muestra PC084 (Fig. 68), demuestra que la brecha está compuesta de cuarzo microcristalino y cristobalita subordinada, determinada por difracción de rayos X (XRD). El tamaño de grano es inferior a 0,05 mm. La roca forma una brecha compuesta por fragmentos de mm a cm que han sido regenerados repetidamente, y a lo largo de varias generaciones, por vetas de cuarzo secundario o cristobalita, en lugares con una textura radialmente radiante. La presencia de cristobalita indica un fuerte calentamiento de la sílice probablemente al contacto con lava basáltica.

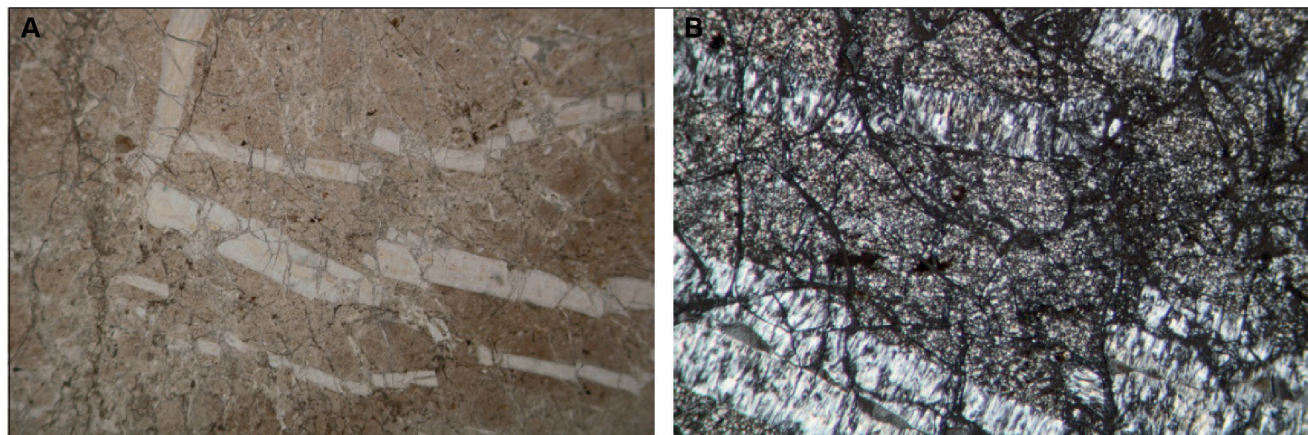


Figura 68. A) Textura de brecha silicificada. Formación Tulín, muestra B015, polaroides //, ancho 10,5 mm. Foto 35. B) Textura de brecha silicificada. Formación Tulín, muestra B015, polaroides X, ancho 2,2 mm.

Sedimentos epiclásticos

Los sedimentos en la parte alta de la Fila Negra son lutitas o tobitas de color gris a café claro, y beige cuando están muy alteradas. Presentan granos uniformes, muy finos, de tamaño arcilla y limo, con fragmentos clásticos de feldespatos; la mayoría de los granos son subangulares y no se observan fósiles macroscópicos. Se presentan en forma de estratos con espesores que varían desde centímetros hasta métricos, aunque la continuidad estratigráfica se pierde. Estos sedimentos se encuentran muy fracturados y cizallados, alternando con calizas pelágicas que forman parte de la Formación Tulín (Fig. 69).

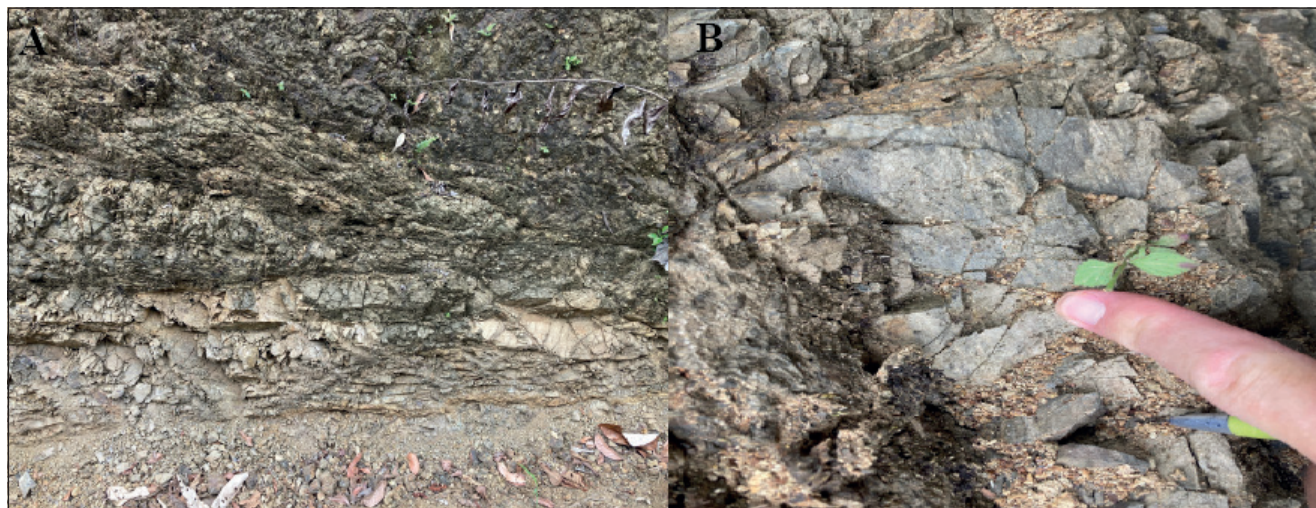


Figura 69. PC324: A) Depósito de areniscas de grano medio con aparente estratificación subhorizontal, muy cizallado y meteorizado. B) Plano de cizalla con aparentes estrías.

Unidad alóctona de la Formación Espíritu santo (ES)*Paleoceno superior-Eoceno inferior*

Se trata de varios afloramientos que conforman colinas de alturas casi uniformes, ubicados de manera muy localizada en el área de estudio, entre las localidades de Agujas y Mantas, así como en las lomas Pita que colindan con el sector norte de la población Quebrada Ganado. Según Corrales (2017), otro afloramiento, también muy localizado, se encuentra en un cerro al suroeste de Playa Pita y en el cauce de la Quebrada Margarita, donde presenta un buzamiento de $311^{\circ}/78^{\circ}$, en un único punto muy específico con coordenadas 190350 N / 468792 E.

Según Calvo & Bolz (1991), se trata de una unidad de origen alodápico, conformada por bloques alóctonos de calizas provenientes de plataformas carbonatadas de ambiente nerítico. El tamaño de los bloques varía desde centimétricos hasta métricos, con colores que oscilan entre gris claro, blancuzco y rosado, y presentan una textura masiva y fina.

Las calizas que afloran en los cerros cercanos a Playa Pita y Quebrada Ganado son roca calcárea color beige claro. Se trata de grainstone bioclástico, mal seleccionado con muy bajo contenido de micrita, con contacto puntual entre los granos.

Los clastos más grandes están constituidos por algas rodofíceas (Rhodophyceae) del orden de los Corallinales, afines a Lithothamnium con diámetros centimétricos variables entre los 2 a 4 cm aproximadamente. Estos clastos suman un 30% de la muestra, algunos de estos bioclásticos muestran perforaciones por bioturbación. Los moluscos están representados por fragmentos de bivalvos, básicamente lamelas de ostreidos de color gris de 1 a 2,5 cm de longitud y anchos de 2 a 3 mm, dichos fragmentos representan el 1% de los clastos. El resto de los bioclastos menores, con diámetros variables entre los 5 mm a 1 mm, están constituidos por fragmentos algales fuertemente retrabajados constituyendo el 65% de la muestra, pero también se observan megaforaminíferos bentónicos, con una representación próxima al 10% de los bioclastos menores. Aunque la muestra presenta una mala selección de los granos y contactos puntuales, lo que sugiere un ambiente de alta energía, no es posible establecer una alineación de los ejes largos de los clastos, ni siquiera los megaforaminíferos presentan una alineación predominante, ni bimodal por influencia mareal, lo que sugiere una sedimentación de tipo caótico. La muestra descrita se puede observar en la fotografía 70B.

De acuerdo con Corrales (2017), las calizas presentes en los cerros a lo largo del camino hacia Punta Leona son de color gris claro a café claro y contienen abundantes fragmentos de bivalvos y espinas de erizos.

La interpretación de estas calizas representa un enigma estratigráfico hasta el día de hoy. De acuerdo a la hipótesis de Soto (1985) es posible, que se trate de capas completas o grandes láminas de roca desplazadas sobre las rocas del Mioceno por el escarpe de la falla Chiquero. Estas capas de calizas posiblemente se conservaron únicamente como relictos en la cumbre de varias colinas, mientras que el resto fue erosionado debido al levantamiento del bloque Herradura, que favoreció la erosión. Sin embargo, es necesario continuar con estudios adicionales para determinar el origen de esta unidad. Véase Figura 70.

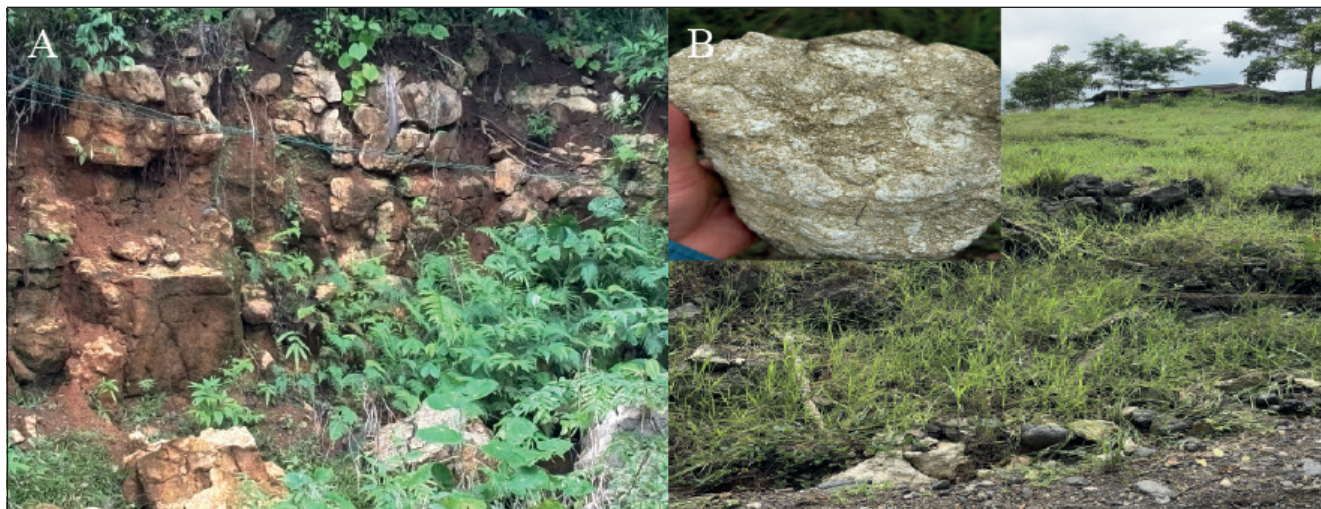


Figura 70. A) Afloramiento en lomas Pita que colindan con el sector norte de la población Quebrada Ganado. Se observa posibles capas o láminas de roca desplazadas, sometidas a procesos erosivos y de meteorización, PC207. B) Afloramiento de bloques centimétricos a métricos que conforman la colina ubicada a un lado de la carretera la Costanera al NE del poblado de Quebrada Ganado, PC 341.

NEÓGENO

Formación Punta Carballo (Mioceno Inferior -Mioceno Superior)

Miembro Caletas (CL)

Mioceno Inferior

Se extiende sobre la costa desde Playa Pógeres, en Punta Leona, playa Blanca hasta Puerto Escondido, Playa Sucia incluyendo playa Caletas cuyos acantilados representan el estratotipo de esta unidad. Hacia el este se extiende hacia Mantas, Quebrada Ganado, carretera costanera sobre la Fila Chiquero y al sur hasta Herradura.

Esta unidad está conformada por estratos de areniscas homogéneas con alternancia de areniscas muy finas hasta limolitas. En la mayoría de afloramientos presenta estratificación paralela plana con buzamientos $256^{\circ}/5^{\circ}$. Los estratos son de espesor decimétricos a métrico, bien definidos y de disposición subhorizontal. La roca se encuentra diaclasada y fracturada, observándose varias familias de diaclasas que afectan a todo el conjunto, así como vetas de calcita y cuarzo. Los estratos de grano fino muestran evidencias de meteorización superficial y en algunos casos los afloramientos se encuentran en un grado avanzado de meteorización, donde es común observar meteorización esferoidal. En algunos de los afloramientos no se reconocen estructuras sedimentarias internas visibles por el grado de meteorización (alejándose de la costa) y deformación de los estratos. Acercándose a las costas se reconoce laminación paralela, pero con poca alteración, véase en la Figura 71.



Figura 71. PC043: Miembro Caletas aflorando en los acantilados y plataformas de abrasión de la playa Caletas, donde se observan estratos de areniscas con espesores que varían de decimétricos a métricos, bien definidos y con una disposición subhorizontal.

Litológicamente se compone de una alternancia de areniscas muy finas y limo hasta lutitas con cemento calcáreo (calcilutitas), color gris azulado hasta negro, con un dominio de los primeros hacia el techo y de los limos hacia la base. Reacciona fuertemente al HCL. La roca presenta buena selección, granos líticos redondeados y contiene macrofósiles dispersos, con ocasionales acumulaciones centimétricas a decimétricas de orden tempestítico. También ocasionalmente contiene fragmentos de madera flotantes. La composición incluye minerales oscuros y cuarzo.

Microscópicamente las calcilutitas del punto de documentación PC048 y del PC204 (Figuras 72 y 73) son muy similares, de color café y bien sorteado, con abundantes foraminíferos. El tamaño del grano es de 0,05-0,5 mm. La proporción de carbonato en la muestra PC048 es de aproximadamente el 20% y de 30% para PC204. En la muestra PC204, además de los granos de minerales individuales, la roca contiene aproximadamente un 15% de bolitas de arcilla marrón de forma redondeada con un tamaño de 0,2-0,8 mm. Estas podrían ser formaciones de origen biogénico. Los foraminíferos tienen un tamaño de 0,05-0,15 mm y están compuestos de calcita. Los radiolarios redondos, más raros, alcanzan un tamaño de hasta 0,5 mm.

Guía Metodológica

Se pueden distinguir fragmentos de plagioclasa y cristales de cuarzo, de forma columnar o sus fragmentos, con un tamaño de hasta 0,1 mm, de los minerales clásticos. Otros granos se transforman en una mezcla de grano muy fino de esmectita secundaria y zeolita del grupo de la heulandita o la clinoptiolita (véase el análisis de XRD de la muestra muy similar C008). Micropaleontología: los foraminíferos planctónicos predominan sobre los bentónicos. Foraminíferos planctónicos: *Dentoglobigerina* gr. *galavisi*, *Globigerina* *bulloides*, *Globigerinella* *obesa*, *Globorotaloides* *jolli*, *Globorotaloides* *eovariabilis*, *G. quadrocameratus*, *Globoturbotalita* sp, *Paragloborotalia* *pseudocontinua*, *P. continua*, *Tenuitella* *angustiumbilitata*, *Trilobatus* *immaturus*. Foraminíferos bentónicos: *Bathysiphon* sp., *Lenticulina* sp., *Angulogerina* sp., *Uvigerinella*, *Islandiella* sp., *Bolivina* sp., *Heterolepa* sp., *Gyroidinoides* sp., *Cibicidoides* *cushmani* Otros: Radiolarios, Poríferos Interpretación bioestratigráfica: Mioceno Inferior (¿Aquitano?).

Según Laurito (1988) se trata de una facie de depósitos limosos de estuario profundo, con mucho aporte de material clástico producto de la erosión de un arco andesítico (Cervantes, 1985), el mismo autor propone un ambiente de deposición de litoral con una consecuente subsidencia, esto debido al espesor considerable que presenta esta unidad. De acuerdo a los estudios de micropaleontología realizados por Dr. Miroslav Bubík del ČGS el ambiente propuesto es Batial.

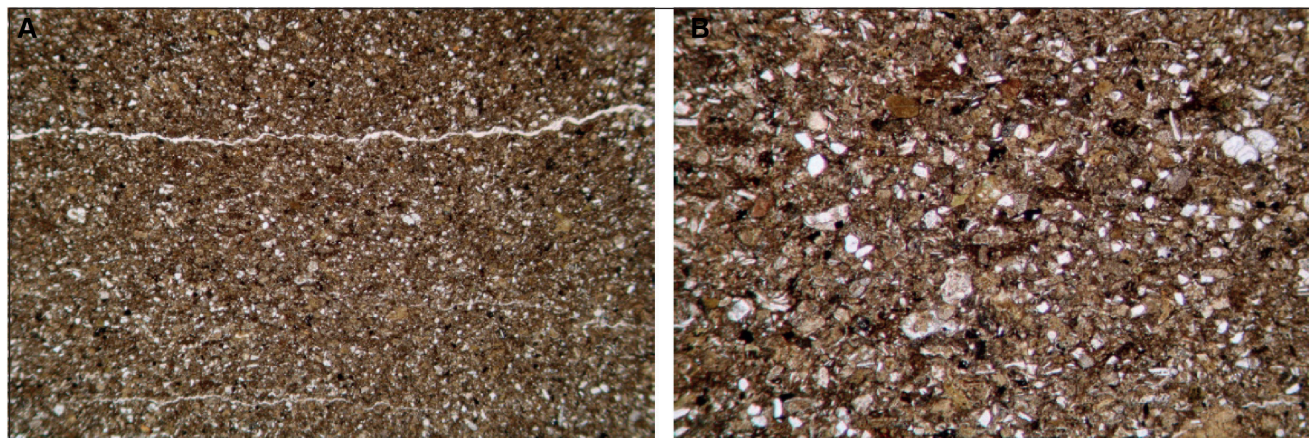


Figura 72. A) Textura de tobita calcítica - calcilitita arenosa, muestra PC048 (428505E/1070878). Miembro Caletas, polaroides //, ancho 10,5 mm. Foto 117. B) Textura de tobita calcítica - calcilitita arenosa, muestra PC048. Miembro Caletas, polaroides //, ancho 2,2 mm.

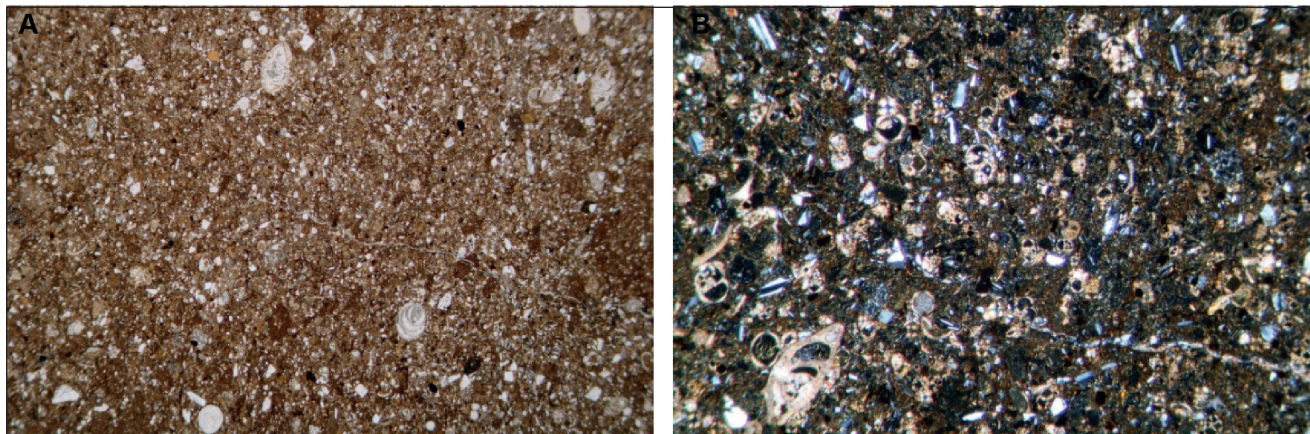


Figura 73. A) Textura de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra PC204 (430890E/1078178N). Miembro Caletas, polaroides //, ancho 10,5 mm, Foto 126. B) de tobita calcítica - calcilutita arenosa, muestra C044. Miembro Caletas, polaroides X, ancho 2,2 mm.

Miembro Icaco (IC)

Mioceno Inferior

El Miembro Icaco es descrito por Denyer et al. (2003) como un afloramiento muy localizado en el extremo norte de la playa Tivives, que se extiende en rumbo NO hacia playa Icaco. Los acantilados que conforma son medianamente altos hasta 15 m aproximadamente.

Está conformado por estratos con espesores desde centimétricos hasta métricos, compuestos por intercalaciones de areniscas finas hasta media (Fig. 74). La unidad se dispone casi subhorizontal o muestra buzamientos bajos de varios grados hacia el NO. Se encuentra diaclasado y fracturado, por fracturas subverticales. Alteración no se observa. La estratificación es de tipo horizontal planar tabular con buzamiento de $295^{\circ}/5^{\circ}$ y $255^{\circ}/20^{\circ}$, con estructuras internas de estratificación paralela y lenticular menor a 5 cm. Presenta discontinuidades o fracturas de alto ángulo y verticales ($010^{\circ}/72^{\circ}$) que cortan casi perpendiculares a la estratificación, posiblemente por descompresión y alteración del talud.

La roca es de color gris verdosa bien seleccionada, con microforaminíferos, sin aparente cemento calcáreo, con intercalaciones de lentes de guijarro y de macrofaunas de moluscos. No presenta alteración profusa ya que la roca se observa muy consistente y de alta dureza.

Esta unidad se desarrolló en un ambiente de sedimentación de alta energía posiblemente litoral. El contacto inferior no se observa y el contacto superior con el Miembro Mata de Limón se caracteriza por la presencia de una toba de lapilli acrecional y troncos en posición vital y le asignan una edad de Mioceno Inferior por relación estratigráfica (Denyer et al., 2003).



Figura 74. Afloramiento del Miembro Icaco en playa Tivives, extremo norte, PC117 muestra las características litológicas del Miembro Icaco. A) los acantilados de mediana altura $<10\text{ m}$ y las fracturas o discontinuidades paralelas al talud por descompresión de la roca; B) tipo de estratificación paralela y lenticular; C) areniscas de grano fino a medio gris verdoso; D) lentes de areniscas guijarrosas.

Miembro Mata de Limón (ML)

Mioceno Inferior

Se encuentran expuestas principalmente en los cortes de la carretera Interamericana y en otras carreteras que atraviesa las localidades de Cabezas, Mata de Limón (localidad tipo), Figueroa, Cascabel, Salinas, Cambalache y en las zonas bajas de Corralillo, Silencio y Tivives. También aflora en la cuenca baja del río Barranca (Žáček et al., 2012).

El Miembro Mata de Limón es una secuencia de sedimentos volcánicos estratificados de ambientes continentales y están compuestos en su mayoría por material volcánico como tobas, ignimbritas y aglomerados intercalados con areniscas y limolitas, hasta gravas lentiformes de origen fluvial. La roca presenta un color café, morado, a veces verdoso, cuando está enriquecido en vidrio volcánico pumíceo. No son calcáreos ni fosilíferos. Las capas individuales tienen un espesor de 0,2-1 m. A menudo tienen gradación normal, de areniscas hacia arcillas. En lentes de depósitos fluviales (tamaño 3-10 m) pueden observarse también areniscas hasta conglomerados con estratificación cruzada. Los cantos de los conglomerados son bastante

ovalados, de rocas volcánicas (andesitas) y también de sedimentos (grauvacas, limolitas, lutitas y cuarzos) y normalmente con tamaños de hasta 4 cm (raramente hasta 20 cm). Véase Figura 75.

En acuerdo a Denyer et al. (2003), las areniscas que son de color verdes son volcánicas, con estructuras como laminación paralela y estratificaciones cruzada y ondulada. Las arenas brechosas rojas se intercalan con las limolitas rojas y/o moradas, contienen clastos de andesita y granos de plagioclasas idiomórficas y piriboles.

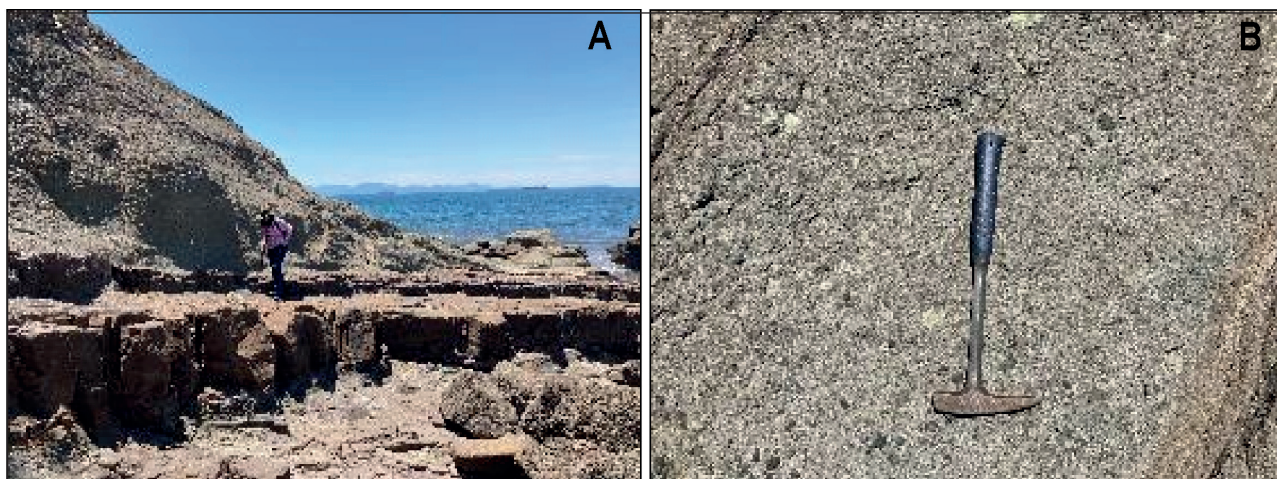


Figura 75. Afloramientos del Miembro Mata de Limón en Punta Corralito, 1 Km al sur de Puerto Caldera (PC254 420523 E/ 1093936 N). A) Una secuencia subhorizontal de brecha volcánica multicolor que alternan con estratos de arenisca gruesa de origen fluvial. B) Detalle de un estrato de arenisca gruesa hasta conglomerado que forma una intercalación métrica dentro de las rocas volcánicas.



Figura 76. Afloramiento de rocas volcánicas del Miembro Mata de Limón en un corte de la carretera principal, al oeste del puente Jesús María, PC109 (425889 E/1096237 N). A) Los bancos decimétricos hasta métricos de ignimbrita masiva. B) La roca tiene matriz fina, en ella flotan líticos de diversos tamaños, en su mayoría angulares

Ignimbrita

Una muestra de ignimbrita tomada en las proximidades del poblado de Tivives (PC109), tiene textura orientada, color rojizo y una matriz caótica. Con prominente fiammes lenticular y de clastos líticos de 0,5-5

Guía Metodológica

mm de tamaño. La matriz es soldada, de grano fino, vítrea y opaca. En ella flotan líticos de diversos tamaños, en su mayoría angulares, algunos de grano muy fino, mayormente isótropicos. También contiene clastos de roca porfídica con fenocristales de plagioclasa, probablemente de composición andesítica. Otros clastos son de grano fino y casi opacos debido a la dispersión de pigmento de hematita. Toda la roca y la mayoría de los clastos están fuertemente meteorizados o alterados hidrotermalmente con abundante pigmento de hematita. Los fiammes miden hasta 1 cm de largo y 3 mm de espesor, son isótropicos, con pequeños granos anisótropicos, y en algunos lugares están reemplazadas por una mezcla de minerales secundarios. Ver figura 77.

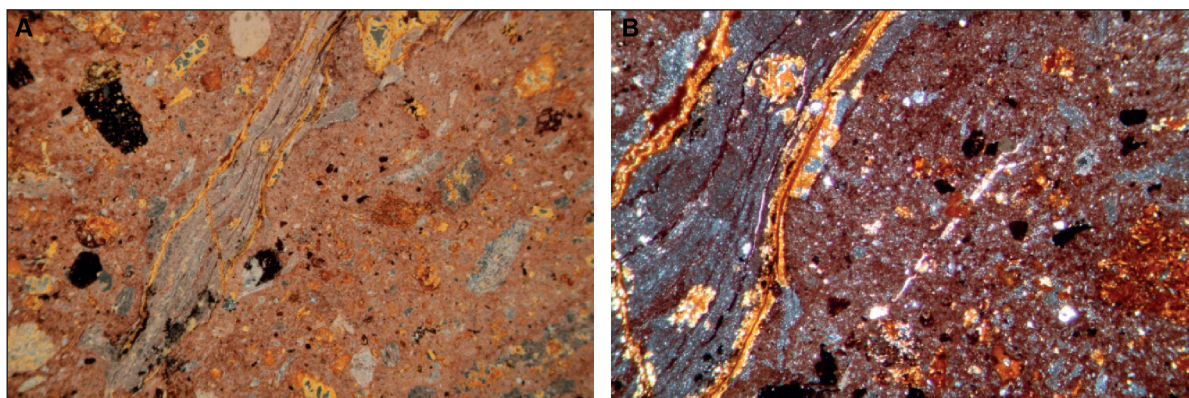


Figura 77. A) Textura de la ignimbrita, muestra PC109 (425889 E/1096237 N). Miembro Mata de Limón, método DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de ignimbrita, muestra PC109. Miembro Mata de Limón, polaroides X, ancho 2,2 mm.

Toba o tobita -arenisca lítica de grano fino

Roca de color gris-marrón, de grano fino y bien sorteada, con estratificación paralela. Los clastos son angulares, soporte por clasto (textura “clast-supported”) y presentan un tamaño uniforme de aproximadamente 0,05 mm. De los clastos, se pueden identificar feldespatos prismáticos con predominio de plagioclasa sobre posible feldespato potásico (alrededor del 15%), probables granos de cuarzo (alrededor del 10%), aproximadamente un 10% de granos opacos (¿hematita?) y granos esporádicos de piroxeno. Los demás fragmentos presentan una textura interna de grano muy fino, son blancos lechosos de color blanco (gris o marrón, y sean minerales o rocas alteradas, probablemente transformadas en esmectita). Ver Figura 78.

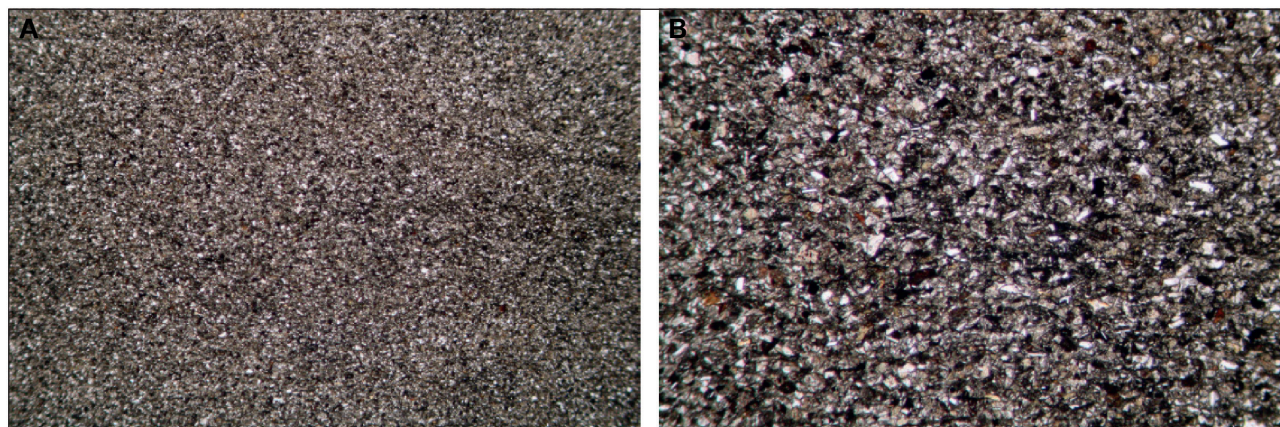


Figura 78. A) Textura de toba o tobita – arenisca lítica, muestra PC254. Miembro Mata de Limón, polaroides //, ancho 10,5 mm. B) Textura de toba o tobita – arenisca lítica, muestra PC254. Miembro Mata de Limón, polaroides //, ancho 2,2 mm.

Miembro Roca Carballo (RC)*Mioceno Inferior-Mioceno Medio*

Los depósitos del Miembro Roca Carballo afloran en el área de estudio en forma de acantilados y plataformas de abrasión en las playas de Boca Barranca, Doña Ana, Pirata y Caldera, asimismo desde playa Pógeres hasta playa Aguja. Además, se observan en los cortes de camino que atraviesan los poblados de Puerto Peje y Camaronal. Al norte forman las lomas del Cerro Playa Linda y cerro Barbudal. El estratotipo se localiza en el sector norte del área de estudio y corresponde a la secuencia sedimentaria aflorante desde la localidad de Roca Carballo hasta playas de Doña Ana. Las rocas de este lugar están descritas en forma detallada por Denyer et al. (2003).

La unidad es subyacida al norte por rocas volcánicas y sedimentarias del Miembro Mata de Limón, cuyo contacto se puede observar en la ladera oriental del cerro Barbudal cerca del poblado Cascabel. Y es sobreyacida, muy comúnmente, por depósitos coluviales que se encuentran muy meteorizados. Al sur colinda con el Miembro Caletas, donde se observa un cambio lateral petrográfico.

Al norte el Miembro Roca Carballo es sobreyacido por lahares o debrys Flow de la Formación Tivives, entre playa Tivives al norte y la desembocadura del Río Grande de Tárcos al sur. Otra unidad que sobreyace al norte son ignimbritas de la Formación Orotina, que afloran en las zonas entre Cabezas, Artieda y Cascabel.

Los sedimentos en su mayoría son depósitos de geometría tabular, con estratificación paralela, ondulada y cruzada. Presentan laminación paralela interna y ritmos más delgados de entre 10 a 15 cm. Los estratos conforman paquetes decimétricos hasta métrico y están inclinadas con ángulo de 10° – 40° al SO (Caldera) o SE (Playa Doña Ana). Al sur entre Puerto Peje y Punta Leona buzan en varias direcciones con ángulos entre 5°- 50°. Los afloramientos, frecuentemente, se encuentran fracturados.

Litológicamente está conformado por limolitas calcáreas, lutitas, areniscas, conglomerados, y también de composición volcánoclastico como brechas y tobas. Según el tamaño del grano los colores varían desde gris a gris verdosa y es significativamente fosilífero. En el caso de las capas de los conglomerados, los espesores pueden alcanzar de 4 a 5 m y el material está compuesto de clastos volcánicos (fragmentos de andesitas, plagioclasas) bien redondeados y de fragmentos de conchas gruesas (gasterópodos, bivalvos, etc.). También presentan conchas y troncos.

Según la sección estudiada el ambiente de sedimentación muestra una transgresión marina del nivel inferior hacia una secuencia continental al nivel superior, llanuras de marea en una bahía interna hasta estuario submareal (Denyer et al., 2003). y referencias ahí citadas).



Figura 79. Afloramientos del Miembro Roca Carballo en Playa Pirata, 1,2 Km al sur de Playa Doña Ana (PC297). A) Acantilado norte de la playa. Estratificación métrica. B) Estratos métricos con geometría tabular de areniscas medias hasta gruesas con laminación lenticular y estructuras de bioturbación ocasionales.

Guía Metodológica

Según (Kuijpers, 1979; Laurito, 1988), el ambiente de depositación corresponde a llanura de marea, en una bahía interna hasta estuario submareal (Fischer & Aguilar, 1995).

De la muestra PC095 se determinó que corresponde a una calcilitita sin orientación preferente, con una matriz arcillosa de grano muy fino, ligeramente anisótropa, que constituye aproximadamente el 55 % de la muestra. Presenta clastos angulares o columnares de 0,05 a 0,1 mm de tamaño, con excepciones de hasta 1 mm de longitud, compuestos principalmente por feldespato (aproximadamente 15 %), que conservan la forma original de los cristales, y clastos completamente alterados, probablemente de origen volcánico, transformados en agregados microcristalinos de color amarillento, probablemente esmectita. Aproximadamente el 30 % de la muestra es calcita, que se presenta en forma de agregados microcristalinos y bioclastos, especialmente conchas de moluscos de diversos tamaños, hasta de centímetros. Los foraminíferos son abundantes, predominando los planctónicos sobre los bentónicos. Foraminíferos planctónicos: *Ciperoella* cf. *anguliofficialis*, *Dentoglobigerina* sp., *Globigerina* *bulloides*, *Globorotaloides* *quadrocameratus*, *Globoturborotalita* sp., *Tenuitella* *angustiumbilitata* y *Trilobatus* *immaturus*. Foraminíferos bentónicos: *Gaudryina* cf. *subglabra*, *Vulvulina* cf. *spinosa*, *Bolivina* sp. y *Melonis* sp. Otros: Bivalvia y Echinoidea. Interpretación bioestratigráfica: según el plancton, se determinó que corresponde al Mioceno inferior (¿Aquitano?), lo cual concuerda con los foraminíferos bentónicos (etapa Saucesiense regional o más reciente).

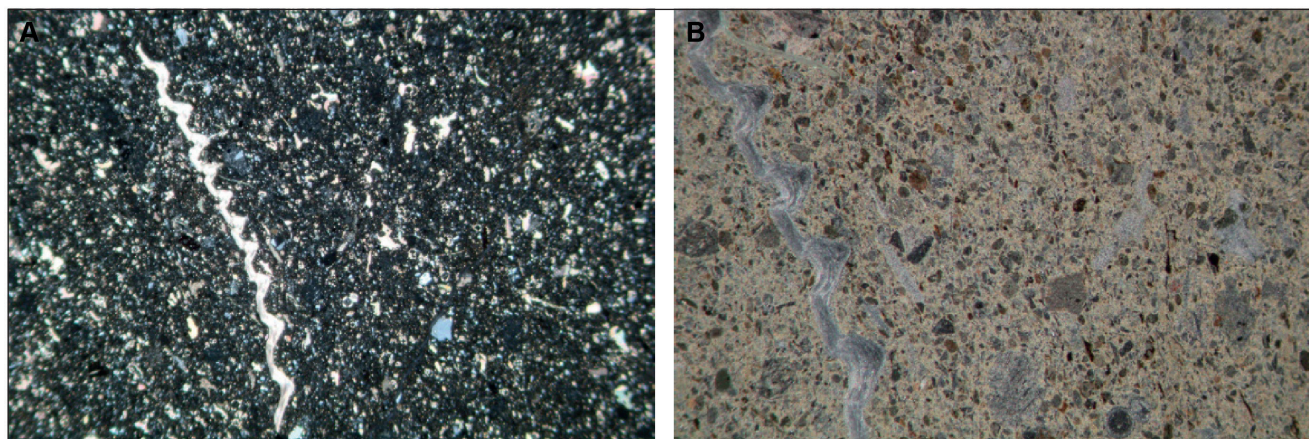


Figura 80. A) Textura de tobita calcítica – calcilitita. Miembro Roca Carballo, localidad playa Doña Ana, muestra PC095 (418976 E/1101084 N), polaroides X, ancho 10,5 mm. B) Textura de tobita calcítica – calcilitita. Miembro Roca Carballo, localidad playa Doña Ana, muestra PC095, método DF, ancho 2,2 mm.

La muestra PC094 tomada en las proximidades de Playa Doña Ana, es una arenisca lítica heterogénea de grano fino con textura “clast-supported”, que presenta fragmentos irregulares de lutita de tamaño centimétrico. El tamaño de los clastos de rocas y minerales oscila entre 0,1 y 1,2 mm, y su forma varía de subangular a angular. La roca está compuesta por clastos de roca volcánica de grano fino (50%), clastos de monocristales de plagioclasa, predominando sobre cuarzo y con escaso piroxeno (todos juntos 15%), fragmentos irregulares de lutita (15%) y calcita (20%). La calcita forma agregados microcristalinos lobulados e irregulares de hasta 2 mm, o se presenta en forma de bioclastos. Los clastos de feldespato corresponden a plagioclasa angular y clara. Los clastos de roca volcánica presentan un color que varía entre amarillo y amarillo pardusco, son turbios, mayormente de grano fino y están formados por minerales secundarios, aparentemente arcillosos, que reemplazan la asociación mineral primaria. En algunos clastos de roca volcánica se conservan pequeños cristales prismáticos largos de plagioclasa, junto a la masa amarilla de mineral arcilloso.

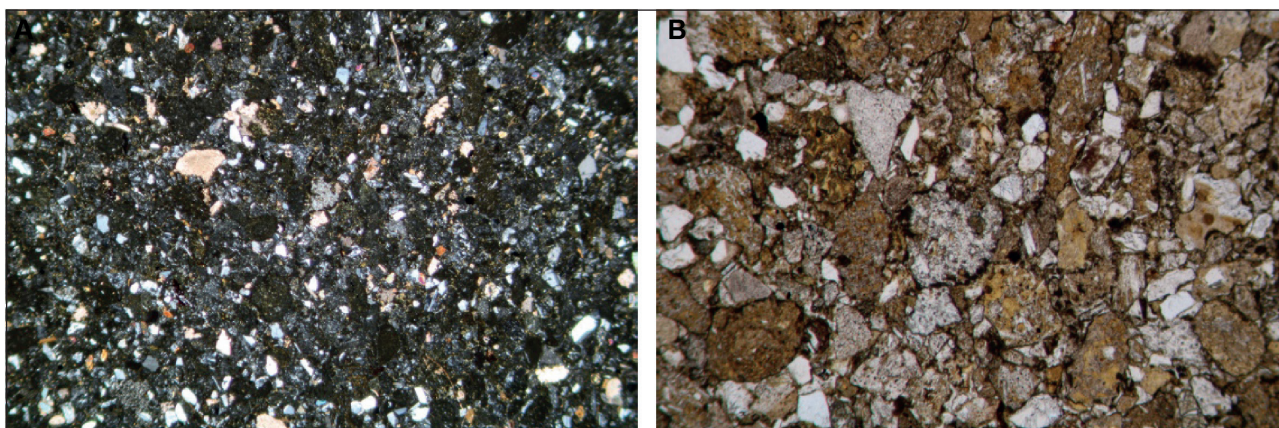


Figura 81. A) Textura arenisca lítica con bioclastos y calcita. Miembro Roca Carballo, muestra PC094 (419377 E/1101141 N), polaroides X, ancho 10,5 mm. B) Textura arenisca lítica con bioclastos y calcita. Miembro Roca Carballo, muestra PC094, polaroides //, ancho 2,2 mm.

CUATERNARIO

Formación Tivives (TV)

Pleistoceno

Cubre una mayor extensión en la zona norte del área de estudio, al noreste desde la finca Corralillo y Alto de las Mesas hasta el río Grande de Tárcos al suroeste.

Tal como lo describen Romanes (1912), Dengo (1960), Madrigal (1970) y Denyer et al. (2003), esta brecha volcánica está compuesta por rocas de origen volcánico y posiblemente corresponde a depósitos de lahar o debris flow. La unidad yace en discordancia sobre los sedimentos del Miembro Mata de Limón y Roca Carballo. Sobre ella se superponen altas paleoterrazas fluviales y las ignimbritas de la Formación Orotina. La composición petrográfica y textural es polimíctica y altamente heterogénea, con clastos que varían desde tamaños milimétricos y centimétricos hasta bloques de escala métrica. Algunos bloques superan los 10 metros de diámetro. Los clastos presentan formas angulares a subredondeadas, y también se observan guijarros fluviales completamente redondeados que fueron transportados por el lahar a lo largo de los cauces de la época. Véase la Figura 82.

Los clastos son volcánicos con predominancia de bloques de andesita, masivas y porosas, pero hay también clastos de rocas blancas, que podrían ser riolitas o tobas riolíticas.

La matriz corresponde a una brecha de grano muy fino, con tamaños que van desde arcilla hasta aproximadamente 5 mm, y presenta una textura en la que los fragmentos están soportados por la matriz (matrix-supported). El color de la matriz es amarillento; los clastos son incoloros, amarillentos, rojizos o turbios oscuros. La parte más fina de la matriz consiste en partículas muy finas de tamaño de grano arcilloso a limoso; para el grano fino, parece casi opaco. Aproximadamente el 50% de la matriz consiste en clastos angulares a redondeados, distribuidos con bastante regularidad, de 0,05 a 5 mm de tamaño. Los clastos angulares de plagioclasa predominan sobre los clastos de roca; son menos comunes los clastos de vidrio isotrópico, piroxenos y, raramente, anfíboles. Los clastos de roca son principalmente andesitas con plagioclasa prismática larga, a veces con piroxeno. Algunos clastos son de grano fino con cristales de plagioclasa casi aciculares. Los clastos más grandes, de hasta 5 mm de tamaño (en sección), son rocas volcánicas porfídicas de grano fino hasta grueso, probablemente con una composición que varía entre riolita y andesita (Véase en la Fig. 83)



Figura 82. Afloramiento de labar de la formación Tivives en playa Bajamar. Punto de documentación PC233). Se trata de un afloramiento de gran tamaño que conforman acantilados de la playa, de textura masivo y polimícticos, con bloques sobre tamaño angulares y subredondeados. Matriz café claro a beige. La caída o meteorización de los clastos o bloques por la abrasión de las olas, dejan cavidades tipo cavernas. Sobre camino, hasta los 3.5 km al noreste de Guacalillo se observan las partes distales de estos labares (hiperconcentrado), con matriz de granulometría fina a gruesa, tobáceas, color crema. La parte basal es un flujo de lodo tobáceo y las areniscas líticas muestran estratificación cruzada por flujo un tanto turbulento del labar. Es importante destacar la importancia de la falla Jesús María, dónde el bloque occidental se eleva a unos 100 m.

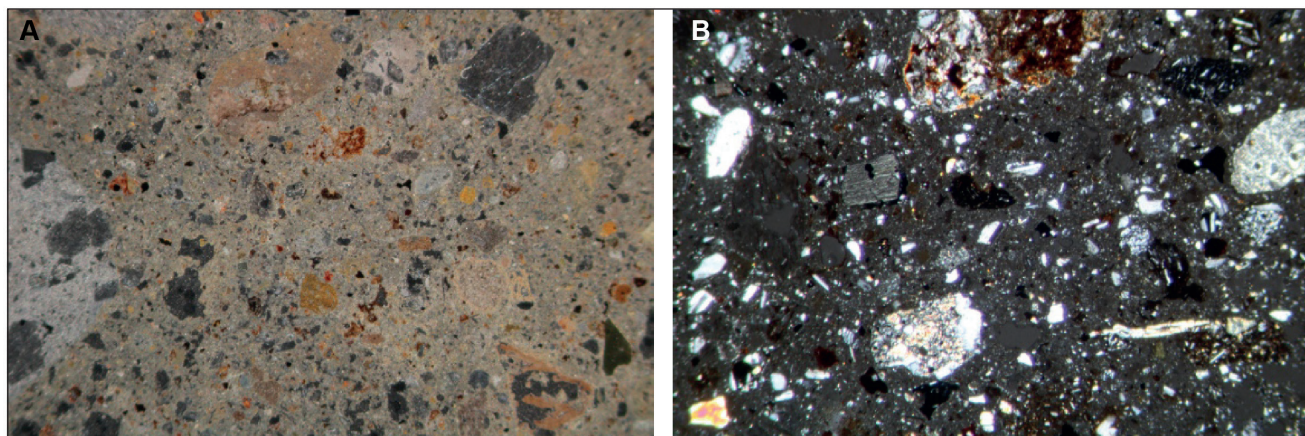


Figura 83. A) Textura de parte más fina (cemento) de brecha volcánica o labar, muestra PC023 (425645 E/1088148 N). Formación Tivives, método DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de de parte más fina (cemento) de brecha volcánica o labar, muestra PC023. Formación Tivives, polaroides X, ancho 2,2 mm.

Formación Orotina (OR)

Pleistoceno Superior

Las rocas de la Formación Orotina afloran al NE del área de estudio y conforman capas de las colinas que se ubican entre las localidades de Cabezas, Artieda y Cascabel.

Conforme a lo expuesto por Dengo (1960), Madrigal (1970), Pérez (2000), Marshall et al. (2003) y Denyer et al. (2003), la unidad representa flujos piroclásticos o ignimbritas de edad aproximada de 400 ka (Marshall, 2000), con espesores variables de hasta varias decenas de metros. La formación es subyacente de forma discordante con varias unidades; en el territorio de estudio principalmente con el miembro Mata de Limón y en algunos lugares sobreyace también a la Formación Tivives. Asimismo, se localizan relictos aislados, p.e. al

sur del pueblo Matamoros donde yace sobre la Formación Tivives. En la localidad de Carrizal, c.a 2 km al SE de Bajamar se preservó en una cantera un relicto de ceniza gris con espesor de dos metros, que relacionamos con la Formación Orotina. Además, la ignimbrita se ubica sobre una paleoterraza que yace sobre la unidad Tivives. Este afloramiento es representativo ya que define la edad de la paleoterraza mayor a los 400 ka.

La roca tiene textura brechosa, mayormente con vesículas de desgasificación, y está compuesta por pómez colapsados (fiammes de obsidiana), pómez milimétrica hasta de 1 cm, que se encuentran orientadas. De color café claro, gris a amarillento, líticos, escoria de color de color negro, inmersos en una matriz de detritos fina, de color gris – rosado con cristales de plagioclasa que en algunos afloramientos se encuentran alterados y piroxenos.

La muestra PC108 (a proximidades de la localidad Cabezas) dispone estratificación en sección, con indicios de fiammes. Está compuesta por una matriz microcristalina, cristaloclastos de minerales y hematita opaca u oxidada, formando pigmento disperso o pequeños agregados en o alrededor de los clastos. La matriz constituye aproximadamente el 65% de la muestra, es de grano muy fino y está compuesta por granos de cuarzo muy finos. Los clastos representan aproximadamente el 30%, tienen formas isométricas o columnares y un tamaño de 0,2-2 mm. El mineral original de los clastos fue probablemente feldespato; algunos clastos con abundante pigmento de hematita podrían representar biotita o anfíbol. En todos los casos, los clastos son reemplazados por un mosaico de caolinita de grano muy fino con o sin pigmento de hematita. Mediante difracción de rayos X (XRD) solo se determinó cuarzo, caolinita y hematita subordinada. Podría tratarse de una alteración hidrotermal (Véase Figura 84).

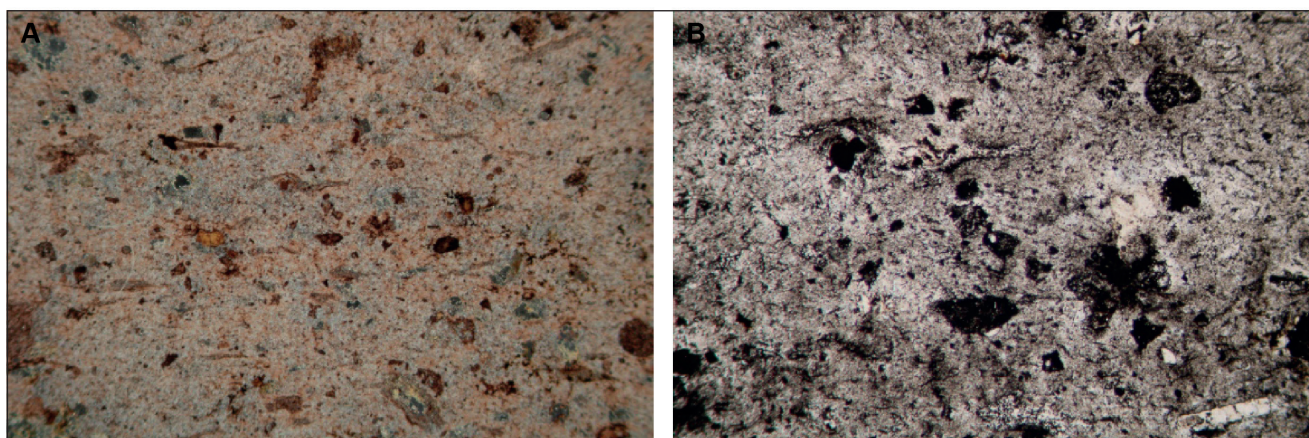


Figura 84. Muestra PC108 (420772 E/ 1100900 N). A) Textura de ignimbrita, fuertemente caolinizada, Fm. Orotina, muestra B039, polaroides //, DF, ancho 10,5 mm. B) Textura de ignimbrita, fuertemente caolinizada, Fm. Orotina, muestra B039, polaroides //, ancho 2,2

La muestra PC222 obtenida a 1 km al sur de Artieda, dispone textura orientada, con matriz rojiza, microcristalina a vítrea, casi isotrópica (alrededor del 50%), unida por fiammes colapsadas, líticos más o menos deformados de 0,1-3 mm (35%) y fenocristales idiomórficos o fragmentados (rotos) incoloros (alrededor del 10%), probablemente originalmente cuarzo o feldespatos, pero ahora isotrópicos, reemplazados por vidrio. La matriz es microcristalina con abundante pigmento opaco finamente disperso en matriz, probablemente hematita. Los clastos también son vítreos, de composición similar a la matriz, por lo general microcristalinos; algunos son semi opacos o lechosos con pigmento de hematita. Por analogía con la muestra de ignimbrita B080, se puede asumir que los principales minerales de la muestra son, además de la fase vítrea, feldespato

Guía Metodológica

potásico, plagioclasa, cristobalita y hematita, con posible presencia de cuarzo. Algunos granos llenos de pigmento de hematita podrían representar clinopiroxeno (véase en la Figura 85).



Figura 85. Muestra PC222 (425502 E/ 1099241V) A) Ignimbrita color gris rosado con textura eutéxica, las vesículas de desgasificación se encuentran orientadas. B) Brecha piroclástica, medianamente soldada, meteorizados color amarillo, cuya matriz contiene óxidos de hierro.

CUENCA PARRITA

Formación Punta Judas (PJ)

Mioceno Medio

Se extiende en el extremo sureste del área de estudio desde Quebrada Amarilla hasta Esterillos Oeste y las zonas altas en el sector sur de Higuito. Corresponde con las colinas y cerros hasta la zona costera donde constituye plataformas de abrasión de muy bajo ángulo (Punta Judas, Punta Mala hasta Esterillos Oeste) (Fig. 86). También aflora a 1,5 km al norte del Estero Aserradero, a lo largo de un afluente de la Quebrada Aserradero (Figs. 88 y 89).

La estratificación es generalmente decimétrica con geometría tabular, en algunos casos con laminación paralela planar y a veces lenticular (Fig. 86 y 87). Poco meteorizado en los afloramientos de los ríos y la zona costera, y alta en las zonas de colinas y taludes. Las direcciones de buzamiento varían de 085°, 166° y 232° y buzamientos de 12° a 35° en los sectores de Esterillos Oeste, Higuito y Quebrada Aserradero.

Se compone de areniscas de grano medio a grueso bien seleccionadas de color gris, con líticos re TRABAJADOS menores a 5 mm, cemento calcáreo, algunos estratos contienen bioclastos de moluscos como en el sector de Punta Judas y Quebrada Aserradero (Figs. 86, 87, 88, 89). Además, contienen líticos volcánicos, minerales de feldespato y ferromagnesianos producto del vulcanismo del ante-arco, cuya erosión y sedimentación se dio hasta las zonas costeras de estuarios y deltas de la Fm. Punta Judas (Fig. 86). Entre las areniscas también hay presencia de lentes de brecha fina con alto contenido epiclásticos re TRABAJADOS de variado color (volcánicos, sedimentarios y sílice) y detrito bioclástico de moluscos (Fig. 87). En sitios como el PC349 se observan areniscas líticas re TRABAJADAS de grano medio, color gris verdoso, no calcárea, con fragmentos y concentraciones de moluscos (Fig. 89). Se observan además thalassinoides y lentes de guijarros ocasionales (Fig. 88).

El contacto inferior no se observa en el campo, pero se presume sobreyace discordante el Complejo de Nicoya en este sector. El espesor puede aproximarse en 70 m según las áreas donde aflora. La edad es del

Mioceno Medio según Seyfried, Sprechman y Aguilar (1985) los cuales sugieren un ambiente de estuario y manglar. Esta interpretación concuerda con la macrofauna y características litológicas encontradas en los sitios estudiados.



Figura 86. A) Exposición de la Fm. Punta Judas en la plataforma de abrasión de Punta Judas en estratos decimétricos en el punto PC001 (444400E / 1053121N); (B) Un acercamiento al tipo de roca constituido por una arenisca lítica de grano medio color gris; (C) Muestra el contenido bioclástico de algunos estratos lenticulares de la Fm. Punta Judas.

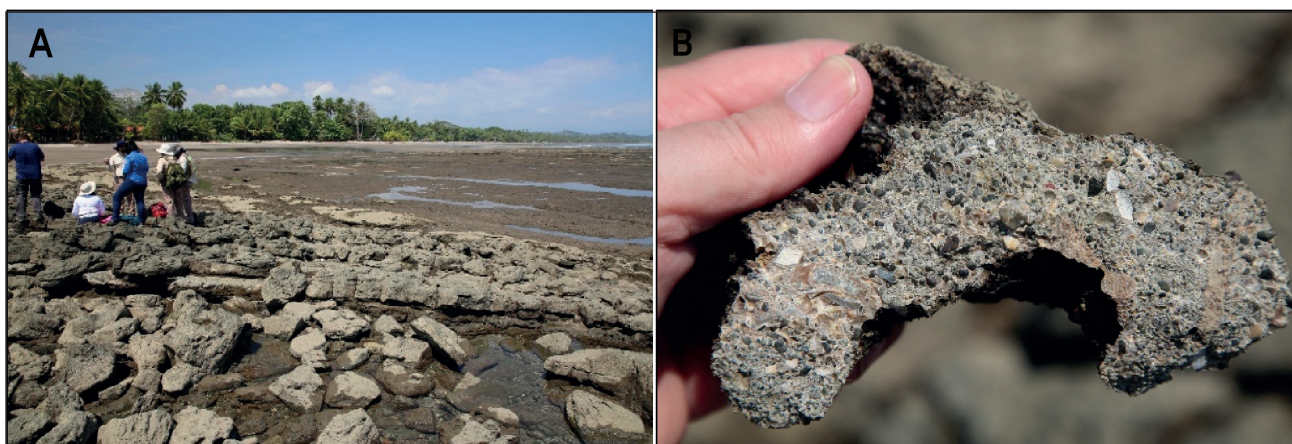


Figura 87. A) Exposición de la Fm. Punta Judas en la plataforma de abrasión de Punta Judas. Estratos decimétricos con dirección de buzamiento de 085° y buzamiento de 15° en el sitio PC001 (444400E / 1053121N); (B) Muestra la presencia de lentes de brechas finas volcanoclásticas contenidas dentro de las areniscas.



Figura 88. (A y B) Muestra la presencia de macrofauna de moluscos indicadores del ambiente de sedimentación de la Fm. Punta Judas. Sitio PC349 (445800E / 1055470N) en un afluente de la Quebrada Aserradero.



Figura 89. (A y B) Muestra la presencia de bioturbación (thalassinoides) como indicadores del ambiente de sedimentación de la Fm. Punta Judas. Sitio PC349 (445800E / 1055470N) en un afluente de la Quebrada Aserradero.

Petrográficamente se compone de una arenisca lítica de grano grueso hasta pequeños guijarros perfectamente ovalados de 0,2-5 mm de tamaño. Presenta una textura de soporte por clastos con cemento calcáreo intersticial (calcita) entre los clastos. Los clastos se componen principalmente de mineral arcilloso de grano muy fino de color café verdoso y silicita microcristalina, a veces con agregados radiales. Se encuentran también clastos de rocas basálticas fuertemente alteradas compuestas de plagioclasa, tremolita-actinolita, clorita y clinozoisita-epidota, a veces también calcita y clastos de roca volcánica con predominio de cristales columnares de plagioclasa. Menos comunes (hasta un 5%) son los clastos angulares individuales de plagioclasa, de tamaño pequeño (0,2-0,5 mm). Los clastos de cuarzo, ligeramente corroídos, son menos comunes. Abundan los fragmentos de conchas, principalmente moluscos, de hasta 5 mm de longitud. En conjunto la calcita del cemento y calcita constituye entre el 30% y el 40% de la roca. PC001 (Fig. 90).

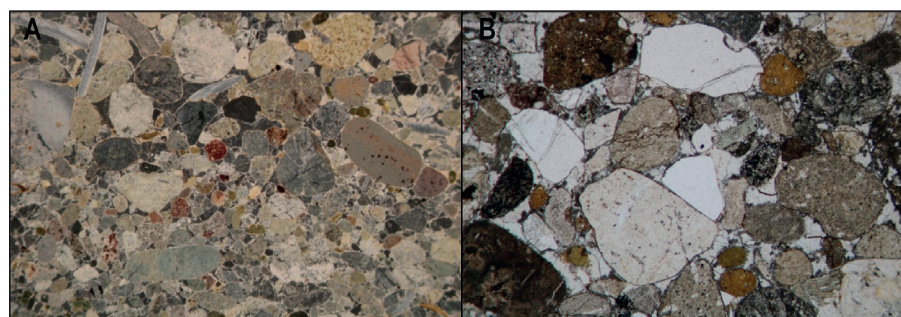


Figura 90. PC001: A) Textura de la muestra de arenisca lítica de la Fm. Punta Judas (método DF, ancho 10,5 mm), muestra los componentes líticos epiclásticos re TRABAJADOS. B) Textura de la misma arenisca (nicolas paralelos, ancho 2,2 mm) mostrando el soporte por clasto y cemento intersticial de calcita.

CUATERNARIO

*Pleistoceno***Depósitos de Abanico Aluvial (^aQ)**

Los paleo- abanicos se distribuyen en el área norte desde Boca Barranca hasta Tivives, en el sector central al norte de Nambí y en el sector sur desde el norte de Herradura hasta el norte de Playa Hermosa, cubriendo un área de 4,7 km².

Desde Herradura hasta Playa Hermosa, constituyen bloques con tamaños decimétricos hasta métricos de rocas sedimentarias (areniscas) y volcánicas, en una matriz de arenas y gravas en algunos sitios formando suelos residuales, y con espesores de hasta 3,5 m (puntos PC047 y PC130). Estos depósitos sobreyacen discordantemente el Complejo de Nicoya meteorizado en esta área.

Estos depósitos se ubican también en los altos topográficos a 2,5 km al norte de Esterillos, a lo largo del camino que conduce a San Julián (PC351). Se trata de depósitos de conglomerados de origen aluvial, constituidos por bloques y gravas con formas subredondeados a redondeados, con tamaños que varían de centímetros hasta decimétricos, mal seleccionados, polimícticos, con contactos puntuales, en una matriz arenosa color café meteorizada (Figs. 91). Los componentes del depósito varían desde rocas sedimentarias y volcánicas del Neógeno, con fuerte alteración hidrotermal, silicificación (Fig. 91).

En el afluente de la Quebrada Aserradero (PC346 y PC348), se observa sobreyaciendo la Fm. Punta Judas como relictos erosionados y con gran cantidad de bloques con fuerte alteración hidrotermal (Figs. 92 y 93). En los tres casos (PC346, PC348 y PC351), estos depósitos en esta área constituyen evidencias del vulcanismo de arco del Neógeno y los levantamientos tectónicos del Cuaternario.



Figura 91. A y B) Depósitos de paleo-abanico aluvial en el sitio PC351, constituido por bloques, gravas y arenas en una matriz areno limosa meteorizada, formando parcialmente un suelo residual. Las fotos C y D muestran los componentes de rocas volcánicas con fuerte alteración hidrotermal (silicificación).



Figura 92. A y B) Depósitos de paleo-abanico aluvial en el sitio PC348, sobreyaciendo la Fm. Punta Judas como relictos meteorizados. Afluyente de la Quebrada Aserradero.



Figura 93. C) Depósitos de paleo-abanico aluvial en el sitio PC346, sobreyaciendo a la Fm. Punta Judas como bloques de arrastre de la quebrada. A y B) Todos los componentes presentan alteración hidrotermal (silicificación). Afluyente de la Quebrada Aserradero.

Depósitos de paleoterraza fluvial, nivel 1 (fQ^a)

Estos fueron observados principalmente en las partes altas de la zona de estudio, localizado en varios cerros entre el río Cuarros al noreste de Tívides, y el Río Grande de Tárcoles, al noreste de Nambí. Su topografía es ondulada con pendientes moderadas.

Se presenta con espesores que varían entre 10 a 20 m y están constituidos por antiguos depósitos aluviales y fluviales con clastos muy redondeados de hasta 20 cm de diámetro de composición ígnea y sedimentaria (polimíctica), así como gravas y arenas, en una matriz areno limosa a arcillosa poco endurecida de color café,

con una proporción aproximada de clastos – matriz de 35% /65%, respectivamente (Fig. 94).

En general, la sedimentación proveniente de la erosión de los depósitos de la Formación Tivives, constituida a su vez por depósitos de lahares.

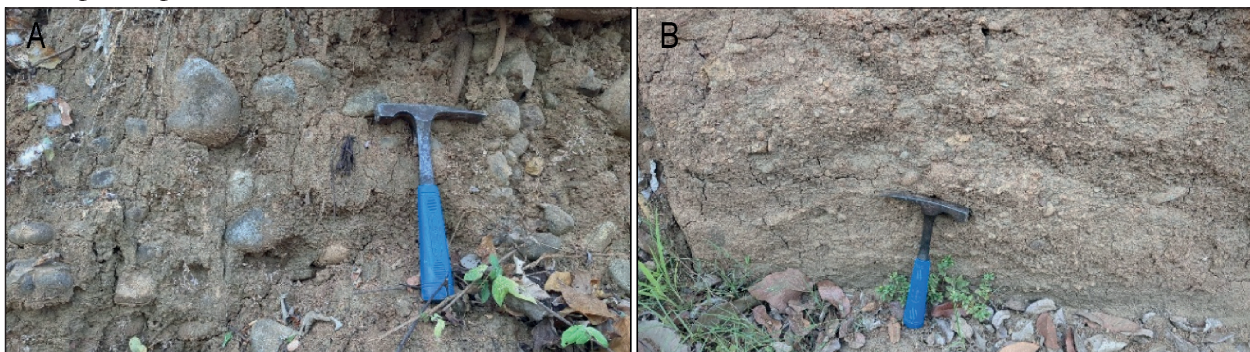


Figura 94. A) Paleoterraza en afloramiento PC175 con bloques de hasta 15 cm de diámetro, grava, en matriz arenosa; B) Paleoterraza en afloramiento PC180 presenta clastos redondeados en matriz arenosa.

Depósitos de paleoterraza fluvial, nivel 2 (fQ^b)

Estos depósitos están distribuidos a lo largo de toda la zona de estudio, desde Boca Barranca hasta Punta Judas. Abarca las zonas bajas de depósitos de ríos y se ubican por ejemplo en Río Barranca, ambas márgenes del Río Grande de Tárcoles, cerca de la desembocadura del Río Tarcólitos, ambas márgenes del Río Agujas y tributarios, algunos sectores de Herradura, Quebrada Amarilla, y alrededores del río Tusubres. Esta unidad posee en general espesores menores a los 10 m.

Sus depósitos están constituidos por material aluvial dispuesto en terrazas con topografía muy plana en las zonas bajas, principalmente entre las zonas de piedemonte y hacia las llanuras. Están compuestas por clastos redondeados con bloques menores a 10 cm, intercalación de capas de arenas medias a finas limosas con capas centimétricas de grava fina, además desarrollo de suelos menores a 1 m de espesor (Fig. 95).



Figura 95. Paleoterrazas aluviales: A) afloramiento PC066. Se observan sedimentos aluviales con gravas, arenas y suelos menores a 1m; B) Paleoterraza en afloramiento, donde se observa intercalación de capas de arenas medias a finas limosas.

Pleistoceno - Holoceno

Depósitos de coluvios (dQ)

Los depósitos coluviales están distribuidos a lo largo del área de estudio principalmente en las zonas de

Guía Metodológica

laderas de piedemonte, como en los sectores de Mata de Limón, Jesús María, alrededores de Agujas y varios sectores entre Herradura y Jacó.

Son acumulaciones sedimentarias de materiales no consolidados, como resultado de la acción de procesos gravitacionales que arrastran materiales sueltos desde las partes altas, creando depósitos heterogéneos en las zonas bajas. No presentan estratificación, ya que son por lo general depósitos caóticos, y se componen de fragmentos angulosos a subangulosos de roca de composición de acuerdo a la litología en la que estén circunscritos, ya sea en laderas de basaltos del Complejo de Nicoya o areniscas de la Formación Punta Carballo. Además, pueden presentar suelos residuales y materia orgánica. Por ejemplo, en el sector de Mata de Limón, cerca de Caldera, se observó un coluvio compuesto por grandes bloques de la Formación Mata de Limón y cerca de Boca de Barranca, a unos 1,2 km al oeste de la localidad de Artieda se observaron bloques coluviales de ignimbritas (Fig. 96).



Figura 96. Gran bloque coluvial de la Formación Mata de Limón en afloramiento del punto PC197.

Holoceno

Depósitos fluviales (fQ)

Los depósitos fluviales se ubican en toda el área de estudio rellenando las zonas bajas como los valles de ríos tal como los ríos Barranca, Jesús María, Río Grande de Tárcoles, Tusubres y llanuras de Herradura, Jacó y Hermosa, entre otros.

Pueden variar en espesor visible entre los 2 a los 10 m y constituyen depósitos no consolidados de lodos, limos, arenas, gravas y bloques de hasta 30 cm de diámetro (Figs. 97 y 98)

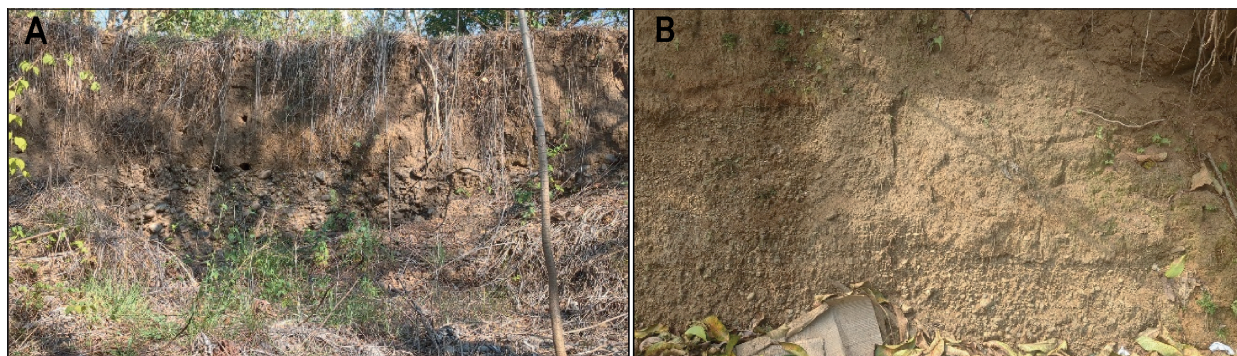


Figura 97. Depósitos fluviales. A) Río Barranca, 1km Noreste de Cabezas (PC199): Aluviones del río desde gravas hasta clastos de 30cm. B) Quebrada Caña Blancal (PC065): sedimentos de grava fina hasta media (1,5m espesor) y suelo sobreyacente de arena fina (2m) con algunos clastos de 2-3cm.

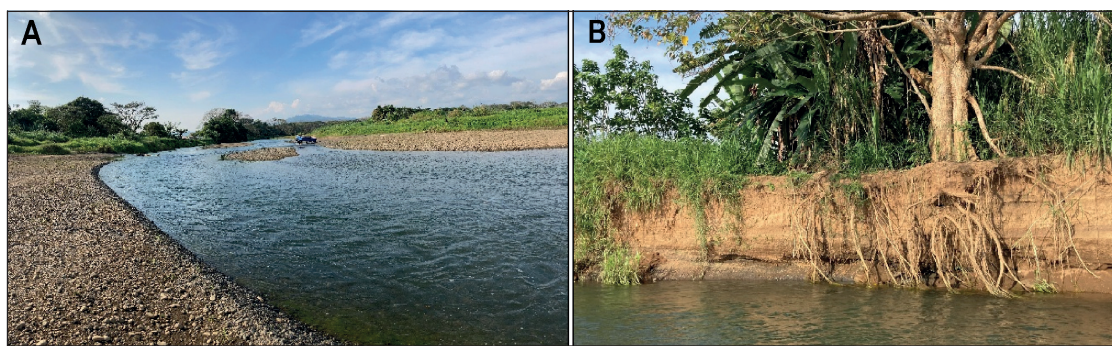


Figura 98. Depósitos fluviales en río Tulín en punto. A) Margen derecha río Tulín: Gravas y arenas, matriz de hasta 7cm. B) Margen izquierda se observan limos y arenas estratificados con suelos aluviales (3m arenas y limos; 0.5m grava).

Depósitos de Manglar (fmQ)

Se distribuyen a lo largo de la franja costera desde Caldera hasta la desembocadura del río Tárcoles en el sector norte y desde Herradura hasta playa Hermosa en el sector sur, cubriendo un área de 25,8 km² principalmente en el sector norte. Están constituidos por suelos arenosos, arenas, limos y lodos con materia orgánica que forman por lo general topografía plana y colinas de poca elevación. En algunos sitios se mantienen inundados la mayor parte del año y en otros son estacionales (Fig. 100).

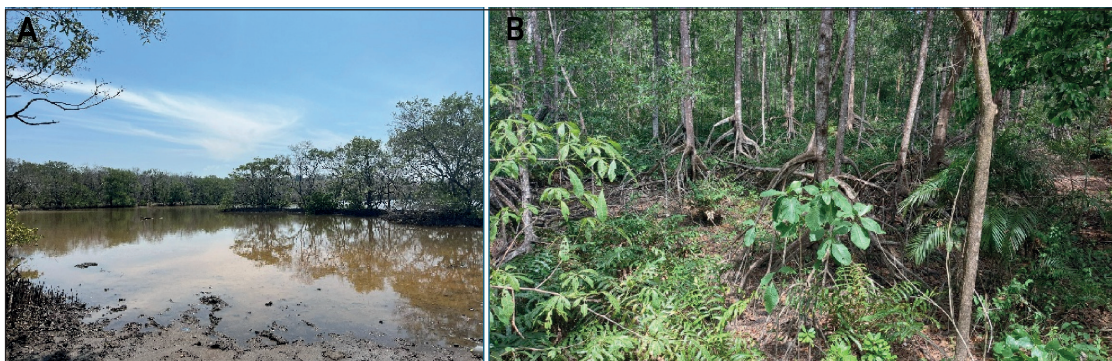


Figura 99. A) Depósitos de manglar en los sitios PC231 (425470E/1088903N) y B) PC169 429643E/1085106N).

Depósitos Litorales (plQ)

Constituyen sedimentos litorales inconsolidados de playas, barras y cordones litorales constituidos por gravas, guijarros, arenas, limos y arcillas. Los sedimentos de playa constituyen generalmente arenas finas hasta gruesas y bioclastos re TRABAJADOS por el oleaje y las corrientes de marea. Algunos sitios incluyen minerales pesados como magnetitas en proporciones variables. Cubren un área de 5,4 km² distribuidos a lo largo de toda la franja costera.

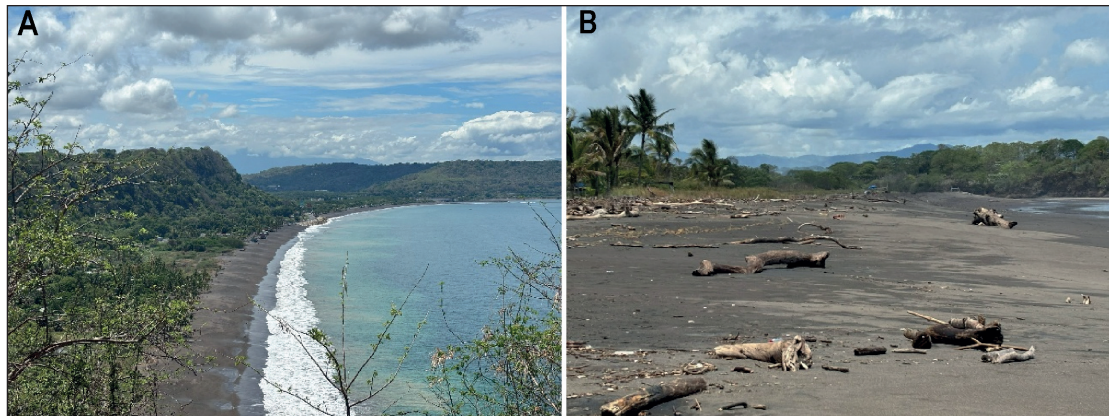


Figura 100. Depósitos de playa PC329: A) vista hacia el oeste de playa Caldera y B) playa Tivives.

Depósitos antropogénicos (^aQ)

Se ubican principalmente a lo largo de la costa en estudio, entre Caldera y Tivives, y entre Punta Leona y Playa Hermosa.

Consisten en depósitos de materiales de génesis no geológica e introducidos por la acción humana durante su intervención en diversas áreas costeras, como por ejemplo zonas residenciales a lo largo de la costa y muy cercanas a las playas, puertos marítimos y marinas. Tales depósitos están constituidos por materiales de relleno heterogéneos, asfalto, lastre y concreto.

Se puede mencionar estos tipos de depósitos antropogénicos en lugares como Puerto Caldera, un puerto compuesto por extensos rellenos artificiales y que ha provocado una modificación del perfil costero; la Marina Los Sueños en Playa Herradura con rellenos heterogéneos; zonas de protección costera como el enrocado en Playa Caldera, así como otros depósitos de rellenos para residenciales como en Playa Tivives, Playa Jacó, entre otras (Fig. 101).



Figura 101. Puerto de Caldera, punto PC258: A) Estructura de concreto y enrocado del rompeolas del puerto de Caldera. B) Parte del puerto donde anclan los barcos. C) Playa Herradura, punto PC314, se observan hoteles alrededor de la desembocadura de la Quebrada Cañablanca en el sector de la playa Herradura.

5. LISTA DE REFERENCIAS

- Abuodha, P. A., & Woodroffe, C. D. (2007). Vulnerability assessment of coastal areas in Australia to sea-level rise.
- Aguilar, T. (2013). Geología de Zonas Costeras [Diapositivas de Power Point]. Consultoría Hidráulica y Ambiental.
- Alfaro, A & Barrantes J. (2002). Borrador de informe geológico en línea de túnel, P.H. Brujo1. [Informe Interno, p.42]. Instituto Costarricense de Electricidad.
- Amann, H. (1993). Randmarine und terrestrische Ablagerungsräume des neogenen Inselbogensystems in Costa Rica. *Profil*, 4, 1–161.
- Arias, O. (2000). Geología y petrología magmática del Bloque Herradura (Cretácico Superior – Eoceno, Costa Rica). [Tesis doctoral, Universidad de Lausanne].
- Arias, O. (2003). Redefinición de la formación Tulín (Maastrichtiano-Eoceno Inferior) del Pacífico Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28: 47-68.
- Barboza, G., Barrientos, J., & Astorga, A. (2011). Tectonic evolution and sequence stratigraphy of the Central Pacific margin of Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 18:43-63.
- Barrantes, M. (1991). Comentarios petrográficos de algunas rocas aflorantes en la Región Central de Costa Rica. *Revista Geológica De América Central*, (12).
- Baumgartner, P, Mora, C., Butterlin, J., Sigal, J., Glacon, G., Azéma, J. y Bourgois, J., (1984). Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (1), 57 – 136.
- Baxter, S. (1975). Geología de una parte de las hojas Esparta y Tivives (Informe de campaña geológica, 22 pp.). Universidad de Costa Rica.
- Bergoeing, J. P. & Brenes Q., L. G. (2017). Atlas geomorfológico de Costa Rica (Escala 1:100 000). BIOMARCC-SINAC-GIZ. (2013). Análisis de vulnerabilidad de las zonas oceánicas y marico-costeras de Costa Rica frente al CC [Informe técnico, p.103]. San José, Costa Rica.
- Brenes, L. G. (2005). Dinámica costera y ordenamiento territorial. *Revista de Ciencias Ambientales*, 30(1), 16-20.
- Calvo, C. y Bolz, A., (1991). La Formación Espíritu Santo (Costa Rica): Sistemas de plataforma carbonatada autóctona del Paleoceno Superior-Eoceno Inferior. *Revista Geológica de América Central*, (13), 91-95
- Cajiao, M. V. (2005). Legislación marino-costera en Costa Rica: recuento, limitaciones y fortalezas. *Revista De Ciencias Ambientales*, 30(1), 21-29.
- Cárdenes, G., & Guillermo Obando, L. (2005). Índice de erosión-sedimentación costera (ie-sc): Una aplicación en la costa del Pacífico Central de Costa Rica. *Revista geológica De América Central*, 32.
- Cervantes, J. F. (1985). Estudio geológico de la zona de Tárcoles y alrededores (Informe de campaña geológica, 57 pp.). Universidad de Costa Rica.
- Corrales, Ch. (2017). Estudio hidrogeológico para el cálculo de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en las cuencas de las playas Mantas y Agujas, Pacífico Central, Costa Rica. [Tesis licenciatura, Universidad de Costa Rica].

- De Boer, J., (1979). The outer arc of the Costa Rican orogen (oceanic basement complexes of the Nicoya and Santa Elena Penínsulas). - *Tectonophysics*, 56, 221-259.
- Denis Valle, R. A., Cabrera Castellanos, M., Núñez Labañino, A., Triff Oquendo, J., & Peñalver Hernández, L. (2019). Caracterización geólogo-geomorfológica de la zona costera cubana y vulnerabilidad ante el ascenso del nivel del mar. *Geoinformativa*, 12(1), 15-30.
- Denis Valle, R. A., Triff Oquendo, J., Núñez Labañino, A., Ross Cabrera, H., Milá Doma, Y., Garriga Francés, N., Rodríguez Fernández, R., Peñalver Hernández, L., Martín Izquierdo, D., Rodríguez Barrera, R., Chávez Hernández, J.A. & Núñez Cambra, K., (2023). Estimación y Cartografía, a escala 1:50 000, del índice de Vulnerabilidad ante el ascenso del nivel medio del mar de la Zona costera suroccidental de la isla de Cuba. IX Simposio de Riesgos Geológicos, Procesos costeros y Sismicidad. La Habana-Cuba.
- Dengo, G., (1962a). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. In: *Petrologic studies*. Volume in honor of A.F Buddington, Geological Society of America, 133-161.
- Dengo, G., (1962b). Estudio Geológico de la Región de Guanacaste (112 pp), Instituto Geográfico Nacional.
- Dengo, G. (1960). Notas sobre geología de la parte central del litoral pacífico de Costa Rica.
- Denyer, P. & Arias, O. (1991). Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. *Revista Geológica De América Central*, 12.
- Denyer, P; Aguilar, T. & Alvarado, G. E. (2003). Geología y estratigrafía de la hoja Barranca, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 29, 105-125. San José, Costa Rica.
- Denyer, P. & Alvarado, G. (2007). Mapa geológico de Costa Rica escala 1:750 000.
- Doukakis, E. (2005). Coastal Vulnerability and Risk Parameters. *European Water*, 11, 3–7.
- Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Buendía, M., Rios, A., Simó, R. & Valladares, F. (2006). Cambio Global. Impacto de la Actividad Humana sobre el Sistema Tierra.
- Fernández, J. M., Bértola., G. R., & Campo, A. M. (2017). Aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) a los barrios costeros del partido de Mar Chiquita, Buenos Aires, Argentina. *Geoacta*, 42(1), 13-23.
- Fischer, R. (1981). El desarrollo paleogeográfico del Mioceno de Costa Rica. En *Anais II Congresso Latino-Americano Paleontologia* (pp. 565–579). Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Marburg.
- Fischer, R. & Aguilar, T. (1995). La sociación bentónica del bivalvo miocénico *Nuculana fundationis*: índice de condiciones desaeróbicas en sedimentos clástico finos. *Revista Geología de América Central*, 18, 65-76.
- Frisch, W., Meschede, M., & Sick, M. (1992). Origin of the Central American ophiolites: Evidence from paleomagnetic results. *Geological Society of America Bulletin*, 104(10), 1301-1314.
- García-Echavarría, L. M., Alcántara-Carrió, J., & Jaramillo Vélez, A. (2022). Vulnerabilidad costera ante el ascenso del nivel del mar en el suroccidente del Caribe colombiano. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 51(2), 9–28.
- Global Tide - FES. (n.d.). Finite Element Solution (FES) global tide model. AVISO+.
- González G., F. E., & Laguna, D. (2024). Análisis de la estimación del índice de vulnerabilidad costera de Panamá Oeste mediante sistemas de información geográfica. *Synergía*, 2(2), 113–126.

- Gornitz, V. M. (1990). Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 9, 201-237.
- Gornitz V. M. & White T. W., (1992). A coastal hazards database for the U.S. East coast. ORNL/CDIAC-45, NDP-043 A. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S. August 1992.
- Gornitz, V. M., & Kanciruk, P. (1989). Assessment of global coastal hazards from sea level rise. *Proceedings of the Sixth Symposium on Coastal and Ocean Management*, Charleston, South Carolina.
- 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.
- Gornitz, V.M., Beaty, T.W. & Daniels, R.C. (1997). A Coastal Hazards Data Base for the U.S. Wet Coast. (p.78). Oak Ridge National Laboratory.
- Gursky, H-J., Gursky, M., Schmidt-Effing, R. & Wildberg, H. (1984). Karten zur Geologie von Nordwest-Costa Rica (Mittleamerika) mit Erläuterungen. *Geologica et Paläeon-tologica*, 18, 173-182.
- Gursky, H. J., & Schmidt-Effing, R. (1983). Sedimentology of radiolarites within the Nicoya ophiolite complex, Costa Rica, Central America. In *Developments in Sedimentology* (Vol. 36, pp. 127-142). Elsevier.
- Gursky, H. J., & Schmidt-Effing, R. (1982). Sedimentology of radiolarites within the Nicoya Ophiolite Complex, Costa Rica, Central America. En Ijima, A., Hein, J. R., & Siever, R. (Eds.), *Siliceous deposits in the Pacific region* (Developments in Sedimentology, Vol. 36, pp. 127–142). Elsevier.
- Hammar-Klose, E. S. & Thieler, E. R. (2001). Coastal vulnerability to sea-level rise: A preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts. U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68.
- Haas, O. (1942). Miocene molluscs from Costa Rica. *Journal of Paleontology*, 16(3), 302–316.
- Hauff, S.F. (1998). Age and geochemical con-tributions on the origin of oceanic base-ment complex in Costa Rica and Carib-bean large igneous province. [Tesis doctoral, Christian-Albrechts-Universitat. Kiel].
- Hauff, S.F., Hoernle, K., Bogaard, P., Alvarado, G. & Garbe-Schön-Berg. (2000). Age and geochemistry of basaltic complex in western Costa Rica: Contributions to the geotectonic evolution of Central America - *Geochem. Geophys. Geosyst.*
- Henningsen, D. & Weyl, R. (1967). Ozeanische kruste im Nicoya-Komplex von Costa Rica (Mittelamerika). *Geologischen Rundschau*, 57, 33-47.
- Hudleston, W. H. (1882). Report on some rock specimens collected by Mr. George Attwood in Costa Rica. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 38(1–4), 336–340. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1882.038.01-04.36>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Resumen técnico del Sexto Informe - AR6*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6)*. IPCC.
- Jeffrey, S. M., Idleman, B. D., Gardner, T. W., & Fisher, D. M. (2003). Landscape evolution within a retreating volcanic arc, Costa Rica, Central America. *Geology*, 31, 419–432.
- Klein, R. J. T., & Nicholls, R. J. (1999). Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio*, 28(2), 182-187.
- Kokot, R. R. (2004). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(3), 477-487.
- Kuijpers, E.P. (1979). La Geología del Complejo Ofolítico de Nicoya, Costa Rica. *Informes Semanales del Instituto Geográfico Nacional*, 1979(2), 15-75.
- Kuijpers, E.P. (1980). The geologic history of the Nicoya Ophiolite Complex, Costa Rica and its geotectonic significance. *Tectonophysics*, 68, 233-255.
- Laurito, C. (1988). Análisis sedimentológico de las formaciones El Fraile, en la costa Suroeste de Nicaragua, Carmen y Punta Carballo, en la Costa Pacífica de Costa Rica, 123-123.
- Laurito, C. (1988a). Análisis sedimentológico de las formaciones El Fraile, en la costa suroeste de Nicaragua, Carmen y Punta Carballo, en la costa pacífica de Costa Rica [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Laurito, C. (1988b). Sinopsis de la estratigrafía de la cuenca Barranca-Herradura y el promontorio de Herradura. *Brenesia*, 29, 21–32.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 140, 1–55.
- Lizano, O.G. (1997). Las Mareas Extraordinarias de 1997 en la Costa del Pacífico de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 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(1), 51-64.
- Lizano R, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 14(27).
- Lizano, O.G. & Salas, S. (2001). Variaciones geomorfológicas en los últimos 50 años de la Isla Damas, Quepos, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(2), 171-177.
- Lloyd, J.J. (1963). Tectonic History of the South Central-American Origen. *American Association Petroleum Geology Memory* 2, 88-100.

Guía Metodológica

- Lyard, F.H, Allain, D.J, Cancet, M, Carrere, L. & Picot, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science*, 17, 615–649.
- Madrigal, R. (1970). Geología del mapa básico “Barranca”, Costa Rica. Informe. Técnicos. y Notas Geológicas, Dirección de Geología, Minas y Petróleo 9(37):1-59.
- Malavassi, E. (1967). Informe geológico de la hoja Candelaria. Informes Ministerio Economía, Industria y Comercio, 1–16.
- McDonald, D. (1920–1921). Informe final geológico y geográfico de Costa Rica. *Revista de Costa Rica*, 2, 28–32, 50–57, 106–111, 139–148.
- Martí, M. (2011). Vulnerabilidad física de la costa catalana a diferentes agentes. (Tesis de especialidad). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Marshall, J. S., Idleman, B. D., Gardner, T. W., & Fisher, D. M. (2003). Landscape evolution within a retreating volcanic arc, Costa Rica, Central America. *Geology*, 31(5), 419–432.
- Méndez, M., Ceacero, C.J., Ordoñez, P., Álvarez, J., Peláez, S., Robles, A., Ojeda, J., Francoso, J.I., Cajaraville, D., Fraile-Jurado, P., Vallejo, I. & Márquez, J. (2011). Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociada al cambio climático.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2019). Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. Gobierno de Costa Rica.
- Moore, L. J., & Griggs, G. B. (2002). Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181(1-3), 265-283.
- Ojeda, J., J. I. Álvarez, D. Martín y P. Fraile. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus*, 9, 83-100
- Organización Meteorológica Mundial. (2023). Estado del clima mundial 2023. OMM.
- Pendleton, E.A., Theiler, E.R., & Williams, S.J. (2004). Coastal vulnerability assessment of Cape Hatteras National Seashore (CAHA) to sea-level rise, U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1064
- Pendleton, E.A., Theiler, E.R., & Williams, S.J. (2005). Coastal vulnerability assessment of Golden Gate National Recreation Area to sea-level rise, U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1058
- Pérez, W. (2000). Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Calle Central de Costa Rica [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Pichler, H. & Weyl, R. (1973). Petrochemical aspects of Central American. *Geologische Rundschau*, 62(2), 357-396.
- Ramos Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama Campillo, L.M., Pech Pool, D., & Ortiz Pérez, M.A. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581-598
- Rangel-Buitrago, N. G. & Posada-Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. Colombia: Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad

- de Cádiz; Programa de Geociencias Marinas; Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR).
- Ramsay, J.G. (1973). Development of chevron folds. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 1741–1754.
- Robert, J.R. (1944). Manganese deposits in Costa Rica. *Bulletin of the U.S. Geological Magazine Survey*, 935 (H), 387-414.
- Romanes, J. (1912a). Geological notes on the Peninsula of Nicoya. *Geological Magazine*, 9, 258-265.
- Romanes, J. (1912b). Geology of a part of Costa Rica. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 68, 103-139.
- Sapper, K. (1905). Ueber Gebirgsbau und boden des südlichen Mittelamerika. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 32, 1-82.
- Sapper, K. (1937). Mittleamerika. Steinman und Wilckens.
- Sáenz, R., Acuña, J., Castro, J. F., Gómez, M. A., López, A., Mederos, B., Monge, A., & Vargas, J. E. (1982). Mapa geológico de Costa Rica [Mapa, escala 1:200 000]. Ministerio de Industria, Energía y Minas; Instituto Geográfico Nacional. San José, Costa Rica.
- Schmidt-Effing, R. (1979). Alter und Genese des Nicoya -Komplexes, einer ozeanischen Paläokruste (Oberjura bis Eozän) südlichen Zentralamerika. *Geologische Rundschau*, 68 (2), 457-494.
- Schmidt-Effing, R. (1980a). Rasgos fundamentales en la historia del Complejo de Nicoya (América Central Meridional). *Brenesia*, 18, 231–252.
- Schmidt-Effing, R., Gursky, H.-J., Strebin, M. & Wilderg, H. (1980). The ophiolites of southern Central America with special reference to the Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Transactions of the 9th Caribbean Geological Conference*.
- Sears, J.D. (1919). Deposits of manganese ore in Costa Rica and Panama. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 710-C, 61-91.
- Seyfried, H., Astorga, A., Amann, H., Calvo, C., Kolb, W., Schmidt, H. y Winsemann, J. (1991). Anatomy of an evolving island arc: tectonic and eustatic control in the south Central American fore-arc area. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 12, 217-240
- Seyfried, H., Sprechmann, P., y Aguilar, T. (1985). Sedimentología y paleoecología de un estuario del litoral Pacífico del Istmo Centroamericano Primordial (Mioceno Medio, Costa Rica). *Revista geológica De América Central*, 3.
- Sick, M. (1989). Paleomagnetism of the Ophiolite Complex from the Southern Middle American Landbridge (Costa Rica and Western Panamá) (*Geowissenschaftliche Abhandlungen*, 4, pp. 1–108).
- Shaw, J., R.B. Taylor, D.L. Forbes, M.H. Ruz y S. Solomon. (1998). Sensitivity of the Canadian coast to sea-level rise. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 505.
- SOLTIG-Proyectiva-AECID, Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2024). Escenarios del nivel del mar y erosión costera, en el Pacífico y Caribe de Costa Rica: Guía metodológica.
- Soto, G. J. (1985). Estudio geológico entre La Pita y río Camaronal, provincias de Puntarenas y San José [Informe de campaña, Universidad de Costa Rica].

Guía Metodológica

- Sprechmann, P., Astorga, A., Fernández, A., & Calvo, C. (1994). Cuadro sinóptico de correlación estratigráfica de las cuencas sedimentarias de Costa Rica. *Profil*, 7, 427–431.
- Talavera Déniz, E.I. (2011). Análisis y determinación de vulnerabilidad costera mediante CVI de la mitad sur de la Isla de Gran Canaria. [Tesis Maestría, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria].
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (1999). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: Preliminary results for the U.S. Atlantic Coast (U.S. Geological Survey Open-File Report 99-593).
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (2000). National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise, U.S. Pacific Coast (U.S. Geological Survey Open-File Report 00-178).
- Thierstein, H. R. (1979). Paleooceanographic implications of organic carbon and carbonate distribution in Mesozoic deep-sea sediments. En M. Talwani, W. Hay, & W. B. F. Ryan (Eds.), *Deep drilling results in the Atlantic Ocean: Continental margins and paleoenvironment* (pp. 249–275). American Geophysical Union.
- Tournon, J. & Alvarado, G.E. (1997). Mapa Geológico de Costa Rica, escala 1:500 000. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- United Nations Environment Programme. (2022). Emissions gap report 2022. UNEP.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. UNFCCC.
- Universidad de Costa Rica. (1997). Propuesta estratigráfica para la Formación Punta Carballo (Mioceno) y su relación con la cobertura volcánica (Plio-Pleistoceno), Pacífico Central, Costa Rica (Informe del curso Geología de Campo II, 32 pp.). Universidad de Costa Rica.
- Universidad de Costa Rica. (1998). Estratigrafía de las formaciones plio-pleistocénicas de la hoja Barranca, Puntarenas, Costa Rica (Informe del curso Geología de Campo II, 39 pp.). Universidad de Costa Rica.
- Webber, B.N. (1942). Manganese deposits in Costa Rica, Central America. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Technical Publication*. 144, 339-345.
- Weyl, R. (1965). *Erdgeschichte und Landschaftsbild in Mittelamerika*. Frankfurt.
- Weyl, R. (1969). Magmatische Förderphasen und Gesteinschemismus in Costa Rica (Mittelamerika). *Neues Jahrbuch für Geologie Paläontologie*, 7, 423-446.
- Wildberg, H. G. H., Gursky, H.-J., Schmidt-Effing, R., & Strebin, M. (1981). Der Ophiolithkomplex der Halbinsel Nicoya, Costa Rica, Zentralamerika. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 1, 195–209.
- Wildberg, H.G.H. (1984). Der Nicoya-Komplex, Costa Rica, Zentral Amerika: Magmatismus und Genese eines polygenetischen Ophiolith-Komplexes. *Münstersche Forschungen zur. Geologie Paläontologie* 62, 1-123.
- Widberg, H. G. H., Gursky, H.-J., Schmidt-Effing, R., & Strebin, M. (1981). Der Ophiolithkomplex der Halbinsel Nicoya, Costa Rica, Zentralamerika. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, (1), 195–209.
- Wilches-Chaux, G. (1989). Desastres, ecologismo y formación profesional. SENA.
- Woodroffe, C. D. (2007). Critical thresholds and the vulnerability of Australian tropical coastal ecosystems to the impacts of climate change. *Journal of Coastal Research*, 50(sp1), 464–468.

Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P. Čech, S., Hrazdára, P., Metelka, V., Ševčík, J. & Pécskay (2012). Geología y estratigrafía de la hoja 3246-II Miramar, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, san José Costa Rica, p. 7-54. (Sprechmann, 1984).

6.ANEXO

Puntos de documentación

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC001	444400	1053121
PC002	444479	1054438
PC003	445593	1053689
PC004	444904	1053500
PC005	444166	1053459
PC006	442942	1054748
PC007	440703	1053007
PC008	440258	1053904
PC009	440817	1053372
PC010	441026	1052740
PC011	442913	1055247
PC012	441445	1057977
PC013	441573	1058219
PC014	441956	1058958
PC015	439274	1056764
PC016	431835	1061169
PC017	431887	1061136
PC018	431971	1061511
PC019	431555	1062237
PC020	430714	1063254
PC021	430443	1063435
PC022	430279	1063551
PC023	430119	1063649
PC024	429425	1064089
PC025	429020	1063967
PC026	428864	1063982
PC027	428945	1066150
PC028	428723	1066470
PC029	429535	1065675
PC030	431350	1060704
PC031	432528	1059465
PC032	434541	1059363
PC033	435684	1061444
PC034	433869	1058634
PC035	437553	1056074
PC036	437281	1059655
PC037	438928	1057878
PC038	440105	1055691
PC039	435555	1060046
PC040	436143	1061008
PC041	428505	1070878
PC042	429772	1072201
PC043	425966	1071170
PC044	425857	1071508
PC045	429771	1072110
PC046	431312	1070634
PC047	430685	1071041
PC048	430834	1071149
PC049	430906	1071484
PC050	426516	1067359
PC051	426769	1068464
PC052	426900	1068609
PC053	425602	1067541

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC054	426315	1068502
PC055	426256	1068831
PC056	429411	1069008
PC057	429228	1069615
PC058	430116	1073354
PC059	427317	1073248
PC060	427547	1073581
PC061	428352	1075065
PC062	428555	1075373
PC063	428634	1075784
PC064	429971	1069953
PC065	430150	1069663
PC066	431843	1074773
PC067	432848	1074605
PC068	432715	1074031
PC069	431103	1074176
PC070	429486	1074173
PC071	428758	1074267
PC072	429923	1072638
PC073	427777	1073764
PC074	427636	1074114
PC075	427670	1073874
PC076	427557	1073670
PC077	428932	1076011
PC078	429069	1075931
PC079	429824	1076692
PC080	429310	1075997
PC081	435434	1063230
PC082	436044	1061715
PC083	437197	1061955
PC084	437149	1059722
PC085	437517	1060628
PC086	439310	1059124
PC087	441196	1060742
PC088	442029	1061286
PC089	442781	1061924
PC090	439243	1058441
PC091	442326	1055773
PC092	442351	1056878
PC093	419177	1101451
PC094	419377	1101141
PC095	418976	1101084
PC096	420161	1099943
PC097	419553	1099295
PC098	421793	1097142
PC099	422524	1097029
PC100	424093	1098212
PC101	423957	1098845
PC102	424500	1099381
PC103	424996	1096696
PC104	422318	1096621
PC105	423062	1098818
PC106	420324	1099453

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC107	421031	1099144
PC108	420772	1100900
PC109	425889	1096237
PC110	424051	1095799
PC111	423505	1095492
PC112	422628	1093944
PC113	421000	1093825
PC114	420224	1094350
PC115	422316	1093155
PC116	421964	1093021
PC117	421649	1092665
PC118	423500	1091042
PC119	426262	1068220
PC120	425815	1067766
PC121	426440	1068271
PC122	430412	1065363
PC123	431075	1066131
PC124	430987	1066258
PC125	430360	1068182
PC126	431060	1066730
PC127	431902	1067533
PC128	431860	1067800
PC129	432312	1068268
PC130	432144	1068227
PC131	430361	1065804
PC132	431442	1066758
PC133	433052	1066556
PC134	433784	1066796
PC135	434840	1068660
PC136	434851	1068732
PC137	431633	1065262
PC138	432054	1064692
PC139	433040	1064364
PC140	430741	1067284
PC141	429866	1067389
PC142	430172	1066916
PC143	430922	1070006
PC144	430681	1069964
PC145	429188	1070358
PC146	430227	1080963
PC147	430308	1081793
PC148	429994	1081617
PC149	431100	1080415
PC150	431215	1079010
PC151	432513	1078969
PC152	434371	1079314
PC153	432847	1080466
PC154	433366	1083981
PC155	434461	1085085
PC156	434562	1085560
PC157	432017	1082530
PC158	431831	1082281
PC159	432314	1083540

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC160	432233	1083731
PC161	430919	1081904
PC162	432321	1084137
PC163	432073	1084496
PC164	431268	1084408
PC165	432400	1084394
PC166	433381	1083909
PC167	433118	1085097
PC168	432754	1085095
PC169	429643	1085106
PC170	429636	1085016
PC171	430712	1086568
PC172	431585	1086965
PC173	432065	1087090
PC174	431535	1085964
PC175	432623	1086452
PC176	433573	1088294
PC177	432176	1087705
PC178	433426	1088097
PC179	432396	1088673
PC180	429975	1088644
PC189	429455	1088589
PC190	428917	1087602
PC191	424359	1099477
PC192	424358	1099478
PC193	424365	1100080
PC194	423955	1100878
PC195	422975	1101259
PC196	425913	1100166
PC197	422210	1098100
PC198	421162	1101574
PC199	421004	1102300
PC200	420852	1101991
PC201	429444	1076442
PC202	430351	1076953
PC203	430716	1077297
PC204	430890	1078178
PC205	430803	1077742
PC206	433000	1077365
PC207	431520	1075298
PC208	433106	1073932
PC209	432306	1074085
PC210	432380	1073697
PC212	431036	1076421
PC213	431030	1071304
PC214	431066	1071531
PC215	430423	1070178
PC216	430943	1070081
PC217	431306	1070162
PC218	426105	1096451
PC219	426288	1096629
PC220	426483	1097589
PC221	425920	1097646

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC222	425502	1099241
PC223	425893	1100201
PC224	424678	1101002
PC225	424579	1101093
PC226	424543	1100495
PC227	424298	1099848
PC228	424360	1100077
PC229	426160	1089920
PC230	425620	1089052
PC231	425470	1088903
PC232	425128	1088745
PC233	425645	1088148
PC234	426100	1087359
PC235	425950	1087442
PC236	430100	1082322
PC237	427957	1085180
PC238	426782	1087921
PC239	427519	1088750
PC240	428216	1089580
PC241	422760	1097844
PC242	423021	1093166
PC243	423987	1094427
PC244	426406	1095944
PC245	426040	1091300
PC246	425682	1091964
PC247	426424	1090826
PC248	423116	1090422
PC249	423459	1090497
PC250	423138	1090137
PC251	423743	1089852
PC252	420695	1095428
PC253	420194	1094720
PC254	420523	1093936
PC255	420375	1094665
PC256	420463	1094965
PC257	420605	1095314
PC258	420253	1096289
PC259	427350	1094346
PC260	426695	1094879
PC261	425589	1093647
PC262	425552	1094892
PC263	423966	1099456
PC264	423685	1099394
PC265	423547	1099318
PC266	424255	1099515
PC267	421758	1098187
PC268	420957	1098460
PC269	432299	1061263
PC270	432352	1060932
PC271	432624	1060754
PC272	432727	1060901
PC273	442659	1062066
PC274	444121	1061384

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC275	444164	1060791
PC276	434250	1058401
PC277	435963	1057153
PC278	435157	1057745
PC279	406869	1103381
PC280	407595	1103387
PC281	408581	1103614
PC282	409240	1103541
PC283	421377	1097846
PC284	423532	1090775
PC285	423309	1091105
PC286	423093	1091419
PC287	421958	1092476
PC288	421684	1092664
PC289	422880	1091720
PC292	406671	1103279
PC293	408872	1103119
PC294	410708	1103613
PC295	414526	1103627
PC296	416687	1103145
PC297	419351	1099932
PC298	420784	1098463
PC299	426869	1086506
PC300	428292	1084600
PC301	429060	1083634
PC302	426067	1072241
PC303	426674	1072758
PC304	426752	1072961
PC305	433475	1081410
PC306	433935	1080630
PC307	434415	1080837
PC308	434161	1080901
PC309	428450	1064688
PC310	428391	1064585
PC311	428182	1064585
PC312	428163	1065958
PC313	427624	1065351
PC314	427842	1067019
PC315	427545	1068007
PC316	427088	1068599
PC317	428951	1068690
PC318	428205	1066093
PC319	428146	1065903
PC321	437476	1060031
PC322	437553	1060678
PC323	437904	1060424
PC324	438011	1061715
PC325	439409	1059182
PC326	439370	1059663
PC327	419165	1101446
PC328	419017	1100991
PC329	419445	1099337
PC330	419919	1099143

Punto documentación	X_Este	Y_Norte
PC331	420478	1098738
PC332	421609	1097109
PC333	423099	1091429
PC334	430436	1074496
PC335	429649	1075398
PC336	429919	1075475
PC337	429973	1075584
PC338	430149	1075478
PC339	431094	1075282
PC340	427022	1070508
PC341	431021	1075327
PC342	431051	1075218
PC343	428770	1072325
PC344	428712	1072386
PC345	445900	1055245
PC346	445692	1055403
PC347	446088	1055271
PC348	445766	1055413
PC349	445800	1055470
PC350	447604	1057023
PC351	447420	1056220
PC352	445800	1055265