

Definición de la vulnerabilidad de los sistemas biogeofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación

DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Santa Marta DTHC - 2003

DIRECTIVOS INVEMAR

Capitán de Navío
FRANCISCO A. ARIAS ISAZA
Director General

JESÚS ANTONIO GARAY T
Subdirector de Investigación
Coordinador (E) Calidad Ambiental
Marina (CAM)

JUAN MANUEL DÍAZ M.
Coordinador Programa Biodiversidad y
Ecosistemas Marinos (BEM)

ROBERTO FEDERICO NEWMARK U.
Coordinador (E) Programa Valoración y
Aprovechamiento de Recursos
Marinos Vivos (VAR)

PAULA CRISTINA SIERRA C.
Coordinadora Programa de Investigación
para la Gestión Marina y Costera (GEZ)

INVEMAR
Cerro Punta de Betín,
Santa Marta - Colombia
Apartado Aéreo 1016
<http://www.invemar.org.co>
gez@invemar.org.co

ESSENTIAL DATA

Activity number: WW094507 // CO010401
Project name: Netherlands Climate Change Studies
Assistance Programme, Colombia: Defining
vulnerability of Bio-geophysical and social-economic
system due to sea level change in the Colombian
coastal zone (Pacific and Caribbean) and adaptation
measures.
Location: Colombia
Duration: 22 months
Contractor: Marine and Coastal Research Institute
(INVEMAR)
Ministry of the Environment (MMA)
Contractor Address: Cerro Punta Betín A.A. 1016
Santa Marta, Colombia, South America
Counterpart: The Institute for Environmental Studies of
the Free University of Amsterdam
Counterpart Address: De Boelelaan 1115, 1081 HV
Amsterdam, The Netherlands
Counterpart: The Royal Netherlands Embassy in Santa
fé de Bogotá
Counterpart Address: Carrera 13 No. 93-40
Santa fé de Bogotá, Colombia

DIRECCION CIENTÍFICA DEL PROYECTO

CN Francisco A. Arias Isaza
Director General INVEMAR

Paula Cristina Sierra Correa
Coordinadora Programa de Investigación
para la Gestión Marina y Costera-GEZ
INVEMAR

David A. Alonso Carvajal
Coordinador línea de Técnicas e Instrumentos de
Planificación -GEZ
INVEMAR

GRUPO DE INVESTIGACIÓN

Martha Patricia Vides
Bióloga Marina
INVEMAR

Luz Marelvis Londoño
Economista. Cand. MSc. Economía en Medio
Ambiente
INVEMAR

Martha Lilliana Fontalvo
Microbióloga. Esp. EIA
INVEMAR

Carmen Lilliana Lacambra
Bióloga MSc. Manejo de Zonas Costeras
INVEMAR

Iván Darío Correa
Geólogo PhD Geología
Universidad EAFIT

Sarah Hernández
Economista. Msc. Economía.
HUMBOLDT

TN Ricardo Molares
TN Erick Guayana Labrador
TN Luis Otero
Armada Nacional (CIOH, CCCP)

LABORATORIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Clara del Pilar Lozano
Ing. Catastral y Geodesta. Esp. Ing. de Software
INVEMAR

Armando González
Ing. de Sistemas. Esp. en SIG y Sensores Remotos
INVEMAR

Cesar Fernando García
Biólogo Marino
INVEMAR

CONSULTORES

Amparo Ramos Mora
Abogado. MSc. Gestión Ambiental de Zonas Costeras

Carlos Andrade
Oceanógrafo. PhD Oceanografía

Rafael Steer Ruiz
Oceanógrafo. MSc. Economía y Política Marina

ESTUDIANTE DE PRE-GRADO - TESISISTA :

Olga Lucia Monteleagre
Convenio UJTL-INVEMAR

ASESORES INTERNACIONALES:

Arjan van der Weck
Marcel Rozeijmeijer
DELFT HYDRAULICS

COORDINADOR DEL NCCSAP:

Kees Dorland
Vrije Universiteit Amsterdam -IVM

PUNTO FOCAL NCCSAP-COLOMBIA

Fabian Navarrete Le Bas
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

COORDINACIÓN ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA

Grupo de la Subdirección de Recursos y
Apoyo a la Investigación SRAI
INVEMAR

Tabla de contenido

TABLA DE CONTENIDO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
ABSTRACT	11
EXECUTIVE SUMMARY	13
ANTECEDENTES	17
1 BASES PARA ESPERAR UNA AUMENTO EN EL NIVEL DEL MAR	17
1.1 TENDENCIAS PASADAS DEL NIVEL DEL MAR	17
1.2 EFECTO INVERNADERO	17
2 LA RESPUESTA COLOMBIANA ANTE UN RÁPIDO ASCENSO EN EL NIVEL DEL MAR.....	21
2.1 HERRAMIENTAS DE RESPUESTA.....	22
2.2 GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	22
2.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	23
2.3 MARCO CONCEPTUAL DEL ESTUDIO	24
2.4 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	25
2.5 MARCO METODOLÓGICO	26
2.5.1 <i>Paso 1. Definición del área de estudio</i>	26
2.5.2 <i>Paso 2. Caracterización e inventario de las características del área de estudio</i>	26
2.5.3 <i>Paso. 3 Identificación de los factores de desarrollo de mayor relevancia y generación de escenarios</i>	27
2.5.4 <i>Paso 4. Evaluación de los cambios físicos y naturales resultantes</i>	28
2.5.5 <i>Paso 5. Formulación de las estrategias de respuesta, sus costos y beneficios</i>	28
2.5.6 <i>Paso 6. Evaluación del perfil de vulnerabilidad e interpretación de resultados</i>	28
2.5.7 <i>Paso 7. Identificación de los planes de acción</i>	29
PASO1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	31
3 GENERALIDADES SOBRE COLOMBIA	31
3.1 UBICACIÓN.....	31
3.2 DELIMITACIÓN TERRITORIAL ADMINISTRATIVA.	31
3.3 OROGRAFÍA.....	33
3.4 HIDROGRAFÍA	33
3.5 POBLACIÓN.	34
4 LA ZONA COSTERA COLOMBIANA	34
4.1 DEFINICIÓN	35
4.2 DELIMITACIÓN	35
4.3 ORDENAMIENTO AMBIENTAL TERRITORIAL.....	37
5 ÁREA DE ESTUDIO	41

5.1	UBICACIÓN.....	41
5.2	LONGITUD LITORAL.....	41
5.3	LÍMITES.....	41
5.3.1	<i>Limite terrestre</i>	41
5.3.2	<i>Limite marino</i>	42
6	ÁREAS CASO DE ESTUDIO.....	45
6.1	GOLFO DE MORROSQUILLO.....	45
6.1.1	<i>Localización</i>	46
6.2	UNIDAD DE MANEJO INTEGRADO GUAPI – ISCUANDÉ.....	46
6.2.1	<i>Localización y delimitación</i>	46
6.3	ÁREA URBANA DE SAN ANDRÉS DE TUMACO.....	48
6.3.1	<i>Localización</i>	48
	EVALUACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS.....	49
7	EL AUMENTO DE 1.5° C EN LA TEMPERATURA AMBIENTAL.....	49
7.1	METODOLOGÍA.....	49
7.2	ANÁLISIS DE LOS DATOS CLIMÁTICOS.....	50
7.3	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN.....	50
7.4	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL.....	54
7.4.1	<i>Modelos del clima futuro</i>	58
8	EL CAMBIO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR.....	61
8.1	TENDENCIAS LINEALES DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR EN COLOMBIA.....	62
8.2	METODOLOGÍA.....	64
8.3	ESTIMACIONES DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR EN EL CARIBE.....	65
8.3.1	<i>Nivel del Mar en Cartagena</i>	65
8.4	ESTIMACIONES DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR EN EL PACÍFICO.....	68
8.4.1	<i>Nivel del mar en Buenaventura</i>	69
8.4.2	<i>Nivel del Mar en Tumaco</i>	71
8.5	CONCLUSIONES Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS ADOPTADOS.....	75
	LÍMITES DE ÁREAS EN RIESGO.....	77
9	MODELO DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....	77
9.1	MODELOS DIGITALES DE TERRENO.....	77
9.2	ESTRUCTURA DE LOS DATOS EN MDE.....	78
10	LA CONSTRUCCIÓN DEL MDE.....	78
10.1	ÁREAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN.....	79
11	VALORES DE FRECUENCIA.....	80
11.1	CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN 1/10, 1/100, 1/1000.....	81
11.1.1	<i>Captura y estructuración de datos</i>	81
11.1.2	<i>Interpolación</i>	82
11.1.3	<i>Análisis de riesgo de inundación</i>	82
12	CONCLUSIONES.....	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXO.....	89

Lista de Figuras

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EFECTO INVERNADERO.	18
FIGURA 2. LA TEMPERATURA DE LA TIERRA SE OBSERVA AÑO A AÑO (BARRAS CLARAS) Y APROXIMADAMENTE DÉCADA A DÉCADA (BARRAS OSCURAS, UN FILTRO DE LAS CURVAS ANUALES FUE APLICADO PARA SUPRIMIR LAS FLUCTUACIONES INFERIORES A LA ESCALA DE TIEMPO POR DÉCADA MÁS CERCANA). EXISTEN CIERTAS DUDAS CON RESPECTO A LOS DATOS ANUALES (EL TOPE DE LAS BARRAS NEGRAS REPRESENTAN EL 95% DEL RANGO DE CONFIANZA) DEBIDO A LA COLECTA DE LOS DATOS, A LA DIFERENCIA DE ERRORES INSTRUMENTALES Y A LA INCERTIDUMBRE EN LA DESVIACIÓN DE LAS CORRECCIONES HECHAS SOBRE LA SUPERFICIE DEL MAR, ADEMÁS DE LAS URBANIZACIONES REALIZADAS EN TIERRA. EL MEJOR VALOR ESTIMADO, INDICA QUE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL PROMEDIO GLOBAL SE HA INCREMENTADO EN 0.6 ± 0.2 °C (MODIFICADO DE IPCC, 2001).	19
FIGURA 3. EL CAMBIO DE TEMPERATURA DE LOS ÚLTIMOS 10.000 AÑOS Y 1000 AÑOS BASADOS EN REGISTROS DE EUROPA (PRIMEROS DOS PANELES, ADAPTADOS POR EL IPCC, 1990) Y EL ESTIMADO GLOBAL (PANEL INFERIOR) TOMADO DE HANSEN Y LEBEDEFF, (1998). LA ESCALA DE TEMPERATURA DE LOS DOS PANELES SUPERIORES ES APROXIMADA Y ESCOGIDA PARA QUE ESTÉ DE ACUERDO CON EL REGISTRO DE LOS ÚLTIMOS CIENTO AÑOS QUE ES BASADO EN OBSERVACIONES DIRECTAS, ADAPTADO DE MAUL (1993).	20
FIGURA 4. ESQUEMA DEL MARCO CONCEPTUAL ADOPTADO PARA LLEVAR A CABO EL ESTUDIO.	24
FIGURA 5 ESTRUCTURA ORGÁNICA DEL PROYECTO. BEM: PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD; VAR: PROGRAMA VALORACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS; CAM: CALIDAD AMBIENTAL MARINA.	25
FIGURA 6. METODOLOGÍA COMÚN (MODIFICADA IPCC, 1992).....	26
FIGURA 8. DEPARTAMENTOS COSTEROS Y LÍMITES FRONTERIZOS MARINOS DE COLOMBIA (MODIFICADO DE IGAC, 2001© 2001 INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI).....	32
FIGURA 10. DELIMITACIÓN DE LA ZONA COSTERA. LMAM: LÍNEA DE MAREA ALTA PROMEDIO; LMBM: LÍNEA DE MAREA BAJA PROMEDIO.....	36
FIGURA 11 UBICACIÓN DE LA UNIDADES AMBIENTALES COSTERAS DEL CARIBE COLOMBIANO	39
FIGURA 12. UBICACIÓN DE LAS UNIDADES AMBIENTALES COSTERAS DE LA COSTA DEL PACÍFICO.....	40
FIGURA 13. LÍMITES TERRESTRE Y MARINO QUE ENMARCAN EL ÁREA DE ESTUDIO DEL PROYECTO DENTRO DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA	43
FIGURA 14. LÍMITES TERRESTRE Y MARINO QUE ENMARCAN EL ÁREA DE ESTUDIO DEL PROYECTO DENTRO DE LA COSTA DEL PACÍFICA COLOMBIANA.	44
FIGURA 15. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA CASO DE ESTUDIO. GOLFO DE MORROSQUILLO.....	45
FIGURA 16. UBICACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA CASO DE ESTUDIO GUAPI-ISCUANDÉ.....	47
FIGURA 21. MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA PRECIPITACIÓN EN SAN ANDRÉS ISLA CON BASE EN DATOS DEL IDEAM. LA TENDENCIA LINEAL DE LOS AÑOS 1959-1994 ES DE UN DECRECIMIENTO DE 74MM CADA 10 AÑOS, TENDENCIA OPUESTA A LAS ESTACIONES DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA. NÓTESE QUE LOS VALORES MEDIOS SON SIGNIFICATIVAMENTE MAS ALTOS QUE LOS QUE OCURREN EN LA COSTA NORTE DE COLOMBIA Y QUE LOS EVENTOS EXTREMOS SON MÁS NUMEROSOS. SIN EMBARGO DESDE FINALES DE LOS 70S Y PRINCIPIOS DE LOS 80S SE NOTA UNA DISMINUCIÓN DE LAS LLUVIAS SEGUIDA POR UNA ACTIVIDAD MÁXIMA CUANDO OCURRIERON INTENSAS ÉPOCAS DE LLUVIAS HASTA 1992. ESTE RÉGIMEN ES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTE AL COSTERO Y RESPONDE MAS A LA OCURRENCIA Y PASO DE LAS TORMENTAS TROPICALES EN LA TEMPORADA DE HURACANES Y A LOS FRENTE FRÍOS BOREALES QUE A LA POSICIÓN DE LA ZONA DE CONVERGENCIA TROPICAL.	52
FIGURA 22. MEDIAS MENSUALES MULTIANUALES DE PRECIPITACIÓN EN a)BARRANQUILLA, b) CARTAGENA, c) COROZAL Y d) SAN ANDRÉS. LOS VALORES HAN SIDO FILTRADOS POR UNA 'MEDIA CORRIDA' DE 21 PUNTOS CON EL OBJETO DE VISUALIZAR LA VARIACIÓN MULTIANUAL. LA TENDENCIA LINEAL (LÍNEA RECTA) Y EL AJUSTE POLINOMIAL (LÍNEA CURVA) MUESTRA MEJOR LA VARIACION DECADAL. LAS SERIES TIENEN UN PATRÓN COMÚN DE AUMENTO DE LA PRECIPITACIÓN CORRESPONDIENTE CON LOS AÑOS EN LOS QUE OCURRIÓ	

UN EVENTO FRÍO DEL FENÓMENO ENOS (LA NIÑA) Y LO OPUESTO EN LOS AÑOS DE LOS EVENTOS CALIENTES.	53
FIGURA 23. CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN PARA DIFERENTES PARTES DEL HEMISFERIO NORTE, DESDE DATOS DE TIERRA SOLAMENTE (WIGLEY Y SANTER, 1993). EN EL PANEL MEDIO SE ENCUENTRA LA ZONA QUE INCLUYE EL CARIBE COLOMBIANO. LA TENDENCIA MUESTRA UN DECRECIMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN DESDE LOS AÑOS 60S DE LA MANERA COMO SE COMPORTÓ LA PRECIPITACIÓN EN LAS ESTACIONES ESTUDIADAS, ESPECIALMENTE EN SAN ANDRÉS ISLA.	54
FIGURA 28. MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA TEMPERATURA AMBIENTE DE A) BARRANQUILLA, B) CARTAGENA, C) COROZAL Y D) SAN ANDRÉS CON BASE EN DATOS DEL IDEAM. LAS SERIES HAN SIDO FILTRADAS POR UN PROMEDIO DE 21 PUNTOS PARA OBSERVAR LA TENDENCIA INTERANUAL Y LA TENDENCIA DECADAL EN EL AJUSTE POLINOMIAL DE GRADO 10 Y EL LARGO PERIODO EN LA TENDENCIA LINEAL. COMO EN EL CASO DE LA PRECIPITACIÓN, LA TEMPERATURA AMBIENTE RESPONDE AL FENÓMENO ENOS SIENDO MÁS ELEVADAS DURANTE LOS EVENTOS “CÁLIDOS” INCLUSIVE EN SAN ANDRÉS ISLA AUNQUE LA SEÑAL ES MENOS VISIBLE.....	57
FIGURA 29. CAMBIOS EN LA TEMPERATURA PARA DIFERENTES PARTES DEL PLANETA, DESDE DATOS DE TIERRA Y MARINOS (WIGLEY Y SANTER, 1993). EN EL PANEL SUPERIOR SE ENCUENTRA LA ZONA QUE INCLUYE LOS MARES COLOMBIANOS. LA TENDENCIA MUESTRA UN DECRECIMIENTO DE LA TEMPERATURA DESDE LOS AÑOS 1960S Y SE INCREMENTO ALREDEDOR DE MEDIO GRADO DESDE LOS 1980S. LAS ESTACIONES COSTERAS DE COLOMBIA RESPONDIERON DE LA MISMA MANERA, CON UN DECRECIMIENTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE HASTA LOS AÑOS 70S Y UN LEVE ASCENSO EN ADELANTE.	58
FIGURA 30. CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL DEBIDO AL AUMENTO EFECTIVO POR DOBLAR LA CANTIDAD DE CO ₂ ATMOSFÉRICO DESDE LOS DIFERENTES MODELOS GLOBALES DEL CLIMA, A) DEL LABORATORIO DE DINÁMICA DE FLUIDOS GEOFÍSICOS (GFDL), B) INSTITUTO GODDARD PARA ESTUDIOS DEL ESPACIO (GISS), C) DEL CENTRO NACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA ATMÓSFERA (NCAR) Y D) DE LA UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE OREGON (OSU). LOS MAPAS SON TOMADOS DE WIGLEY Y SANTER (1993). LOS CUATRO MODELOS MUESTRAN RESULTADOS DIFERENTES PERO DE MANERA GENERAL EL CARIBE Y PACIFICO COLOMBIANOS SE ENCUENTRAN EN UNA ‘BOLSA’ CLIMÁTICA QUE LO HACE DIFERENTE AL RESTO DE LA REGIÓN.....	59
FIGURA 31. CAMBIOS EN LA TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL DEBIDO AL AUMENTO EFECTIVO POR DOBLAR LA CANTIDAD DE CO ₂ ATMOSFÉRICO DESDE LOS DIFERENTES MODELOS GLOBALES DEL CLIMA, A) DEL LABORATORIO DE DINÁMICA DE FLUIDOS GEOFÍSICOS (GFDL), B) INSTITUTO GODDARD PARA ESTUDIOS DEL ESPACIO (GISS), C) DEL CENTRO NACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA ATMÓSFERA (NCAR) Y D) DE LA UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE OREGON (OSU). LOS MAPAS SON TOMADOS DE WIGLEY Y SANTER (1993). LOS CUATRO MODELOS MUESTRAN QUE LA TEMPERATURA AMBIENTE SERÍA AUMENTADA ENTRE 2-3° C EN LAS COSTAS COLOMBIANAS.....	60
FIGURA 32 LOS ESCENARIOS A QUE SE REFIERE LA FIGURA CORRESPONDEN A LOS UTILIZADOS POR EL IPCC PARA EL ANÁLISIS DE LOS POSIBLES CAMBIOS CLIMÁTICOS, SUS EFECTOS, IMPACTOS Y OPINIONES PARA MITIGAR LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS. LA SIGLA IE-EE RESPONDE A LA ABREVIATURA DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS EN EL INFORME ESPECIAL SOBRE ESCENARIOS DE EMISIONES DEL GRUPO DE TRABAJO III DEL IPCC (SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS-SRES).....	61
FIGURA 33. MARCO GEOTECTÓNICO DE COLOMBIA. LA ZONA COSTERA COLOMBIANA PERTENECE A LA CORTEZA “TRANSICIONAL” QUE SEPARA LAS ÁREAS “CRATÓNICAS” DEL CONTINENTE DE LAS PLACAS OCEÁNICAS. LA COSTA CARIBE COLOMBIANA SE ENCUENTRA EN EL LÍMITE ENTRE LA PLACA CARIBE Y LA PLACA SURAMERICANA. LA COSTA PACÍFICA ES EL LÍMITE ENTRE ESTA ÚLTIMA Y LA PLACA DE NAZCA. LA CARACTERÍSTICA PREDOMINANTE DE LA TECTÓNICA DEL CONTACTO CON LA PLACA CARIBE EN COLOMBIA ES EL DIAPIRISMO DE LODO MIENTRAS QUE EL CONTACTO CON LA PLACA DE NAZCA PRODUCE VOLCANISMO DE CENIZAS PRINCIPALMENTE. (TOMADO DE GONZÁLEZ ET AL., 1988; MODIFICADO DE KELLOGG ET AL., 1983, LONSDALE ET AL., 1978 Y PENNINGTON, 1981).....	63
FIGURA 34. CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR BASADOS EN REGISTROS GEOLÓGICOS TOMADOS EN EL SUR DE LA FLORIDA POR WANLESS ET AL., 1988 Y DE JAMAICA POR DIGERFELDT Y HENDRY, 1987. EL AUMENTO RELATIVO DE 36CM EN 100 AÑOS QUE MUESTRA EL RECUADRO ESTÁ BASADO EN OBSERVACIONES DIRECTAS DE TODAS LAS ESTACIONES DE NIVEL DEL MAR DE LA RED DE OBSERVACIÓN RLR (PUGH ET AL., 1987). LOS PUNTOS MUESTRAN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA. EL RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA	

ASOCIADO AL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR OCURRE EN EVENTOS DERIVADOS DE TORMENTAS Y A MENUDO NO SON VISTOS INMEDIATAMENTE COMO EROSIÓN COSTERA O INUNDACIÓN DE COSTAS BAJAS. TOMADO DE (MAUL, 1993).	63
FIGURA 35. NIVEL DEL MAR EN CARTAGENA DURANTE 1982 A) EL 31 DE ENERO 1982 B) LA PRIMERA SEMANA DEL AÑO C) MES DE ENERO. LA OSCILACIÓN DE LA MAREA ES MIXTA SEMIDIURNA CON UNA MÁXIMA AMPLITUD DE 40CM EN LAS SICIGIAS D) MEDIA DIARIA DURANTE EL AÑO UNA VEZ FILTRADA LA MAREA.....	65
FIGURA 36 A) MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (1951-2000) EN CARTAGENA LA TENDENCIA LINEAL (EN AZUL) MUESTRA UN CONSTANTE ASCENSO DEL NRM, LA TENDENCIA POLINOMIAL (EN ROJO) MUESTRA UN PULSO DE ALREDEDOR DE 20 AÑOS B) EL REGISTRO ANTERIOR FILTRADO PARA OBSERVAR CAMBIOS ESTACIONALES, OBSÉRVESE LA PERIODICIDAD DE 6.5 AÑOS EN LAS ÚLTIMAS DOS DÉCADAS C) AMPLIACIÓN DEL REGISTRO EN LA DÉCADA DEL 80S, D) AMPLIACIÓN DEL REGISTRO EN LA DÉCADA DE LOS 90S. LA MENOR VARIABILIDAD DURANTE LOS AÑOS DE ENOS (1982-83 Y 1996-97) ES EVIDENTE. LOS NIVELES ALCANZADOS EN DICIEMBRE DEL 99 SON LOS MÁS ALTOS REGISTRADOS HASTA LA FECHA.	67
FIGURA 37 A) MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DEL NIVEL DEL MAR EN CRISTÓBAL (PANAMÁ) LA TENDENCIA LINEAL (EN AZUL) MUESTRA EL ASCENDENTE NIVEL MEDIO Y EL AJUSTE POLINOMIAL, LOS GRANDES MODOS DE VARIACIÓN CON UN PERIODO DE ALREDEDOR DE 30 AÑOS B) LA MISMA SEÑAL FILTRADA MUESTRA PULSOS DE 6.5 AÑOS SEMEJANTES A LOS ENCONTRADOS EN EL REGISTRO DE CARTAGENA LO QUE INDICA QUE EL FENÓMENO EXISTIÓ Y QUE EXISTE MODULACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN EL CARIBE POR EVENTOS DEL SISTEMA OCEÁNICO-ATMÓSFERA DE CARÁCTER INTERANUAL CON LOS MISMOS PERIODOS COMO EL FENÓMENO ENOS.	68
FIGURA 38 ASPECTOS DEL NIVEL DEL MAR EN LA ESTACIÓN DE BUENAVENTURA A) DURANTE 24 HORAS (EL 1 DE ENERO DE 1982) B) LA PRIMERA SEMANA DE ENERO DE 1982 C) EL MES DE ENERO DE 1982 Y D) EL AÑO 1982. LA OSCILACIÓN DIARIA ES LA MAREA QUE TIENE CARACTER SEMIDIURNO Y MODULA LA MAYORÍA DE LA VARIANZA ALREDEDOR DE LA MEDIA. UNA VEZ FILTRADA LA SEÑAL DE LA MAREA, LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR RESIDUAL ES DEBIDA A OTRAS CAUSAS COMO TSUNAMIS, EL FENÓMENO DE EL NIÑO-OSCILACION DEL SUR (ENSO) U ONDAS DE ROSSBY DE GRAN AMPLITUD. DURANTE 1982 HUBO UN NOTABLE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR PRODUCIDO POR EL ENSO DE ESE AÑO.	70
FIGURA 39 MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DEL NIVEL DEL MAR EN BUENAVENTURA (1951-2000) LUEGO DE HABER FILTRADO LA SEÑAL CON UN ‘RUNNING AVERAGE’ DE 21 PUNTOS. LOS PICOS PROMINENTES EN LAS FLUCTUACIONES MÁS EXTREMAS OCURRIERON DURANTE LOS EVENTOS CÁLIDOS DEL FENÓMENO ENSO (1976, 1982, 1997) Y LO CONTRARIO DURANTE LOS EVENTOS ‘FRÍOS CONOCIDOS COMO “LA NIÑA”.LOS VALORES MENSUALES MULTIANUALES MUESTRAN GRANDES AMPLITUDES DURANTE LA FASE POSITIVA DEL FENÓMENO ENSO Y UNA VEZ FILTRADA LA OSCILACIÓN ES NOTABLE AL RESPONDER A DICHA ANOMALÍA CLIMÁTICA.	71
FIGURA 40 ASPECTOS DEL NIVEL DEL MAR EN LA ESTACIÓN DE TUMACO A) DURANTE 24 HORAS (EL 1 DE ENERO DE 1982) B) LA PRIMERA SEMANA DE ENERO DE 1982 C) EL MES DE ENERO DE 1982 Y D) EL AÑO 1982. LA OSCILACIÓN DIARIA ES LA MAREA QUE TIENE CARACTER SEMIDIURNO Y MODULA LA MAYORÍA DE LA VARIANZA ALREDEDOR DE LA MEDIA. UNA VEZ FILTRADA LA SEÑAL DE LA MAREA, LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR RESIDUAL ES DEBIDA A OTRAS CAUSAS COMO TSUNAMIS, EL FENÓMENO DE EL NIÑO-OSCILACION DEL SUR (ENSO) U ONDAS DE ROSSBY DE GRAN AMPLITUD. DURANTE 1982 HUBO UN NOTABLE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR PRODUCIDO POR EL ENSO DE ESE AÑO.	72
FIGURA 41 MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DEL NIVEL DEL MAR EN TUMACO (1951-2000) LUEGO DE HABER FILTRADO LA SEÑAL CON UN ‘RUNNING MEAN’ DE 28 PUNTOS. LOS PICOS PROMINENTES EN LAS FLUCTUACIONES MÁS EXTREMAS OCURRIERON DURANTE LOS EVENTOS CÁLIDOS DEL FENÓMENO ENSO (1976, 1982, 1997) Y LO CONTRARIO DURANTE LOS EVENTOS ‘FRÍOS’ CONOCIDOS COMO “LA NIÑA”. EN ESTA SERIE ES NOTABLE CÓMO EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR EN CADA EVENTO HA SIDO CONSISTENTEMENTE MÁS ELEVADO EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS.	73
FIGURA 42 A) MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DEL NIVEL DEL MAR BALBOA 1907-1997. LA ELEVACIÓN DE LOS AÑOS DE ENSO ES CONSISTENTE CON LAS PRESENTADAS A LO LARGO DE LA COSTA COLOMBIANA. LA TENDENCIA LINEAL MUESTRA UN AUMENTO CONSTANTE DE 1.43 MM/AÑO (12.9CM EN 90 AÑOS), MUCHO MENOR A LA OCURRIDA EN BUENAVENTURA (2.4MM/AÑO). EL DESCENSO OCURRIDO EN 1988-89 TAMBIÉN APARECE EN OTRAS ESTACIONES CERCANAS Y ESTÁN EN RELACIÓN CON LA INTENSIDAD DEL VIENTO EN ESOS AÑOS. B) LA LLEGADA DE UN TSUNAMI A BALBOA (INDICADO POR LA FLECHA) EN MAYO DE 1960 QUEDÓ	

REGISTRADA EN LA OBSERVACIÓN HORARIA COMO UNA OSCILACIÓN DE MAREA ANORMALMENTE MAYOR EN ESOS DÍAS.	74
FIGURA 43. PROYECCIONES DE LA TEMPERATURA GLOBAL (CURVAS SUPERIORES) Y NIVEL DEL MAR (CURVAS INFERIORES) PARA VARIOS ESCENARIOS PROPUESTOS POR EL IPCC (1992). EL CAMPO DE ESTIMACIÓN DE LAS PROYECCIONES SE ENCUENTRA ENTRE LAS ÁREAS OSCURECIDAS DE ACUERDO CON LOS ‘MEJORES PREDICTORES’ Y LOS MODELOS DEL CLIMA. REDIBUJADOS DE WIGLEY Y RAPER (1992), LAS PROYECCIONES SOLO MUESTRAN EL COMPONENTE ANTROPOGÉNICO DE UN CLIMA FUTURO, CON UNA VARIABILIDAD NATURAL SÚPER IMPUESTA, (ADAPTADO DE MAUL, 1993). DE ACUERDO CON ESTA PROYECCIÓN LOS 20 CM DE ELEVACIÓN DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR SE ALCANZARÁN ALREDEDOR DEL 2050 MIENTRAS QUE LA ELEVACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE EN 1.5° C SOLO OCURRIRÍA EN EL 2065.....	75
FIGURA 44. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE) EN FORMA A. RASTER MATRIZ REGULAR Y FORMA B. VECTORIAL “TIN”; CERRO DEL FARO DE TUMACO, PACÍFICO COLOMBIANO.....	78
FIGURA 45. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS LÍMITES QUE DEFINEN LAS ÁREAS DE RIESGO, INCLUYENDO ALGUNOS DATOS REFERENTES A LA POBLACIÓN TOTAL AL AÑO 2001 QUE HABITA DENTRO DE LA MISMA.	81
FIGURA 46. EJEMPLO DE ÁREAS DE RIESGO DE INUNDACIÓN. SECTOR CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO	82

Lista de tablas

TABLA 1 POBLACIÓN TOTAL CENSADA EN 1993, 1985, 1973 Y 1964 SEGÚN GRUPOS DE EDAD. TOTAL NACIONAL. (DANE, 2001).	34
TABLA 2 CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA LA ELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	42
TABLA 3. ESTACIONES UTILIZADAS PARA ESTIMAR LAS VARIACIONES DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR EN LAS COSTAS COLOMBIANAS	64
TABLA 4. VALORES DE NIVEL MEDIO DEL MAR EN METROS, CAUSADOS POR EVENTOS EXTREMOS EN PERÍODOS DE 10 AÑOS, 100 AÑOS Y 1000 AÑOS, CON BASE EN EL MODELO DE PREDICCIÓN.....	81

Lista de Abreviaturas

ARNM	Ascenso del nivel del mar
ARNM	Ascenso rápido del nivel del mar
AV	Análisis de vulnerabilidad
CCCP	Centro de Control de Contaminación del Pacífico
CGSM	Ciénaga Grande de Santa Marta
CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DGIS	Oficina de Dirección General para Cooperación Internacional Ministerio Holandés de Relaciones Exteriores
DH	Delft Hydraulics
EMC	Ecosistemas marinos y costeros
ENOS	Fenómeno del Niño-Oscilación Sur
GEI	Gases Efecto Invernadero
GEZ	Programa de Investigación para la Gestión Marina y Costera
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IE-EE	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”
IPCC.	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVM	Institute for Environmental Studies-Vrije Universiteit Amsterdam
MCG	Modelo de Circulación Global
MDE	Modelo Digital de Elevación
MIZC	Manejo Integrado de Zonas Costeras
MMA	Ministerio del Medio Ambiente - MinAmbiente
NCCSAP	Netherlands Climate Change Studies Assistance Programme
NMM	Nivel medio del mar
NRM	Nivel relativo del mar
PNAOCI	Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los espacios oceánicos y las Zonas Costeras e insulares de Colombia
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINA	Sistema Nacional Ambiental
UAC	Unidad Ambiental Costera
UAESPNN	Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales
UMI	Unidad de Manejo Integrado
von Humboldt	Instituto Alexander von Humboldt

Abstract

This first technical report, defines the limits chosen by the project “Defining vulnerability of bio-geophysical and social-economic systems due to sea level change in Colombian coastal zone (Pacific and Caribbean) and adaptation measures” to be the study area where the assessment of the vulnerability of the coastal zone of Colombia to the impact of accelerated sea level rise (ASLR) due to global warming could take place as well as the adaptation measures. The project has been conducted according to the Common Methodology recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC, 1992)

The project has involved a team of Colombian experts that worked closely together with the counterparts of INVEMAR, on this first definition of the study area. During the process, extensive opinions were collected based on the particular knowledge that each and every one of the experts had from the Colombian coasts. Further, and based on the previous work done during the international advisor visit, the group reviewed the physical, biological, social, economic and political criteria for defining the study area.

The coastal dynamic processes, among the physical criteria, were considered the most important for defining the limits. Emphases on the sharp differences between the Colombian coasts were made, in order to select the appropriate boundaries. The findings showed that the upper limit of the study area must be the contour line defining the +60 m of altitude and the lower limit should be the -200m contour line. This area involves all the process and criteria that should be taken into account for the present vulnerability assessment.

A sea level rise scenario of 1 m over the next century will be used to provide a worst-case situation.

KEY WORDS.

Study area, Colombian coastal zone, boundaries, information system, climate relevant issues.

Executive summary

Global sea level rose 10 to 25 cm during the 20th Century and this rate of rise is expected to accelerate during the 21st Century due to human-induced global warming. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estimated that the global rise from 1990 to 2100 would be between 23 and 96 cm, with a mid estimate of 55 cm. More recent scenarios also express a high uncertainty. The local change in sea level at any coastal location depends on the sum of global, regional and local factors and is termed relative sea-level change. These include sea level changes due to regional atmospheric and oceanic changes and regional and local uplift and subsidence of the land.

Such evidence and the great concern involving the impacts of SLR on low land coastal areas, has allowed several countries, Colombia within, to start with their own vulnerability assessments. This first technical report defines the limits chosen by the NCCSAP, Colombia project to be the study area to assess the vulnerability of the coastal zone of Colombia to the impact of accelerated sea level rise (ASLR) due to global warming. The project “*Defining vulnerability of bio-geophysical and social-economic systems due to sea level change in Colombian coastal zone (Pacific and Caribbean) and adaptation measures*” also aims to evaluate a general preliminary adaptation measures¹. All the outcomes of the project are based on the actually available secondary information and expert knowledge.

The project has been conducted according to the Common Methodology recommended by the IPCC. It has involved a team of Colombian experts that worked closely together with the counterparts of INVEMAR on this first definition of the study area. During the process, extensive opinions were collected based on the particular knowledge that the involved experts had from the Colombian coasts. Further, and based on the previous work done during international advice, the group reviewed the physical, biological, social, economic and political criteria for defining the study area.

Definition of boundaries

The coastal dynamic processes, among the physical criteria, were considered the most important to define the limits of the study area. Emphasis on the sharp differences between the Colombian Caribbean and Pacific coasts was made, in order to select the appropriate boundaries. The one-meter contour line couldn't be used because the existent cartography of Colombian coastal zones lacks detailed contour lines, being the minimal in some areas of the Caribbean; the one located at 25 m high, and for some areas of the Pacific coast the 60 m or even the 100 m contour line. Some detailed cartography is available for the urban areas, some other localities used for mineral exploitation and some other engineering works, but this detailed information has rather restricted access and is scarce and would have no serve this first general view of the problem, because of the 1:300.000 scale chosen for the project.

Due to this lack of detailed information and being unable to locate the one-meter and following contour lines for the whole coast, the decision of finding and unifying a unique limit, had to be made. Based on the experts

¹ The study do not take into account other climatic variability or changes different to the sea level rise, although the relevance of evaluating some other factors such as temperature or weather phenomena in this kind of assessment.

opinion and knowledge, it was showed that the upper limit of the study area should be the contour line defining the +60 m of altitude and the lower limit should be the -200 m contour line. This area involves all the process and criteria that could be taken into account for the present study.

For each of the components needed to evaluate the vulnerability assessment (VA) due to ASLR, bio-geophysical, social-economic and governance component, the chosen area was proved. The effects of the main dynamic process involved on the coastal area related to ASLR such as erosion, salinity intrusion and inundation were in fact included into this fringe. All the marine and coastal ecosystems (estuaries, coastal lagoons, beaches, mangroves, sea grasses, coral reefs and sedimentary bottoms) were included in the fringe up to the -200 m. The social and economic indicators such as demography, quality life and economic activities development, could be established for the selected area; on this regard, several discussions were made based on the availability of the information, that for Colombia was given on departmental or municipality level. Very strong assumptions would have to be made in order to extrapolate the available information to a different scale (physical units). The national, regional and local governance could also be evaluated on the designated area.

Case study areas

The selection of case study areas is based upon the will of having a closer look on the vulnerability assessment of the Colombian coastal zone due to ASLR. The representativity of the coasts of Colombia, Continental Caribbean and Pacific based on their marked differences, regarding life quality indexes, population concentration and migratory processes, is a relevant factor taken into account for making this selection. The cultural diversity in the Caribbean and Pacific Region, embraces different indigenous groups and Afro Colombian groups to whom different resources exploitation methods are attributed. It is also a fact, that there is not similitude between the productive systems of the two coasts; there is a greater development in cattle raising, mining and industry in the Caribbean compared with the Pacific region. Because of the above, one representative area on each of the coasts had to be used. It was also important to have a representation of an urban area that will show us a more direct impact of the phenomena.

The first case of study area chosen to appreciate a more detailed analysis of the vulnerability of the Colombian coastal zone due to an ASLR, is framed inside the Environmental Coastal Unit "Estuarina del río Sinú y el golfo de Morrosquillo". This Unit is shaped by a mosaic of continental, coastal, insular and marine ecosystems that spreads approximately 260 km, southwest - northeast direction from Arboletes point, in boundaries between the departments of Córdoba and Antioquia, up to San Bernardo in San Onofre's municipality (Sucre). This zone of the Colombian Caribbean includes the littoral of the Sucre and Córdoba departments, Tortuguilla Island, Fuerte Island and the archipiélago de Islas de San Bernardo. In this unit, two sub-units differing by its physiographic characteristics are named; the first one, located southwest from Tinajones' delta (river mouth of the Sinú River), up to Arboletes point in the limits with the department of Antioquia (includes the municipalities of San Bernardo del Viento, Moñitos, Broqueles, Río Cedro, Cristo Rey, Puerto Escondido and Los Córdoba); and the Northeast Sub-unit that includes the whole system of Morrosquillo's Gulf (Municipalities: San Antero, Tolú and San Onofre) chosen to be the first case study area for the present VA study.

Morrosquillo's Gulf is located in the southern sector of the Caribbean Colombian coast, between the departments of Córdoba and Sucre, with an approximate area of 1000 km² and depths between 15 and 55 m. Morphologically it is constituted towards the central zone by an extensive coastal plain that limits on the north and south with two coral terraces. In the southwest sector is located the Sinú River mouth, its evolution and dynamics depend on the fluvial and marine processes especially by rate of waves and tides. The case study area covers the south part of Morrosquillo's Gulf from the Tolú's municipal head-board up to the Rada Point, between the geographical coordinates of 9° 18' 00" and 9° 36' 50" N and 75° 34' 50" and 76° 08' 30" W.

An important characteristic of this area in relation with the vulnerability assessment is the presence of the Sinú river delta. The basin of the Sinú River is the most important of the department of Córdoba, with an area of 13.700 km², of which 1.100 km² corresponds to the department of Antioquia and the remaining 12.600 km² to the department of Cordoba. This condition influences the marine water salinity in the gulf, especially at the south

sector. During the humidity season of the year, the salinity distribution makes possible to identify the influence of the river discharge with values between 26.5 and 31.8 p.p.m.

From the geomorphologic point of view, the study area is divided in five regions, inside them different geomorphologic units could be identify according with their origin and /or evolution: alluvial, marine, denude, structural and lacustrine. These units are in constant change influenced by marine processes as waves, tides, coastal currents and terrestrial processes like the exhaust of rivers, the river influence or processes of action in mass. Human influence has demonstrated to be decisive at the moment of altering the units, primarily with structures that try to protect the beaches against the coastal erosion.

Inside the marine and coastal environments that are outlined in the southern area of Morrosquillo's Gulf, it is necessary to mention the mangroves ecosystems, coral reefs, meadows of sea grass, soft bottoms communities of the continental shelf and estuaries, deltas and coastal lagoons. These environments are a part of the whole geomorphologic environment of the coastal zone, being the habitat of different biological resources that are used as sustenance for a great part of the population inhabitants of the coastal zone of the area. This mosaic of ecosystems found at this area will permit to assess the vulnerability of this systems to sea level rise with the purpose of extrapolate the impacts and changes to similar environments of the Caribbean coastal zone.

The Morrosquillo's Gulf is not only important for its physical characteristics and biological diversity, but also for its social economic aspects and development problems. The inhabitants of the Caribbean Colombian coast have big expectations of development in the selected region, since there they can find sites and natural systems of recognized importance, such as: Coveñas' maritime petroleum terminal, Tolcemento's industrial Port, La Caimanera wetland, systems of marshes and swamps of Cispatá's bay, delta of the Sinú River and Fuerte Island.

Because of the strategic location of Morrosquillo's Gulf on the Caribbean Sea, it has given origin to a process of consolidation in economic terms and services in the territorial area through time. These characteristics have determined the importance of the region related with development activities (port, tourist and fishing activities among others).

The second study area chosen to assess the vulnerability of the coastal Pacific Colombian zone due to a possible sea level rise corresponds to the Integrated Management Unit (UMI) Guapi - Iscuandé. The problems and conflicts of this area are similar to those of the whole Pacific coast, where is common the untidy utilization of the resources of the coastal zone, stimulated by the processes of intensive exploitation done in an intensive way and without planning, this causes the erosion of the natural productive base, and economic, social and environmental problems. The major pressures in this sector obey to forest, fishing and mining utilizations that give the relevancy of taking this site as the study area.

The Pacific study area is located at the department of Cauca in the municipalities of Guapi and Santa Barbara de Iscuandé. The area boundaries at east and west correspond to Iscuandé and Guapi Rivers path, respectively; at the south the area is delimited by the secondary rivers of Temuey and Baltazar, and at the north the boundary corresponds to the external edge of the continental shelf, approximately 55 km off the coast line, just behind Gorgona Island.

Several natural threats impact the area of Guapi including the ones associated with higher seismicity, (in relation with the convergence of the Nazca and South America Plates), such as tsunamis, earthquakes, tectonic subsidence and liquefaction of the soil. Other threats related with geological process are inundations and coast line erosion.

The biotic component of the study area is important because of the higher grade of human intervention. The existing ecosystems are: Coral reefs at Gorgona Island, currently protected by the law because the island was declared Natural Park in 1993, even though, artisan fishermen use extensively the area. These coral reefs are the biggest ones on the Pacific coast. With a zoning pattern dominated by *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erecta*, mangroves are restricted to places characterized by higher sandy substrate with few tide inundations. Behind the mangroves margin, a transition zone between mangroves and

guandal forest is observed including species like nato (*Mora megistosperma*), piñuelo (*Pelliciera rhizophorae*), mangle (*Rhizophora spp.*), Suela (*Ptterocarpus officinalis*), sapotolongo (*Pachira acuatica*), calabacillo (*Meliosma spp*) among others.

The aim of the social-economic description of the study area is to understand the dynamics of the population of Guapi and Iscuandé as for growth, structure and composition of the population in relation with some aspects associated with the employment demand and offer, in order to have basic information for assessing their vulnerability due to sea level rise and extrapolate it to others sites in the Pacific coast. In relation with the economics of the area, Guapi has been identified as a growing regional economic center.

The third area of study corresponds to the urban area of San Andrés de Tumaco. The city is head of municipality and is located in the Colombian southeast region (2° 48' 24" N and 78° 45' 53" W). San Andrés de Tumaco extends along 3.760 km² representing 12.11% of the department. Tumaco's cove starts at Punta del Cocal and extends to Punta de Cascajal where a group of islands (Tumaco, La Viciosa and El Morro) are united to the continent through a new bridge called El Pindo. The study area corresponds to the urban perimeter of those islands and the continental urban perimeter that develops along the Tumaco-Pasto road.

The study area shoreline is under continuous change due to its geographical localization and to coastal processes that occur nearby. The Mira River sediments surplus, the northwest persistent wave movement, the consequent northeast littoral drift, the semidiurnal tides regimen with a 3.5 m amplitude, the seismic movements action and tsunamis generation and the abnormal sea level rise due to El Niño phenomenon conform a group of natural hazards that, associated with urban and socio-economic developments in the region, produce an interesting study area for the vulnerability assessment at the sea level change scenario in the country.

A seal level rise projection of 30 and 100 cm over the next 30 years an next century will be used to provide a worst case situation. It is important to note at this point that due to the lack of information, some of the information required by the IPCC methodology had to be presumed or derived from other information. Even so, there are cases, such as the detailed topography or periodicity and impacts of natural phenomena that cannot be assumed or derived, and dynamic flooding models had to be developed for the 1/10, 1/100 and 1/1000 lines construction among other issues.

Antecedentes

1 Bases para esperar un aumento en el nivel del mar

1.1 Tendencias pasadas del nivel del mar

Durante la historia geológica de nuestro planeta, el nivel del mar ha aumentado y disminuido a razón de trescientos metros debido a cambios en la forma y el tamaño de la cuenca oceánica, la cantidad de agua contenida en los océanos y la densidad promedio del agua marina. El levantamiento y subsidencia de la tierra han causado también cambios relativos en el nivel del mar de algunas masas de la tierra. Los tres primeros factores tienen una influencia directa sobre el “nivel global del mar” el último, sin embargo, afecta al “nivel relativo del mar”. Durante los últimos 100 millones de años, los cambios en el tamaño y forma de la cuenca oceánica, han causado los mayores cambios en el nivel global del mar (Titus *et al.*, 1985).

El nivel “relativo” del mar (NRM) es el efecto neto entre la actividad tectónica, levantamiento o subsidencia, más la expansión o contracción de la columna de agua.

Durante la pasada edad de hielo, la temperatura global promedio fue 50°C más baja que en la actualidad. Los glaciares cubrían la mayoría del hemisferio norte, había menos agua en los océanos y el nivel medio del mar era de 100 a 150 m menor que en la actualidad. Por otro lado, durante periodos interglaciares anteriores, las temperaturas globales eran de 1 a 20° C más cálidas y el nivel del mar estaba 6 metros más alto que el actual (Titus *et al.*, 1985).

Los glaciares cubrían la mayoría del hemisferio norte durante la última edad de hielo; un derretimiento de los glaciares polares de Groenlandia y Antártica contendrían suficiente agua para aumentar el nivel del mar en 70 metros. El derretimiento completo de estas capas no ha ocurrido nunca durante los últimos dos millones de años y se necesitarían al menos decenas de miles de años para que la tierra se calentara a tal punto. Sin embargo, a diferencia de otros glaciares que descansan sobre tierra, la capa de hielo de la Antártica tiene un origen marino, lo que la hace más vulnerable a los incrementos de temperatura. Mercer (1970), sugiere que la capa de hielo situada al oeste de la Antártica, desapareció completamente durante el último período interglaciar y el nivel del mar aumentó entre 5 y 7 metros el nivel del mar actual (Titus *et al.*, 1985).

El clima puede influir en el nivel del mar durante periodos relativamente cortos de tiempo, calentando y por ende expandiendo (o contrayendo y expandiendo) al agua de mar. En el último siglo la disposición de calibradores, ha permitido la medición de cambios relativos en el nivel del mar en localidades particulares. Este aumento puede ser explicado en parte por la expansión térmica de las primeras capas del océano como resultado de un aumento observado de 0.40°C en el último siglo. El agua proveniente del derretimiento de los glaciares de montaña, también ha contribuido a dicho aumento (Titus *et al.*, 1985).

1.2 Efecto Invernadero

La preocupación ante un posible incremento en la tasa de aumento del nivel del mar, surge del progresivo ascenso, que se ha evidenciado durante los últimos años, debido a las concentraciones de dióxido de carbono, metano, cloro-fluoruro-carbonados y otros gases producidos en su mayoría por actividades humanas. Debido a que estos gases absorben la radiación infrarroja (calor), algunos científicos esperan que la tierra se caliente substancialmente, sin embargo, algunas personas han sugerido que factores imprevistos o desconocidos, puedan contrarrestar este calentamiento (Titus *et al.*, 1985).

La temperatura del planeta está determinada, principalmente, por la cantidad de radiación solar que recibe, la radiación que refleja y el alcance de la atmósfera para retener calor. Cuando la luz del Sol llega a la Tierra, (Figura 1) calienta la superficie que refleja el calor en forma de radiación infrarroja. Sin embargo, el vapor de agua, el CO₂ y otros gases en la atmósfera, absorben parte de esta energía, y evitan que escape a la atmósfera y al espacio. Debido a que la atmósfera atrapa calor y calienta la tierra de forma similar a los paneles de vidrio de un invernadero, este fenómeno es conocido como “efecto invernadero” (Titus *et al.*, 1985).

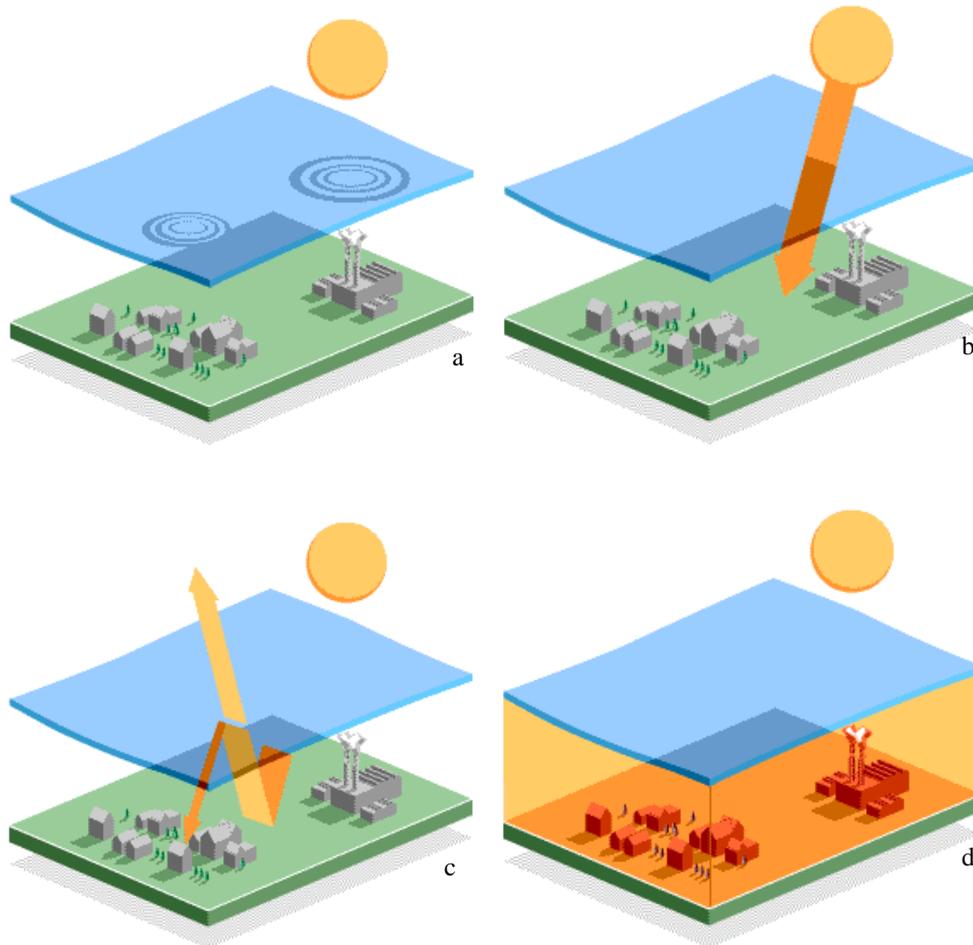


Figura 1. Representación esquemática del Efecto invernadero.

Sin el efecto invernadero causado por los gases que se presentan *naturalmente* en la atmósfera, la tierra sería aproximadamente 33° C más fría de lo que es actualmente. Por ende el efecto invernadero no es algo que pudiese llegar a ocurrir sino una característica propia de nuestra atmósfera (Titus *et al.*, 1985).

La temperatura superficial global se ha incrementado alrededor de 0.6°C durante el siglo 20 (IPCC, 2001).

Se ha reportado que la temperatura superficial global promedio (el promedio de la temperatura de aire cerca de la superficie de la tierra y la temperatura de la superficie del mar) se ha incrementado desde 1861. A lo largo del siglo 20, este incremento ha sido de 0.6± 0.2°C (Figura 2). Este valor es aproximadamente 0.15°C mayor que el

estimado en el período de 1994, (IPCC Second Assessment Report –SAR-) debido a las altas temperaturas presentadas entre 1995 y 2000 (IPCC, 2001). En el hemisferio Norte, el incremento durante el siglo 20 ha sido el más largo registrado en los últimos 1000 años siendo la década de los 90's la más calurosa y el año de 1998 el año más cálido. En promedio, entre 1950 y 1993, las temperaturas mínimas diarias entre el día y la noche, se han incrementado en 0.2°C por década. Esa tasa es el doble del incremento de la temperatura máxima diaria durante las horas de sol (0.1°C por década). Este hecho ha prolongado las épocas libres de heladas en muchas regiones de latitudes medias y altas. El incremento en la temperatura superficial del mar a lo largo de este período ha sido la mitad de la temperatura superficial del aire de la tierra (IPCC, 2001).

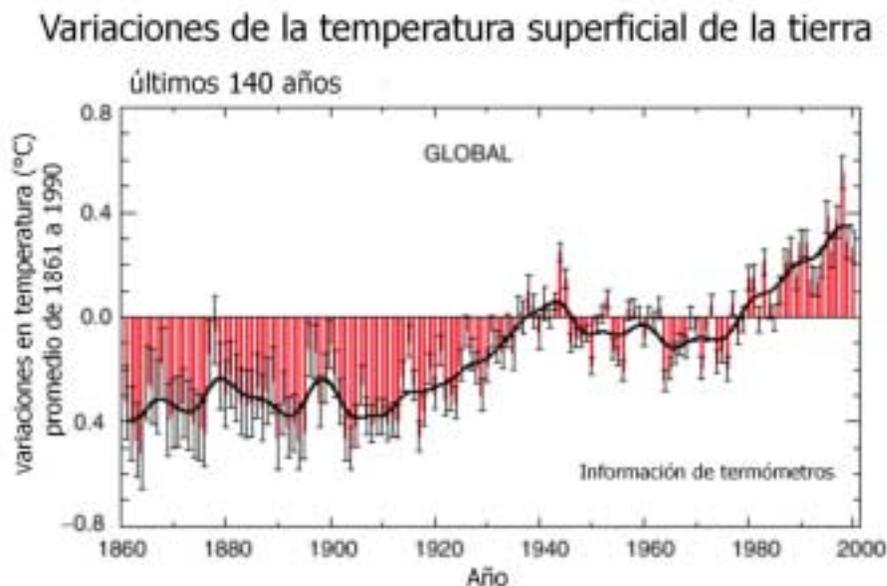


Figura 2. La temperatura de la tierra se observa año a año (barras claras) y aproximadamente década a década (barras oscuras, un filtro de las curvas anuales fue aplicado para suprimir las fluctuaciones inferiores a la escala de tiempo por década más cercana). Existen ciertas dudas con respecto a los datos anuales (el tope de las barras negras representan el 95% del rango de confianza) debido a la colecta de los datos, a la diferencia de errores instrumentales y a la incertidumbre en la desviación de las correcciones hechas sobre la superficie del mar, además de las urbanizaciones realizadas en tierra. El mejor valor estimado, indica que la temperatura superficial promedio global se ha incrementado en 0.6 ± 0.2 °C (modificado de IPCC, 2001).

El conocimiento actual sobre el cambio de la temperatura a través de los registros de temperatura de los últimos 10.000, 1.000 y los 100 años (Figura 3) muestran que la temperatura de la tierra ha variado significativamente desde los descubrimientos europeos del siglo XV en América. De hecho, cuando el mar Caribe fue descubierto, Europa estaba en un periodo frío conocido como “ La pequeña Edad de Hielo”. En el presente, el clima de la tierra es más caliente que lo que fuera en los pasados mil años pero de ninguna manera es tan caliente como lo ha sido en épocas lejanas, como se indica en los registros de largo periodo (el último millón de años). Entonces, mientras una interpretación de los últimos cien años muestra un incremento de la temperatura global en promedio (Hansen y Lebedeff, 1998, Figura 3) las décadas de 1940-1970 tienen temperaturas en descenso.

Recientemente se han construido historias climáticas de la región americana que han mostrando que mucha de la variabilidad que muestra el panel superior de la Figura 3 se aplica para el mar Caribe y golfo de México. Hodell *et al.* (1991) publicó una historia de 10.000 años de mediciones de isótopos del oxígeno tomados del lago Miragoane, Haití, el cual tiene muchas de las características de esta curva de temperatura “global”. Ellos

concluyeron que el isótopo 18 apenas sigue la curva de insolación inducida por la órbita de Milankovitch, pero notaron que superpuesta sobre la tendencia de clima forzado orbitalmente (enfriamiento para los próximos 5000 años) hay eventos abruptos resultantes de interacciones océano-atmósfera no-lineales. Entonces mientras se debate el 'registro histórico' (alrededor de los últimos 150 años), se debe ser conciente del progreso y las incertidumbres en aplicar argumentos de cambio global a una región específica.

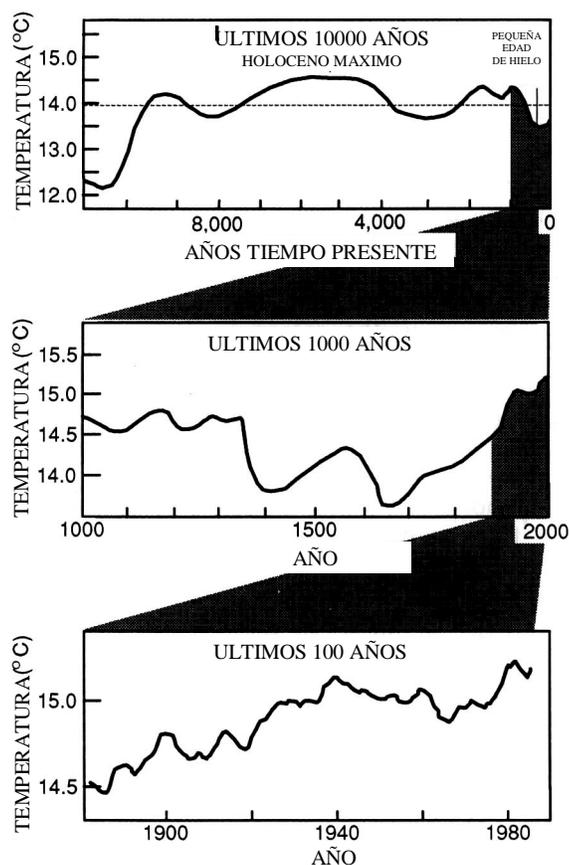


Figura 3. El cambio de temperatura de los últimos 10.000 años y 1000 años basados en registros de Europa (primeros dos paneles, adaptados por el IPCC, 1990) y el estimado global (panel inferior) tomado de Hansen y Lebedeff, (1998). La escala de temperatura de los dos paneles superiores es aproximada y escogida para que esté de acuerdo con el registro de los últimos cien años que es basado en observaciones directas, adaptado de Maul (1993).

Las evidencias anteriormente expuestas y la gran preocupación que ha generado las posibles consecuencias de dicho fenómeno, ha permitido que muchos países, entre ellos Colombia, empiece a evaluar su vulnerabilidad ante el cambio climático global.

2 La respuesta colombiana ante un rápido ascenso en el nivel del mar

Numerosos esfuerzos se han realizado para tratar de entender si las tendencias actuales de nivel del mar van a llegar a niveles tan críticos que afecten la vida humana de manera dramática en las zonas costeras. Sin embargo, es poco lo que se sabe sobre el cambio del nivel del mar en Colombia y si las tendencias globales son válidas para sus zonas costeras, reconociendo que el aumento del nivel del mar afecta las regiones de manera diferente y según las circunstancias propias de cada una.

No es sorprendente que el impacto potencial del aumento en el nivel del mar y el cambio climático en general, tenga una gran influencia sobre el desarrollo de las políticas de uso de la tierra en las zonas costeras. Conforme con el IPCC se estima que existe una rápida expansión de la población mundial y que el mayor incremento se ha observado en las zonas costeras, especialmente en los países desarrollados. Este incremento demográfico hace que las presiones naturales y antrópicas sean un fenómeno común en todas las áreas del mundo donde se intensifican la presión sobre los componentes biogeofísicos y socioeconómicos de las zonas costeras, amenazando entre otras cosas, la diversidad biológica. En América Latina² sin embargo, las mayores preocupaciones frente al cambio climático radican en que:

- La capacidad de adaptación de los sistemas humanos es baja, particularmente con respecto a los eventos climáticos extremos. Por lo tanto, existe una alta vulnerabilidad.
- Se harán más frecuentes las inundaciones y las sequías, que aumentarán las cargas de sedimentos y degradarán la calidad del agua en algunas áreas.
- Aumentará la intensidad de los ciclones tropicales, con mayor riesgo para la vida, la propiedad y los ecosistemas por daños producidos por precipitaciones intensas, olas de tormenta y tormentas de viento.
- Disminuirán los rendimientos de las cosechas. En algunas regiones, se verán amenazadas las tareas de granjas de subsistencia.
- Los asentamientos costeros, las actividades productivas, las infraestructuras y los ecosistemas de manglares serán afectados negativamente por el aumento del nivel del mar.
- Aumentará la tasa de pérdida de diversidad biológica.
- Los desarrollos en localidades propensas a situaciones de riesgo, basados en consideraciones de corto término que no tengan en cuenta la variabilidad climática conocida, pueden dar lugar a la mala adaptación.

Muchas comunidades y regiones que son vulnerables al cambio climático se encuentran también bajo presión por coacciones tales como el crecimiento poblacional, la pérdida de recursos y la pobreza. Las políticas que disminuyen las presiones sobre los recursos disminuyen los riesgos ambientales y aumentan el bienestar de los pobladores más pobres, incrementa el desarrollo sostenible y la equidad y reduce la vulnerabilidad al clima y otras tensiones.

²Ecología Latinoamericana. Resumen del Informe sobre impacto, adaptación y vulnerabilidad ante el cambio climático consecuencia globales, En América Latina y el MERCOSUR
<http://www.ambiental.net/redanoticias/cambio%20climatico%20ipcc.htm>

En la literatura existente sobre los impactos causados por un aumento en el nivel del mar, se sugieren tres conclusiones principales (IPCC, 2001):

- El efecto potencial del cambio climático en la zona costera será de consideración.
- La divulgación de las futuras proyecciones y las medidas acertadas de desarrollo sobre el uso de la tierra decididas hoy en día, pueden reducir substancialmente futuros daños potenciales.
- La naturaleza compleja y a largo término de los efectos, tenderán a forzar predicciones de impactos con alto grado de incertidumbre; esta preocupación se verá magnificada a medida que los estudios se muevan a niveles de resolución aún menores, desde lo global, a lo nacional y al local.

2.1 Herramientas de respuesta

Atendiendo el mandato de la Segunda Conferencia Ambiental y de Desarrollo (Second United Nations Conference on Environment and Development, UNCED-2) llevada a cabo en Junio de 1992; de la Convención de Diversidad Biológica (CBD) en el Mandato de Jakarta 1995 y de la Convención Marco de Cambio Climático en 1992 (CMCC) de las Naciones Unidas, Colombia, un país con extensas costas sobre el mar Caribe y el océano Pacífico, ha visto la necesidad de manejar sus recursos marinos y costeros de una manera integral, holística, ordenada y sostenible, de forma muy distinta a la llevada a cabo hasta el momento.

Antes de los años 80's, los esfuerzos para iniciar una administración integrada de la zona costera con bases científicas, fueron poco fructíferos. Solo hasta la creación del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (Ley 99 de 1993) como ente rector de la gestión ambiental del país, se ha comenzado a entender, discutir y asumir el tema de Manejo Integrado de las Zonas Costeras, a un nivel adecuado de Estado, con el apoyo científico de las entidades que conforman el Sistema Nacional Ambiental – SINA (Corporaciones Autónomas Regionales, autoridades ambientales encargadas del seguimiento y control de las políticas emitidas por el MMA e Institutos de Investigación).

Un aumento en el nivel del mar debido al cambio climático, puede significar cambios adversos en la zona costera, afectando ecosistemas de gran importancia ecológica y económica (IPCC, 1990; 1996)

La futura situación ecológica de las zonas costeras colombianas, requiere un estudio de cambios regulares de los ecosistemas, orientado a la creación de modelos escenarios en el tiempo. Sobre esta base, Colombia, consciente de su responsabilidad y como complemento a otros estudios relativos al tema y desarrollados paralelamente en el país (producción de gases invernadero, identificación de sumideros de gases, producción de gases por fuentes móviles, entre otros), ofrece como mecanismo para la implementación de la política de Manejo Integrado de Zonas Costeras, el proyecto *DEFINICIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO EN EL NIVEL DEL MAR DE SISTEMAS BIOGEOFÍSICOS Y SOCIOECONÓMICOS EN LA ZONA COSTERA COLOMBIANA (PACÍFICO, INSULAR Y CARIBE) Y MEDIDAS PARA SU ADAPTACIÓN*, como herramienta para ser usada por las autoridades gubernamentales en la difícil tarea de la toma de decisiones y del cual hace parte integral este documento.

2.2 Generalidades del Proyecto

El propósito del proyecto se resume es el de definir la vulnerabilidad y las medidas de adaptación de los sistemas biogeofísicos y socio-económicos en las costas Caribe Continental e Insular y Pacífico de Colombia, ante un eventual cambio en el nivel del mar, haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y de aproximaciones obtenidas a partir de técnicas de procesamiento digital de productos provenientes de sensores remotos, con el fin último de acrecentar la capacidad nacional ante un posible ascenso rápido del nivel del mar.

Además, busca la elaboración de bases de datos, que reflejen la situación actual de las costas colombianas (topografía, geomorfología, ecosistemas marinos y costeros –EMC-, asentamientos y usos de la tierra). Busca también, el desarrollo de un modelo cualitativo preliminar, que permita la posible detección de los cambios espaciales de los EMC, dado por un cambio en el nivel del mar, al igual que la predicción de zonas inundables y posibles escenarios, eventos y magnitudes, así como las medidas acertadas de adaptación pertinentes para la reducción de la vulnerabilidad de las zonas costeras colombianas. Esta investigación es responsable además de suministrar la información al Sistema Nacional Ambiental (SINA) para que sirva de soporte en la política de MIZC, para generar conciencia en el público general de las posibles amenazas causadas por el Ascenso Rápido en el Nivel del Mar (ARNM) y del establecimiento de cooperación internacional de países con amplia trayectoria en la evaluación de vulnerabilidad en las zonas costeras.

Objetivo General Definir la vulnerabilidad y las medidas de adaptación de los sistemas biogeofísicos (topografía, geomorfología y EMC) y socioeconómicos (asentamientos y usos de la tierra), en las costas Caribe y Pacífico de Colombia, debido a un cambio en el nivel del mar, por medio del uso de un SIG y de técnicas de procesamiento digital de productos provenientes de sensores remotos, con el fin de acrecentar la Capacidad Nacional de Colombia para enfrentar la posibilidad de un ARNM.

2.2.1 Objetivos específicos

- Elaborar una base de datos (cartografía digital y análoga) que incluya las características actuales de la línea de costa, los EMC, uso de la tierra y asentamientos, en las costas Caribe y Pacífico Colombiana.
- Definir la vulnerabilidad de la línea de costa, los EMC y el uso de la tierra y asentamientos, usando la “Metodología Común IPCC” (IPCC, 1994)
- Construir un modelo preliminar cualitativo para la detección de los posibles cambios espaciales en los EMC, debido a un cambio en el nivel del mar.
- Analizar los cambios espaciales (pérdida o ganancia de la línea de costa, EMC y asentamientos) en los diferentes escenarios de cambio en el nivel del mar
- Establecer una zonación preliminar de los EMC en riesgo, basada en su vulnerabilidad ante los diferentes escenarios y eventos de magnitud dados por cambios del nivel del mar.
- Establecer una posible medida de adaptación (planeación y mitigación) que puedan ser usadas para reducir la vulnerabilidad en las zonas costeras colombianas.
- Producir y entregar información al Sistema Nacional Ambiental -SINA- que sirva de soporte a las políticas Nacionales y en especial la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los espacios oceánicos y las Zonas Costeras e insulares de Colombia - PNAOCI
- Capacitar e implementar estrategias de entrenamiento para el estudio de la vulnerabilidad y adaptabilidad de las zonas costeras debido a cambios en el nivel del mar.
- Generar dentro de los habitantes y público general conciencia de las posibles amenazas causadas por el ARNM a través de reuniones o talleres.
- Establecer vínculos de cooperación internacional con países que ya tienen una trayectoria en el análisis de la vulnerabilidad debido a un ARNM.



2.3 Marco conceptual del estudio

El esquema general desarrollado en la investigación (Figura 4), comienza con una caracterización de los diferentes municipios que hacen parte del área de estudio. Con base a los resultados de susceptibilidad del componente biofísico, definidas por áreas en riesgo y áreas inundables, se identifican y se cuantifican los diferentes impactos sobre el sistema socioeconómico. A partir de esos impactos se plantean una serie de proyecciones con base en unos escenarios pre-establecidos donde se destacan situaciones *con* y *sin* ascenso en el nivel del mar, tanto en el tiempo presente como en treinta años y cien años (2030 y 2100).

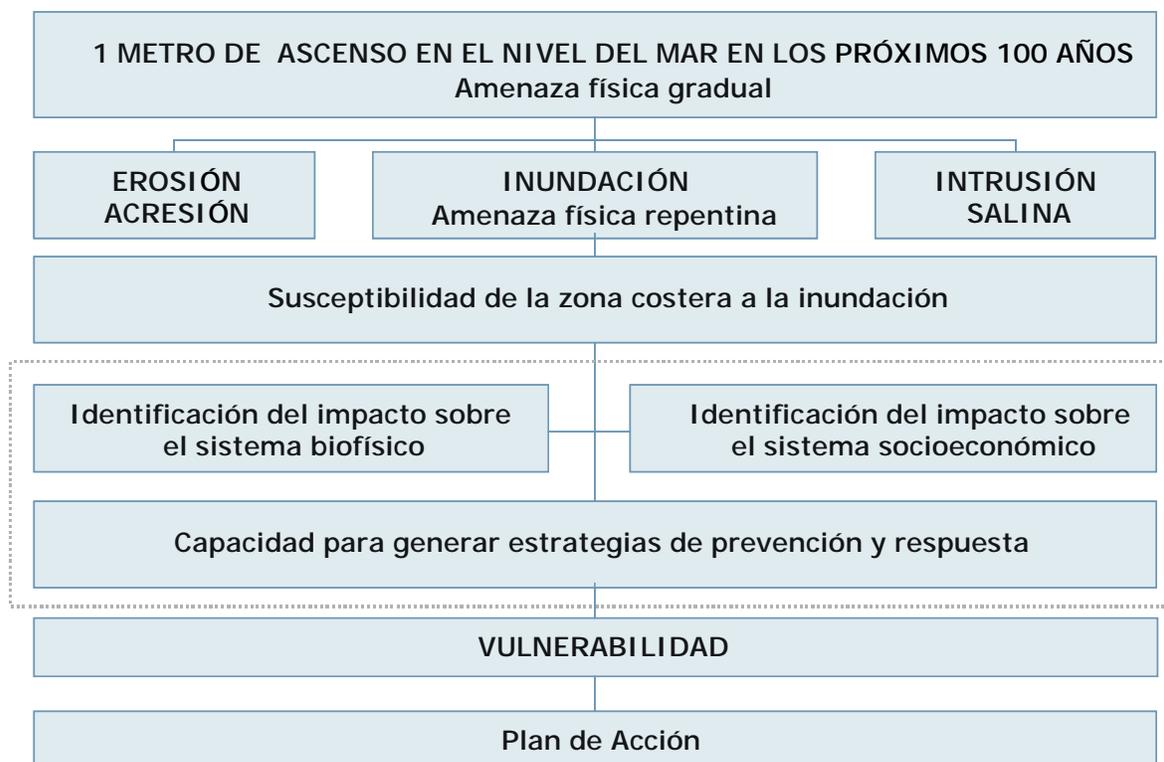


Figura 4. Esquema del marco conceptual adoptado para llevar a cabo el estudio.

La elaboración de los escenarios se realizó a partir de unos factores críticos que desde el punto de vista socioeconómico, son determinantes para el desarrollo de las costas colombianas. Esta información se integra al análisis, con miras a determinar cuales son las áreas críticas que presentan elementos de esencial importancia, en las cuales hay que enfatizar las respuestas de política institucional.

Se estiman a continuación, los costos frente a las diferentes alternativas de respuesta que se pueden presentar, a través de variados mecanismos de valoración económica.

Finalmente, el perfil de vulnerabilidad se desarrolla incluyendo en el análisis anterior, la viabilidad de implementar las opciones de respuesta es decir la capacidad del país para manejar el impacto del ARNM, incluyendo la posibilidad de prevenirlo o aliviarlo implementando las medidas acertadas.

2.4 Estructura del Proyecto

El proyecto hace parte del Programa Holandés de Asistencia para Estudios sobre Cambio Climático, (Netherlands Climate Change Studies Assistance Programme-NCCSAP), una iniciativa del Ministerio Holandés de Relaciones Exteriores a través de la oficina de Dirección General para Cooperación Internacional (DGIS) que dio inicio desde 1996 y cuyos objetivos son los siguientes:

- Permitir a los países en vía de desarrollo la implementación de las respuestas a los compromisos adquiridos bajo la Convención Marco de Cambio Climático.
- Crear conciencia de las implicaciones del cambio climático.
- Promover la participación de los políticos, la comunidad científica y el público en general.

El programa delega su responsabilidad en los ministerios de los países participantes, principalmente los ministerios de ambiente (Figura 5), como en el caso de Colombia, para llevar a cabo los estudios de cambio climático, que a su vez son ejecutados por las entidades científicas competentes. El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés-INVEMAR, fue la entidad delegada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia para ejecutar el proyecto. El INVEMAR es una es una corporación civil, científica y tecnológica, sin ánimo de lucro, que desde hace más de 30 años estudia los recursos naturales renovables, marinos y costeros, con el fin de aportar el conocimiento científico que permita contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos.

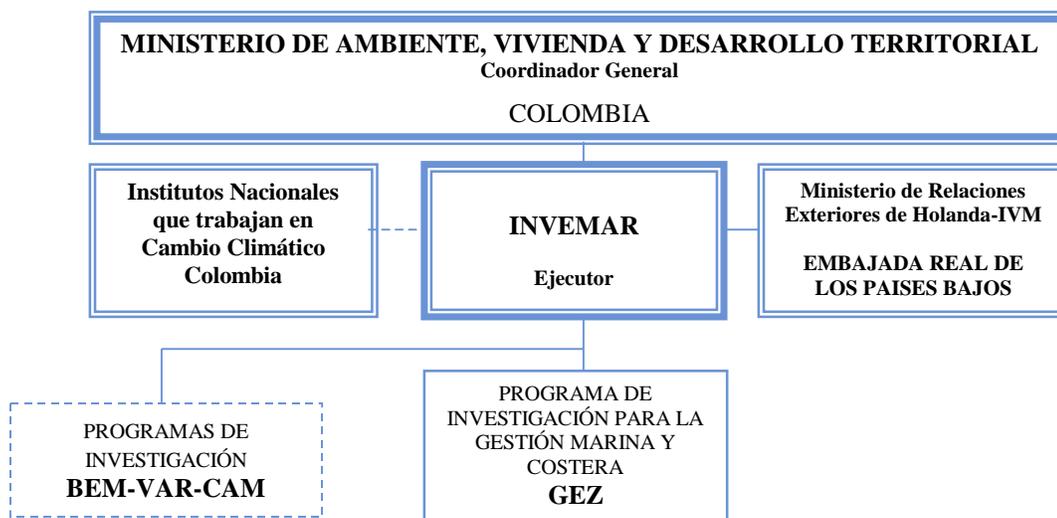


Figura 5 Estructura orgánica del proyecto. BEM: Programa de Investigación en Biodiversidad; VAR: Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos; CAM: Calidad Ambiental Marina.

En contraparte el Programa ha contratado al Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Libre de Ámsterdam (Institute for Environmental Studies -IVM), para supervisar los estudios relacionados en los diferentes países que comparten esta responsabilidad con Colombia, como Bolivia, Costa Rica, Ecuador, Ghana, Kazakhstan, Senegal, Surinam, Butan, Egipto, Nicaragua, Yemen y Vietnam. A diferencia de los países anteriormente mencionados, Colombia cuenta además con el apoyo de la Embajada Real de los Países Bajos con sede en Bogotá. Como complemento y apoyo técnico, el IVM se apoya en el Delft Hydraulics, un instituto independiente con sede en Holanda http://www.vu.nl/english/o_o/instituten/IVM/research/climatechange/intro.htm

2.5 Marco metodológico

El marco metodológico en el que se desarrolla el estudio (Figura 6), es el propuesto por el IPCC (1992), en el cual se adoptan siete pasos generales que proveen una aproximación al análisis de vulnerabilidad (AV) ante un ARNM.



Figura 6. Metodología común (modificada IPCC, 1992)

2.5.1 Paso 1. Definición del área de estudio

El área de estudio es definida como el área para la cual se va a determinar un perfil de vulnerabilidad ante un posible cambio en el nivel del mar. Esta área puede definirse como una región específica dentro del país o como la totalidad del mismo. Si algunas zonas del área de estudio definida son claramente diferentes de otras, se diferencian subregiones dentro del área con el propósito de realizar una evaluación de impactos más cercana a la realidad regional.

Para la definición del área de estudio se deben determinar un límite en tierra y uno en el mar. La extensión tierra adentro del área de estudio debe como mínimo, contener las zonas que serán afectadas físicamente por un posible aumento en el nivel del mar, según los cambios en la probabilidad de inundación, en los patrones de erosión y sedimentación o de la intrusión salina.

Por otro lado, la extensión del área de estudio sobre el mar debe estar basada en los impactos ecológicos del cambio climático sobre los ecosistemas presentes en el área de estudio como: arrecifes de coral, praderas de fanerógamas, estuarios y humedales, manglares, playas y acantilados.

2.5.2 Paso 2. Caracterización e inventario de las características del área de estudio

En este paso se realiza la colección de información secundaria y datos relevantes para caracterizar el área de estudio, teniendo en cuenta tres componentes principales:

- Biofísica (clima, oceanografía, geología, geomorfología, ecosistemas y hábitat, áreas ecológicas especiales, especies nativas, amenazadas y en vías de extinción)
- Socioeconómica (demografía, uso de la tierra y sistemas de producción)
- Gobernabilidad (actores involucrados)

2.5.3 Paso. 3 Identificación de los factores de desarrollo de mayor relevancia y generación de escenarios.

Dentro del concepto de vulnerabilidad, la naturaleza y las actividades humanas juegan un papel fundamental. Lo anterior enmarca la vulnerabilidad del sistema en concordancia con el desarrollo de actividades humanas en el tiempo y en el espacio debido a que la evaluación de impactos se verá influenciada por el desarrollo demográfico y económico de la región.

Por consiguiente, se propone determinar los factores de desarrollo más relevantes dentro del área de estudio para la construcción de un escenario de variables. Algunos de los factores a tener en cuenta son:

- Densidad poblacional (Número de personas)
- Uso de la tierra y actividades productivas relacionadas con:
 - Agricultura
 - Pesca y acuicultura
 - Bosques
 - Minería
 - Turismo y recreación
 - Industria
 - Puertos
- Nivel de inversión de capital relacionado con:
 - Desarrollo urbano y vivienda
 - Edificaciones comerciales
 - Facilidades de producción
 - Facilidades para la construcción de infraestructura y su mantenimiento
 - Valores naturales
- Tipos de ecosistemas y hábitat
- Especies de importancia comercial e industrial

Con respecto a este paso, la metodología común del IPCC recomienda plantear un escenario de variables con un horizonte de tiempo de máximo 30 años, se considera que la proyección realizada para un período de tiempo superior arrojará resultados con un alto margen de incertidumbre.

Igualmente, considera necesario la recolección de información histórica y reciente con el propósito de obtener un rango de tasas de crecimiento real de cada uno de los escenarios de variables realizados.

2.5.4 Paso 4. Evaluación de los cambios físicos y naturales resultantes

El análisis de vulnerabilidad comienza con la cuantificación de cambios físicos y respuestas del sistema natural, seguida de la evaluación de impactos sobre el sistema socio-económico y ecológico, resultante de los cambios y respuestas de los sistemas ante un posible aumento en el nivel del mar.

Los cambios potenciales considerados como consecuencia del posible aumento en el nivel del mar son:

- Desarrollo morfológico de la línea de costa y los planos inundables (erosión y acreción).
- Nivel del agua y frecuencias de aumento o disminución del nivel de mareas, aguas continentales y aguas subterráneas, incrementando el riesgo de inundación de poblaciones costeras.
- Cambios de salinidad de las aguas superficiales y de los cuerpos de agua.
- Pérdida directa de valores económicos y ecológicos como consecuencia de la inundación o pérdida de tierra y hábitat costeros.

2.5.5 Paso 5. Formulación de las estrategias de respuesta, sus costos y beneficios

La formulación de las estrategias de respuesta incluyen: acomodar, proteger o evacuar; La posibilidad de ejecución y el efecto sobre el sistema hacen parte integral de la evaluación de la vulnerabilidad. Por lo tanto, un estimativo de los costos y una evaluación de los efectos de las opciones seleccionadas deben ser incorporados dentro del estudio. Sin embargo, por razones prácticas una primera aproximación debe ser realizada basada en un procedimiento sencillo que considere sólo el número necesario de opciones para ilustrar los efectos. Cada escenario u opción debe considerar al menos dos situaciones: una “sin medidas” de respuesta y otra con una respuesta de “protección total”.

Las situaciones expuestas anteriormente representan los casos extremos. Con el primero se busca determinar el nivel de referencia, en el cual se mostrará el mayor impacto provocado por el ARNM sin ningún tipo de estrategia definida y con un costo nulo. La segunda situación representa el nivel con más alto valor posible, con la respuesta que minimizará los efectos del ARNM a un costo máximo.

2.5.6 Paso 6. Evaluación del perfil de vulnerabilidad e interpretación de resultados

El perfil de vulnerabilidad de una zona costera se realiza en dos etapas. La primera etapa considera la susceptibilidad de los cambios físicos ocasionados debido a un ascenso en el nivel del mar y los impactos socioeconómicos y ecológicos o naturales generados. La segunda etapa esta relacionada con la factibilidad de implementación de las estrategias de respuesta.

La metodología común del IPCC suministra una lista de impactos específicos dentro de los componentes socioeconómico y natural, ocasionados por cambios físicos y por las respuestas del sistema ante el aumento del nivel del mar:

Componente socioeconómico: los impactos socioeconómico se determinan con respecto a tres clases denominadas: valores por pérdida, valores por riesgo y valores por cambio.

Los valores por pérdida se basan en la pérdida de tierra (por área) y de su respectivo capital, expresado en el valor de la tierra en términos de productividad económica y/o inversión de capital y el valor de subsistencia, estimado como la unidad de área en la que determinado número de personas pueden vivir de la tierra.

Los valores de riesgos se expresan como el producto de un valor específico estimado en una determinada zona de riesgo y la probabilidad de que ocurra un evento de inundación en dicha zona (frecuencia de inundación).

Por último, los valores de cambio están relacionados con la intrusión salina y los efectos del manejo de aguas y comprenden: cambios en la producción agrícola, incremento del costo de operaciones, problemas financieros debido a inversiones para la adecuación de infraestructura, entre otros.

Componente natural: los valores de pérdida se expresan en términos de cambios en el hábitat. La evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas está basada en el análisis de la capacidad de respuesta del sistema a los cambios del nivel del mar. Los ecosistemas pueden valorarse en pérdida si la tasa de cambio en el aumento del nivel del mar excede la capacidad natural del sistema para adaptarse.

Componente cultural e histórico: los valores de pérdida de este componente están basados en la pérdida de lugares de gran valor cultural e histórico por unidad de área.

2.5.7 Paso 7. Identificación de los planes de acción

Basados en el trabajo de los seis pasos anteriores, el siguiente paso comprende la elaboración de un plan de acción. Este plan debe proveer a las personas que toman decisiones en el país con conclusiones, recomendaciones y propuestas con el fin de suministrar directrices a corto, mediano y largo plazo en el marco de un programa de manejo de las zonas costeras. Se recomienda que este plan de acción contenga:

- Tipos de herramientas para el manejo de las zonas costeras necesarias para regular los usos funcionales y la explotación sostenible de los recursos.
- Los vacíos de información existentes y la prioridades de investigación a corto y largo plazo.
- Asentamientos y sectores económicos ubicados en áreas vulnerables.

Paso 1. Delimitación del área de estudio

Definición

El “área de estudio”, ha sido definida, como el área dentro de la cual los efectos físicos de un ascenso rápido del nivel del mar debido al cambio climático global, podrían sentirse en el próximo siglo así como, los efectos de inundaciones por desbordes de ríos, precipitaciones y aumentos anómalos del nivel medio del mar.

3 Generalidades sobre Colombia

3.1 Ubicación.

La república de Colombia está ubicada en el extremo noroeste de Suramérica y es el único país en esta región que posee costas sobre el mar Caribe y el océano Pacífico (Figura 7). Limita con Panamá por el noroeste (266 km), por el noreste y el este con Venezuela (2.219 km), por el sureste con Brasil (1.645 km), por el sur con el Perú (1.626 km) y por el suroeste con Ecuador (586 km). La superficie total del territorio incluyendo tanto la porción marítima como terrestre es de 1'141.748 km² que incluyen los territorios insulares marítimos: archipiélagos de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Rosario y San Bernardo, Isla Fuerte y Tortuguilla en el Caribe y las islas Malpelo, Gorgona y Gorgonilla en el Pacífico (UAESPNN, 1998).



Figura 7. Ubicación de Colombia en el Globo.

3.2 Delimitación territorial administrativa.

La Ley 10 de 1978 en el artículo 1° establece que el Mar territorial de la nación colombiana sobre el cual ejerce plena soberanía (Figura 8), se extiende, más allá de su territorio continental e insular y de sus aguas interiores hasta una anchura de 12 millas náuticas o de 22 kilómetros, 224 metros. La soberanía nacional se extiende igualmente al espacio situado sobre el mar territorial, así como al lecho y al subsuelo de este mar (Ley 10/78) (Steer *et al.*, 1997)

El territorio continental (Figura 8), ocupa parte de los hemisferios norte y sur; alcanza los 12° 30' 40" de latitud norte en Punta Gallinas, península de la Guajira (el punto más septentrional de América del Sur), y los 4° 13' 30" de latitud sur en la confluencia de la quebrada de San Antonio en el río Amazonas; por el este, los 66° 50' 54" al oeste de Greenwich en la margen derecha del río Guainía o Negro, frente al “inselberg” denominado Piedra del Cocuy o Cucui, y por el oeste, los 79° 01' 23" al oeste de Greenwich en el Cabo Manglares, departamento de Nariño (UAESPNN, 1998).



Figura 8. Departamentos costeros y límites fronterizos marinos de Colombia (Modificado de IGAC, 2001© 2001 INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI)

3.3 Orografía.

El país posee un sistema orográfico complejo, compuesto principalmente por tres cordilleras que tienen que orientan sus ejes en forma paralela (Figura 9), las cuales son producto de orogenias distintas y separadas unas de otras por valles longitudinales de los ríos Cauca y Magdalena. En la costa Caribe se encuentra el enorme macizo aislado de la Sierra Nevada de Santa Marta. En el norte de la Península de la Guajira hay un conjunto de pequeñas serranías también aisladas: La Carpintera, Corojó, Jarana, Koshinas, Macuira y el cerro del La Teta. Otro conjunto de lomas y cerros bajos, serranías de Piojó y del Caballo, se extienden en el departamento del Atlántico y el extremo norte del departamento de Bolívar, y su máxima altura es de unos 900 m, al sur de la población de Piojó (UAESPNN, 1998).

Adyacente al litoral Pacífico del departamento de Chocó, al norte del delta del río San Juan, existe otro sistema orográfico que ha sido llamado cordillera de la costa o del Chocó. Este sistema consta de serranías Bajas: la del Baudó cuya máxima elevación es el alto del Buey (1.400 m), que se prolonga al norte con la serranía de los Saltos; más al norte hace parte de la frontera colombo-panameña con los altos de Aspave y de Niqué y los cerros de Quía; se prolonga hacia el noreste en Panamá con las Serranías del Limón y Jangururá. Aislada del sistema mencionado se halla la serranía del Darién, que también configura parte del límite colombo-panameño (UAESPNN, 1998).



Figura 9 Sistema orográfico de Colombia

3.4 Hidrografía

El sistema montañoso colombiano determina en términos generales, cuatro grandes vertientes hidrográficas:

Vertiente del Atlántico. – Recoge las aguas de la cordillera Central y de los flancos oriental de la cordillera Oriental. Los ríos de esta vertiente forman en su recorrido, valles longitudinales como los del Cauca y el Magdalena y la llanura del Atrato. Los ríos principales de esta vertiente son: el Magdalena y su afluente el Cauca, el Atrato, el León, el Sinú, el Palomino y el Ranchería.

Vertiente del Pacífico. – Sus ríos cruzan la zona húmeda del Pacífico desprendiéndose del flanco oeste de la cordillera Occidental. Entre sus ríos caudalosos merecen mención el Mira, el San Juan y el Baudó que nace en la Serranía del mismo nombre. En el sur del país se encuentra el río Patía.

Vertiente del río Orinoco. – Comprende esta vertiente los ríos que llevan las aguas de la cordillera Oriental al gran río Orinoco. Por su extensión sobresalen los ríos Meta, Vichada, Arauca, Guaviare Inírida y Atabapo.

Vertiente del Amazonas. – Esta inmensa cuenca hidrográfica está atravesada por numerosos ríos que, después de nacer la Cordillera Oriental, van a dejar sus aguas al Amazonas. Entre ellos el Vaupés el Putumayo, el Guainia, el Caquetá y su afluente el Apaporis (Espinal y Montenegro, 1963).

3.5 Población.

El pueblo colombiano se ha formado de la mezcla de tres grupos humanos a saber: el indio, el español y el negro. El grupo indígena tiene su origen en las culturas aborígenes desaparecidas durante la conquista; estos grupos se mezclaron con los inmigrantes españoles y con las comunidades negras traídas para los trabajos en las minas, originando una serie de tipos raciales representativos. Hoy en día se reconocen cerca de 84 etnias distribuidas principalmente en las costas Caribe y Pacífica y en el área de la Amazonía. El total de la población colombiana asciende, según el Censo de 1993, a 33'109.840 habitantes (DANE, 2001).

Tabla 1 Población Total Censada en 1993, 1985, 1973 y 1964 según grupos de edad. Total Nacional. (DANE, 2001).

Grupos de edad	1993	1985	1973	1964
0-4 años	3,754,870	3,372,139	2,956,465	3,085,747
5-10	3,816,670	3,447,053	3,197,189	2,800,739
10-15	3,840,632	3,228,380	2,978,960	2,269,043
15-19	3,301,436	3,256,833	2,439,783	1,766,040
20-24	3,156,530	3,002,088	1,854,807	1,417,375
25-29	2,977,533	2,418,326	1,390,715	1,165,820
30-34	2,693,270	1,908,203	1,139,617	1,030,298
35-39	2,219,750	1,665,516	1,048,402	924,416
40-44	1,735,926	1,225,138	887,686	718,678
45-49	1,323,815	1,044,624	707,994	592,224
50-54	1,139,501	920,381	608,886	518,298
55-59	855,265	694,691	418,121	331,602
60-64	798,234	578,957	388,126	339,967
65-69	539,716	399,898	233,054	189,549
70-74	417,485	305,425	203,919	148,987
75-79	260,423	184,626	95,565	83,701
80-84	161,961	112,559	64,375	57,134
85 y más	116,823	88,599	53,256	44,892
Total Nacional	33,109,840	27,853,436	20,666,920	17,484,510

4 La Zona Costera colombiana

Colombia es una Nación afortunada que a lo largo de sus 3.882 km² de litorales en los dos océanos y en sus sistemas insulares, presenta todos los tipos ecosistemas marino-costeros posibles de encontrarse en el trópico. Estos ecosistemas tienen la capacidad de proveer bienes y servicios que sostienen las crecientes actividades económicas, así como los diversos usos tradicionales de las comunidades locales (INVEMAR 2001.)

A pesar de esta situación, las nuevas tendencias de desarrollo del país referidas al aprovechamiento de los ecosistemas costeros de la Nación, desarrollan actividades que se justifican más por su rentabilidad a corto plazo y por los beneficios que producen para sectores particulares, que por los beneficios que aportan en el largo plazo para la calidad de vida de la sociedad colombiana. Como consecuencia, se ha observado un desordenado progresivo y creciente turismo pobre en planificación sobre la línea de costa, un aumento en la contaminación a lo largo de los tramos más densamente poblados y fuertemente explotados, erosión de la línea costera, degradación y pérdida de hábitat y disminución progresiva de la pesca. Estos problemas se deben además a una

mala planificación del uso nocivo de los recursos costeros, sobrecarga de la capacidad de sustentación y a un manejo, monitoreo y vigilancia deficientes por parte del sector público (MMA, 2001).

Frente a este reto, el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, partiendo de unos elementos y objetivos generales establecidos en la Constitución Política y en las funciones asignadas en la Ley 99 de 1993 relacionadas con la formulación, concertación y adopción de las políticas orientadas al ordenamiento ambiental del territorio costero y de los mares adyacentes, promovió desde mediados de 1996 la formulación de La *Política Nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia* (PNAOCI). Esta Política recoge todos los aportes recibidos por parte de los diferentes actores y sectores involucrados el tema del ordenamiento ambiental de las zonas costeras, insulares y mares adyacentes.

“Se fundamenta en la promoción de la utilización de las herramientas que nos brinda el ordenamiento territorial para asignar usos sostenibles al territorio marítimo y costero nacional, a propiciar formas mejoradas de gobierno que armonicen y articulen la planificación del desarrollo costero sectorial, a la conservación y restauración de los bienes y servicios que proveen sus ecosistemas, a la generación de conocimiento que permita la obtención de información estratégica para la toma de decisiones de manejo integrado de estas áreas y a impulsar procesos de autogestión comunitaria y de aprendizaje que permitan integrar a los múltiples usuarios de la zona costera en la gestión de su manejo sostenible” (MMA, 2001).

4.1 Definición

Según la política la zona costera colombiana es:

“Una entidad geográfica del territorio nacional definida y separada con características naturales, demográficas, sociales, económicas y culturales propias y específicas. Está formada por una franja de anchura variable de tierra firme y espacio marítimo en donde se presentan procesos de interacción entre el mar y la tierra”. En ella se desarrollan actividades como la pesca, el turismo, la navegación, el desarrollo portuario, la explotación minera y donde se dan asentamientos urbanos e industriales muy importantes; es un recurso natural único, frágil y limitado del país que exige un manejo adecuado para asegurar la conservación, su desarrollo sostenible y la preservación de los valores culturales de su población” (MMA, 2001)

Se discriminan entonces dos tipos de zona costera en el país: La *Zona Costera Continental* y la *Zona Costera Insular* (MMA, 2001).

4.2 Delimitación

La zona costera continental, esta constituida por tres subzonas o franjas paralelas de delimitación que conforman en su conjunto la zona costera continental. En su eje longitudinal, esta zona es un continuo de subregiones costeras que se extiende a lo largo de los 3.882 kilómetros del perímetro litoral de la Nación. Dichas subzonas siempre incluyen el espacio aéreo que se encuentra por encima del mar o del continente emergido, el lecho marino y el suelo, así como el subsuelo tanto para los dominios oceánicos y terrestres comprendidos en la zona costera. ||

1. SUBZONA MARITIMO-COSTERA O FRANJA DE MAR AFUERA: Es la banda de ancho variable comprendida entre la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP) y el margen externo de la plataforma continental (Figura 10), correspondiendo este margen al borde continental donde la pendiente se acentúa hacia el talud y el fondo oceánico abisal. Para efectos de su delimitación se ha determinado convencionalmente este borde para la isóbata de 200m. En los casos en que la plataforma se vuelve extremadamente angosta como frente a Bocas de Ceniza, el sector de Santa Marta en la Región Caribe, o el sector comprendido entre cabo Corrientes y la frontera con la República de Panamá en la Región del Pacífico, esta banda se fijará entre la Línea de Marea Baja

Promedio (LMBP) y hasta una línea paralela localizada a 12 millas náuticas de distancia mar adentro. Las áreas insulares como el archipiélago de Islas del Rosario, Islas de San Bernardo, Isla Fuerte e Islas de Gorgona y Gorgonilla, localizadas sobre la plataforma continental, están incluidas en esta subzona.

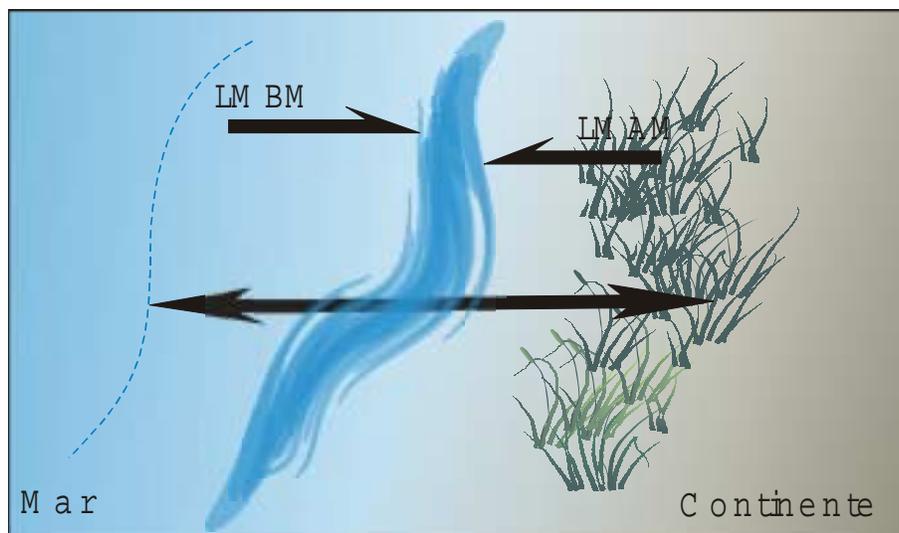


Figura 10. Delimitación de la zona costera. LMAM: Línea de Marea Alta Promedio; LMBM: Línea de Marea Baja Promedio.

El ancho mínimo de 12 millas náuticas para esta subzona no corresponde a una medida arbitraria, es la banda de territorio marino adyacente al territorio emergido continental donde se concentra el transporte marítimo de cabotaje, la pesca marítima artesanal, toda la actividad marítima portuaria, los principales impactos de la contaminación marina proveniente de fuentes terrestres, los deportes náuticos y el acuaturismo marino, entre otras actividades, y es consecuente con la obligación jurídica del Estado de proteger soberanamente el mar territorial.

2. SUBZONA DE BAJAMAR Ó FRANJA DE TRANSICIÓN: Es la banda comprendida entre la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP) y la Línea de Marea Alta Promedio (LMAP). El ancho de esta subzona está básicamente condicionada por el rango de amplitud mareal (4 metros promedio en la costa Pacífica, 0.5 metros en el litoral Caribe) y la pendiente de la costa o la topografía de los terrenos emergidos adyacentes a la línea de costa.

3. SUBZONA TERRESTRE-COSTERA Ó FRANJA DE TIERRA ADENTRO: Es la banda comprendida desde la Línea de Marea Alta Promedio (LMAP), hasta una línea paralela localizada a 2 km de distancia tierra adentro. Corresponde a la definición jurídica vigente de “Costa Nacional” (Artículo 1° del decreto 389 de 1931 y ratificado en los decretos No. 2324 de 1984 y No. 2663 de 1994).

Sin embargo, cuatro criterios deberán siempre cumplirse para delimitar geográficamente el área terrestre de la zona costera colombiana:

a.) Deberá incluirse en esta subzona, el 100% de la cobertura espacial de los bosques de manglar y de los bosques de transición localizados inmediatamente después (natal y pangal para el caso de la Región Pacífica colombiana y llanura aluvial del río Atrato). Así entonces la banda de los 2 km deberá fijarse a partir del borde externo del bosque de manglar en el Caribe y del bosque de transición en el Pacífico.

b.) El límite externo de esta banda deberá localizarse para el caso de lagunas costeras sin bosques de manglar asociados, a 2 km a partir de la línea de cota máxima de nivel en el orilla exterior del sistema lagunar. El límite interno corresponde igualmente a la LMAP.

c.) Deberán siempre incluirse dentro de esta subzona los terrenos emergidos de todas las áreas declaradas como Unidades de Reserva (marino-costeras) pertenecientes a las áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales y su correspondiente zona amortiguadora (se exceptúa el Parque Nacional Natural de la Sierra Nevada de Santa Marta).

d.) Todos los centros urbanos costeros que se extienden más allá de 2 km desde la LMAP, deberán estar incluidos en toda su extensión en esta subzona. En este caso, el límite terrestre de esta subzona se fijará a 2 km desde el borde más externo del perímetro urbano.

La Zona Costera Insular está conformada por el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, siendo el territorio insular oceánico más septentrional del mar Caribe colombiano y la Isla de Malpelo y sus diez islotes, como la posición territorial más occidental sobre el océano Pacífico.

Así entonces se establecen como límites de la zona costera del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina los siguientes (MMA, 2001):

1. SUBZONA EMERGIDA: Comprende todo el territorio isleño emergido (islas y cayos) utilizando como referente la Línea de Marea Alta Promedio (LMAP).

2. SUBZONA DE BAJAMAR Y DE LA TERRAZA ARRECIFAL: Es la banda comprendida entre la Línea de Marea Alta Promedio (LMAP), la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP) y el borde externo de la terraza prearrecifal coralina correspondiente a la isóbata de los 100 metros. El ancho de esta subzona está básicamente condicionada por el desarrollo de la terraza arrecifal, lagunar y prearrecifal del ecosistema coralino insular.

3. SUBZONA MARITIMO-COSTERA O FRANJA DE MAR AFUERA: Es la banda comprendida desde el borde externo de la terraza prearrecifal coralina correspondiente a la isóbata de los 100 metros, hasta una línea paralela localizada a 12 millas náuticas de distancia mar adentro.

Los límites de la zona costera de la isla de Malpelo son los siguientes:

1. SUBZONA EMERGIDA: Comprende todo el territorio emergido (isla y rocas), utilizando como referente la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP).

2. SUBZONA MARITIMO-COSTERA O FRANJA DE MAR AFUERA: Es la banda comprendida desde la Línea de Marea Baja Promedio (LMBP), hasta una línea paralela periférica localizada a 12 millas náuticas de distancia.

Las tres grandes regiones oceánicas y costeras colombianas, ofrecen elementos biofísicos, sociales, económicos y culturales que las hacen unidades geográficas substancialmente diferentes entre sí, a pesar de los elementos comunes que comparten como su identidad nacional, por lo cual se han establecido Unidades Integrales de Planificación y Ordenamiento Ambiental Territorial con base a los ecosistemas como espacio fundamental de ordenamiento.

4.3 Ordenamiento ambiental territorial

Las tres grandes regiones costeras colombianas: Pacífica (incluyendo la plataforma, islas continentales y espacios oceánicos), Caribe continental (incluyendo la plataforma, islas continentales y espacios oceánicos); y Caribe insular (archipiélago San Andrés, Providencia, Santa Catalina, los cayos y sus áreas marinas, submarinas y

plataforma arrecifal), ofrecen elementos biofísicos, sociales, económicos y culturales que las hacen unidades geográficas substancialmente diferentes entre sí, a pesar de los elementos comunes que comparten como su identidad nacional.

En el país se establecen diez Unidades Ambientales Costeras (Figura 11 y 12) que en conjunto con las de carácter oceánico - UAOC's -, constituyen los espacios oceánicos y la zona costera nacional, así (MMA, 2001):

REGIÓN CARIBE INSULAR

Unidad Ambiental Caribe Insular: Comprende todo el territorio del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, los terrenos emergidos así como los recursos de la plataforma arrecifal y prearrecifal. y los espacios oceánicos.

REGIÓN CARIBE CONTINENTAL

Unidad Ambiental Costera de la Alta Guajira: Desde Castilletes (frontera con Venezuela) hasta la boca del río Ranchería en el departamento de la Guajira.

Unidad Ambiental Costera de la Vertiente Norte de La Sierra Nevada de Santa Marta: Desde la boca del río Ranchería (inclusive) hasta la boca del río Córdoba (inclusive) en el departamento del Magdalena.

Unidad Ambiental Costera del Río Magdalena. Complejo Canal del Dique - Sistema Lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Desde la boca del río Córdoba y hasta el delta del Canal del Dique (inclusive) en el departamento de Bolívar. Incluye el archipiélago de Islas del Rosario.

Unidad Ambiental Costera Estuarina del río Sinú y el golfo de Morrosquillo: Desde el delta del Canal del Dique hasta punta Caribaná en el departamento de Antioquia. Incluye el archipiélago de Islas de San Bernardo.

Unidad Ambiental Costera del Darién: Desde punta Caribaná hasta cabo Tiburón (frontera con Panamá) en el departamento del Chocó.

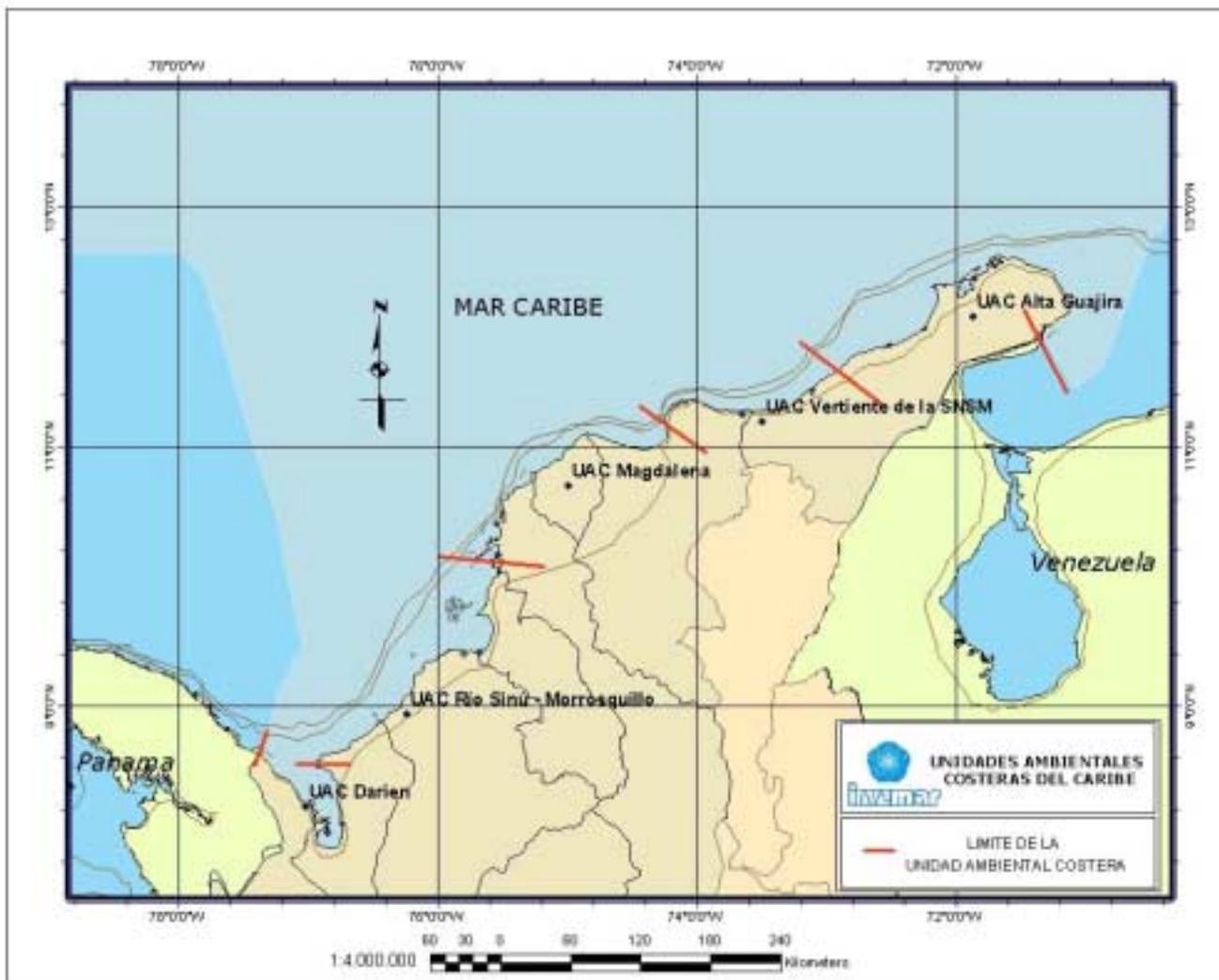


Figura 11 Ubicación de la Unidades Ambientales Costeras del Caribe colombiano

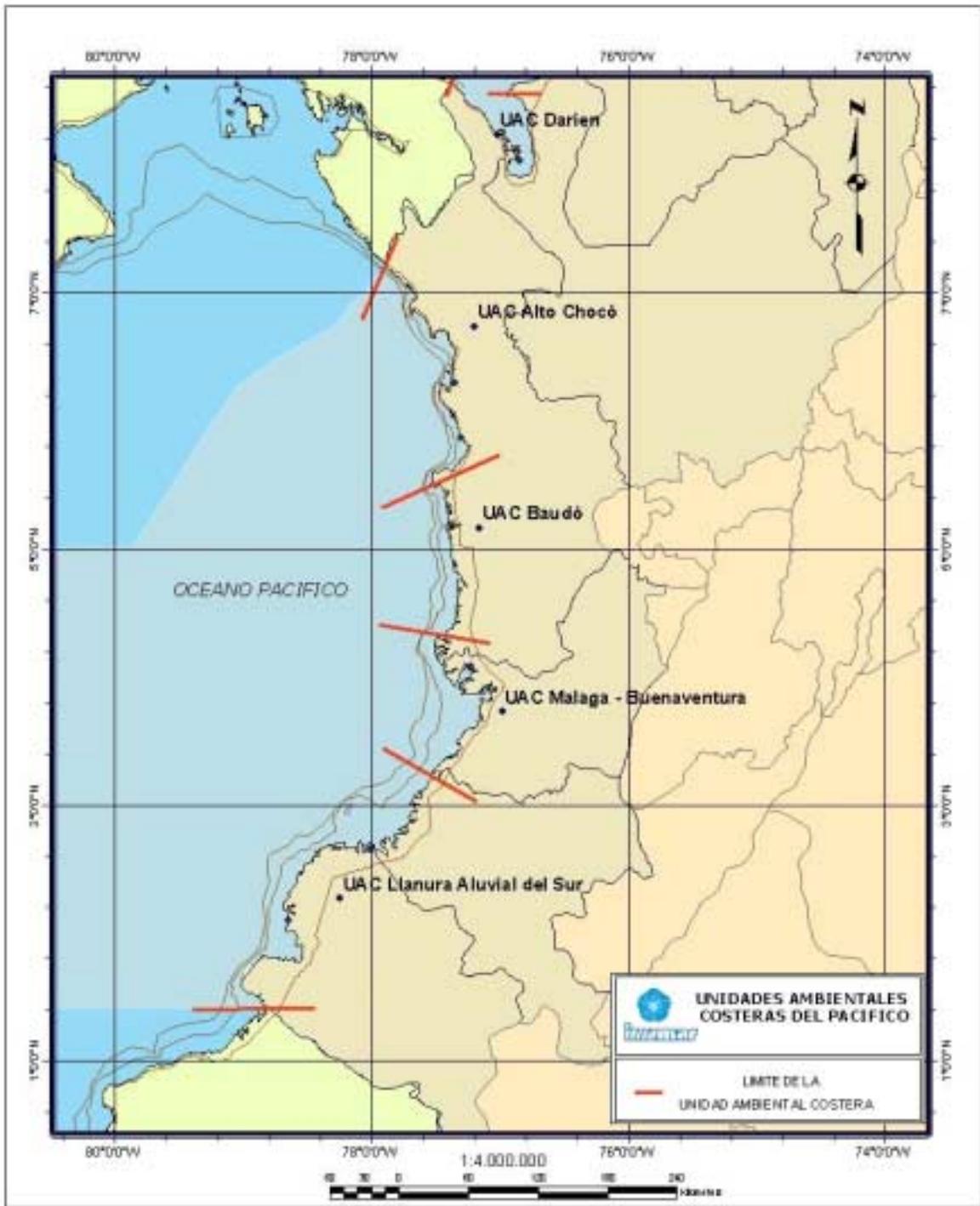


Figura 12. Ubicación de las Unidades Ambientales Costeras de la costa del Pacífico

REGION PACIFICO

Unidad Ambiental Costera del Alto Chocó: Desde la frontera con Panamá (Hito Pacífico) hasta cabo Corrientes en el departamento del Chocó.

Unidad Ambiental Costera del Frente Río Baudó - Río Docampadó: Desde cabo Corrientes hasta el delta del río San Juan en el departamento del Chocó.

Unidad Ambiental Costera del Complejo de Málaga - Buenaventura: Desde el delta del río San Juan (inclusive) hasta la boca del río San Juan de Micay en el departamento del Cauca.

Unidad Ambiental Costera de la Llanura Aluvial Sur: Desde la boca del río San Juan de Micay (inclusive) hasta la boca del río Mataje (Hito Casas Viejas - Frontera con Ecuador) en el departamento de Nariño. Incluye las islas de Gorgona y Gorgonilla.

5 Área de estudio

5.1 Ubicación

Con el fin de observar el máximo impacto causado por un eventual levantamiento del nivel del mar en las costas colombianas, se escogió un área de estudio sobre la totalidad de las costas Caribe continental e insular y Pacífico de Colombia.

5.2 Longitud litoral

La costa Caribe colombiana tiene una longitud de línea de costa de 1642 km en la región continental y 52 km en la región Insular. Está localizada entre la zona norecuatorial del mar Caribe suroccidental. Limita al oeste con la frontera panameña, en la zona de cabo Tiburón ($18^{\circ}41'$ latitud Norte y $77^{\circ}19'$ longitud oeste) y en su extremo oriental con Venezuela en la zona de Castilletes ($11^{\circ}50'N$ y $71^{\circ}18'O$) (Steer *et al.*, 1997)

La costa Pacífica colombiana está ubicada dentro de la zona del Panamá Bight definida como “Región del Pacífico Oriental Tropical”. Cuenta con una extensión cercana a 2188 km y se ubica en la región occidental de Colombia, siendo sus coordenadas geográficas: la hoya del río Juradó a $7^{\circ}28'$ latitud norte y al sur la hoya del río Guáitara a $0^{\circ}14'N$ orte, al oriente el nacimiento del río San Juan a $75^{\circ}51'O$ este y en el occidente, la desembocadura del río Mira en cabo Manglares a $79^{\circ}02'O$ este (Prah *et al.*, 1990).

También forma parte del territorio nacional el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina diseminado en el mar Caribe entre los 12° y $16^{\circ}30'$ de latitud norte y los 78° y 82° de longitud oeste de Greenwich. San Andrés, Providencia y Santa Catalina son las islas principales del archipiélago, con una longitud de costa de 52 km y un área emergida de 62 km^2 .

5.3 Límites

Para elegir los límites terrestres y marinos de esta área de estudio se evaluaron criterios físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos al igual que la disponibilidad de la información concerniente a los mismos. En la tabla 2 se hace un listado estos criterios:

5.3.1 Limite terrestre

El límite terrestre del área de estudio debió ser enmarcado de forma tal que abarcara todas las áreas físicas vulnerables ante un eventual levantamiento del nivel del mar, dentro del máximo escenario propuesto en la actualidad, de 0.09 m a 0.88 m entre 1990 y 2100 (IPCC, 2001). El primer acercamiento hacia la definición de este límite, se llevó a cabo al interior de varias discusiones entre expertos de diferentes disciplinas



pertenecientes al grupo de trabajo del proyecto en el INVEMAR. La primera aproximación realizada, fue demarcar un límite coincidente con la delimitación política y administrativa de Colombia y consecuentemente, con el límite externo de los municipios costeros. Sin embargo, esta primera aproximación, abarcó un área demasiado amplia y con características físicas que probablemente no se verán directamente afectadas por un eventual ascenso rápido en el nivel del mar.

Tabla 2 Criterios de evaluación para la elección del área de estudio.

Físicos	Biológicos	Sociales	Económicos	Político-Administrativos
Fenómenos meteorológicos Intrusión salina Erosión y/o acesión Subsidencia Mareas Corrientes Movimientos tectónicos	Extensión de los ecosistemas costeros que dependen del mar Extensión máxima de los ecosistemas arrecifales	Extensión de los asentamientos humanos costeros Límites político administrativos Identidad étnica y cultural costera	Infraestructura (puertos, vías, sistema eléctrico, industria) Zonas de ganadería Zonas agrícolas Zonas de pesca y acuicultura Turismo Zonas de extracción minera Zonas de extracción maderera	PNAOCI Jurisdicción de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible Límites político-administrativos Presencia de áreas protegidas Límites y tratados internacionales

Una segunda aproximación, fue la elección de una cota de altura disponible y representada en la cartografía de la zona costera colombiana; los mapas cartográficos proporcionados por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) a escala 1:100.000, muestran una cota mínima de 50 m, razón por la cual se hará necesario el levantamiento topográfico de cotas de nivel mucho más finas para algunas zonas, que dentro del grupo de trabajo, sean determinadas como críticas. Sin embargo, la elección de una cota de nivel de 60 m, encierra un área lo suficientemente extensa y apropiada para realizar una posible delimitación del área de estudio.

Desde el punto de vista geológico y geomorfológico, se considera que el límite de 60m, sería apropiado debido a la conveniencia de su representabilidad en mapas, a una mayor cantidad y calidad de la información sedimentológica disponible: fallas, fracturas geológicas, epicentros sísmicos y diapirismo, entre otros. Este tipo de información, visto desde el nivel de escala propuesto, proporcionará valiosas herramientas en el momento de realizar aproximaciones de las consecuencias causadas por un ARNM.

Dentro de muchos estudios análogos al presente y llevados a cabo en otros países, se demuestra que los fenómenos de intrusión salina sobre los ríos, pueden llegar a aumentar la amplitud de la delimitación del área de estudio; sin embargo se considera que los efectos de este fenómeno, no tendrán impacto en zonas más allá del límite escogido trazado por la curva de nivel de los 60m y por lo tanto se considera que la elección de límite terrestre basado en esta curva, resulta apropiado para la presente evaluación.

5.3.2 Límite marino

El límite inferior de la línea batimétrica de 200m que bordea ambas costas colombianas, fue escogido debido a que desde el punto de vista oceanográfico, la caracterización de una zona marina específica obedece a un conjunto de parámetros físicos que involucra, corrientes, vientos, variaciones de temperatura, salinidad y otros. Estos parámetros y su variabilidad normalmente no obedecen a fenómenos de orden local y más bien están sujetas a condiciones de orden regional. El límite marino de 200m, aparece como el más indicado, porque en las costas colombianas, abarca áreas suficientes para la descripción de las condiciones oceanográficas de la subzona marítimo costera o franja mar afuera.

De igual forma se tuvo en cuenta el concepto de plataforma continental, terminología adoptada desde 1952, y ratificada por la Convención de Ginebra de 1958 (Art. 1º) que designa “El lecho del mar y el subsuelo de las

6 Áreas caso de estudio

6.1 Golfo de Morrosquillo

La primera área caso de estudio escogida para realizar un análisis más detallado de la vulnerabilidad de la zona costera colombiana ante un posible ascenso en el nivel del mar, se encuentra enmarcada dentro de la Unidad Ambiental Costera Estuarina del Río Sinú y el Golfo de Morrosquillo. Esta Unidad está conformada por un mosaico de ecosistemas continentales, costeros, insulares y marinos que se extiende aproximadamente 260 km en dirección suroeste-noreste desde punta Arboletes, en límites entre los departamentos de Córdoba y Antioquia, hasta punta San Bernardo en el municipio de San Onofre (Sucre).

Esta zona del Caribe colombiano incluye el litoral de los departamentos de Sucre y Córdoba, la isla de Tortuguilla e isla Fuerte y el archipiélago de islas de San Bernardo. En esta unidad se diferencian dos subunidades fisiográficas; la Suroeste localizada desde el delta de Tinajones (desembocadura del río Sinú), hasta punta Arboletes en los límites con el departamento de Antioquia (comprende los municipios de San Bernardo del Viento, Moñitos, Broqueles, Río Cedro, Cristo Rey, Puerto Escondido y Los Córdoba); y la Subunidad Noreste que comprende todo el sistema del golfo de Morrosquillo (municipios de San Antero, Tolú y San Onofre), seleccionada para servir de área caso de estudio del proyecto (INVEMAR, 2002).

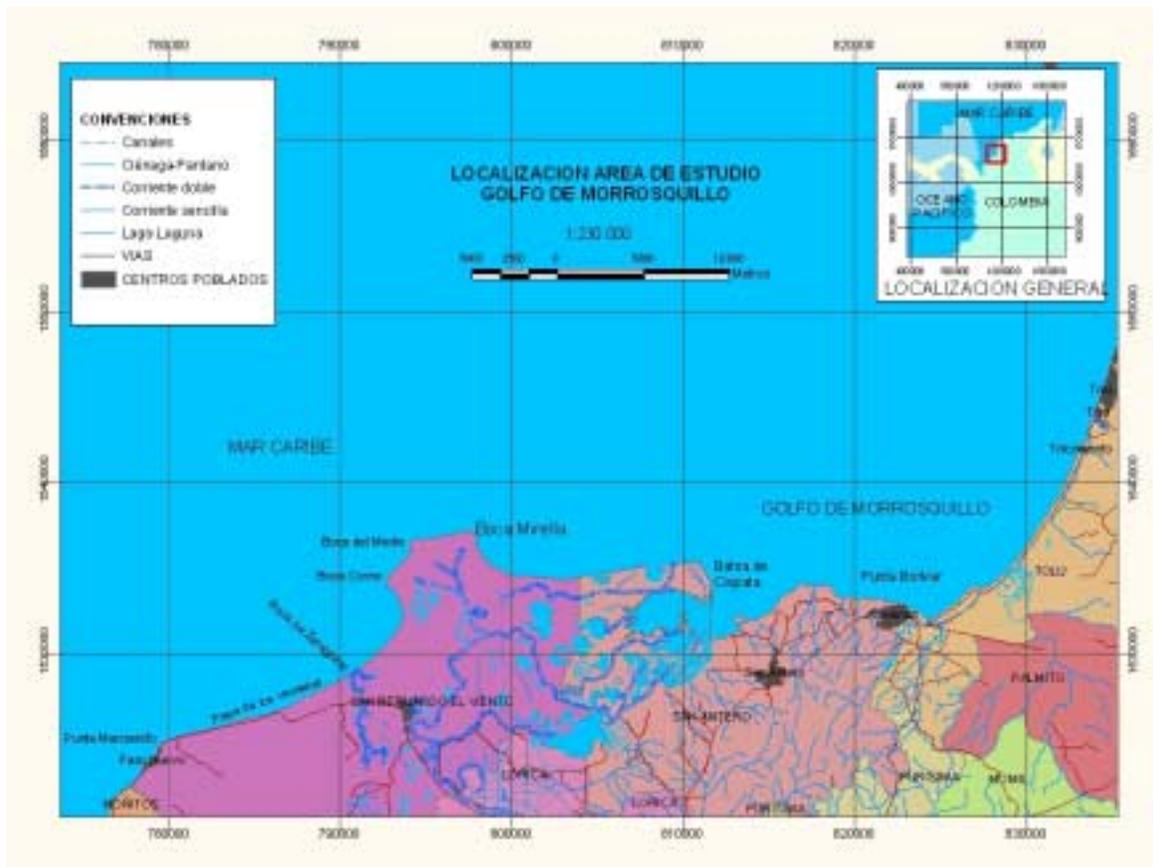


Figura 15. Localización del área caso de estudio. Golfo de Morrosquillo.

6.1.1 Localización

El golfo de Morrosquillo se encuentra ubicado en el sector meridional de la costa Caribe colombiana, entre los departamentos de Córdoba y Sucre (Figura 15), con un área aproximada de 1000 km² y con profundidades entre los 15 y 55 m. Morfológicamente está constituido hacia la zona central por una extensa llanura costera que limita al norte y al sur con dos cuerpos de terrazas coralinas. En la zona suroeste se encuentra la desembocadura del río Sinú, cuya evolución y dinámica dependen de los procesos fluviales y marinos especialmente por regímenes de olas y mareas (INVEMAR, 2001). La zona caso de estudio cubre la parte sur del golfo de Morrosquillo desde la cabecera municipal de Tolú hasta la punta La Rada, y se encuentra entre coordenadas geográficas de 9° 18' 00" y 9° 36' 50" de Latitud Norte, y entre 75° 34' 50" y 76° 08' 30" de Longitud Oeste.

6.2 Unidad de Manejo Integrado Guapi – Iscuandé

La segunda área de estudio escogida para evaluar la vulnerabilidad ante un posible ascenso en el nivel del mar de la zona costera, es la Unidad de Manejo Integrado Guapi – Iscuandé (UMI-Guapi-Iscuandé) ubicada en el Pacífico colombiano³. La problemática de esta área es similar a la de todo el Pacífico, en donde es común el desordenado aprovechamiento de los recursos de la zona costera, estimulado por los procesos de explotación intensiva, la cual se lleva a cabo de una forma acelerada y sin planificación, causando erosión de la base natural productiva y problemas sociales, económicos y ambientales. Las mayores presiones en este sector obedecen a los aprovechamientos forestales, pesqueros y mineros, de allí la relevancia que tiene como área caso de estudio (INVEMAR, 2001).

6.2.1 Localización y delimitación

El área de estudio, UMI Guapi-Iscuandé, comprende las tres subzonas, que han sido establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente en PNAOCI (2001) (Figura 16).

- **Subzona marítimo-costera o franja de mar afuera:** comprendida entre la línea de marea baja promedio y el margen externo de la plataforma continental, el cual se encuentra localizado a 55 km de distancia mar adentro, justamente detrás del borde más externo de la isla Gorgona.
- **Subzona de bajamar o franja de transición:** corresponde a la banda comprendida entre la Línea de Marea Baja Promedio y la Línea de Marea Alta Promedio. El ancho de esta subzona esta básicamente condicionada por el rango de amplitud mareal que es de 3,7 metros en promedio y la escasa pendiente de la costa cuya topografía corresponde a terrenos emergidos bajos. En esta subzona se encuentran ubicados los bosques de manglar.
- **Subzona terrestre-costera o franja de tierra adentro:** corresponde a la banda comprendida desde la Línea de Marea Alta Promedio, hasta una línea paralela localizada tierra adentro, la cual fue trazada tomando como puntos de enclave, la quebrada Temuey a 40 km aproximadamente de la cabecera municipal de Guapi y quebrada Baltazar ubicada aproximadamente 3 kilómetros desde la cabecera municipal de Santa Bárbara de Iscuandé, incluyendo los bosques de transición.

³ Ver Mapas Caso de estudio UMI Guapi – Iscuandé. Atlas Digital ANM Colombia.



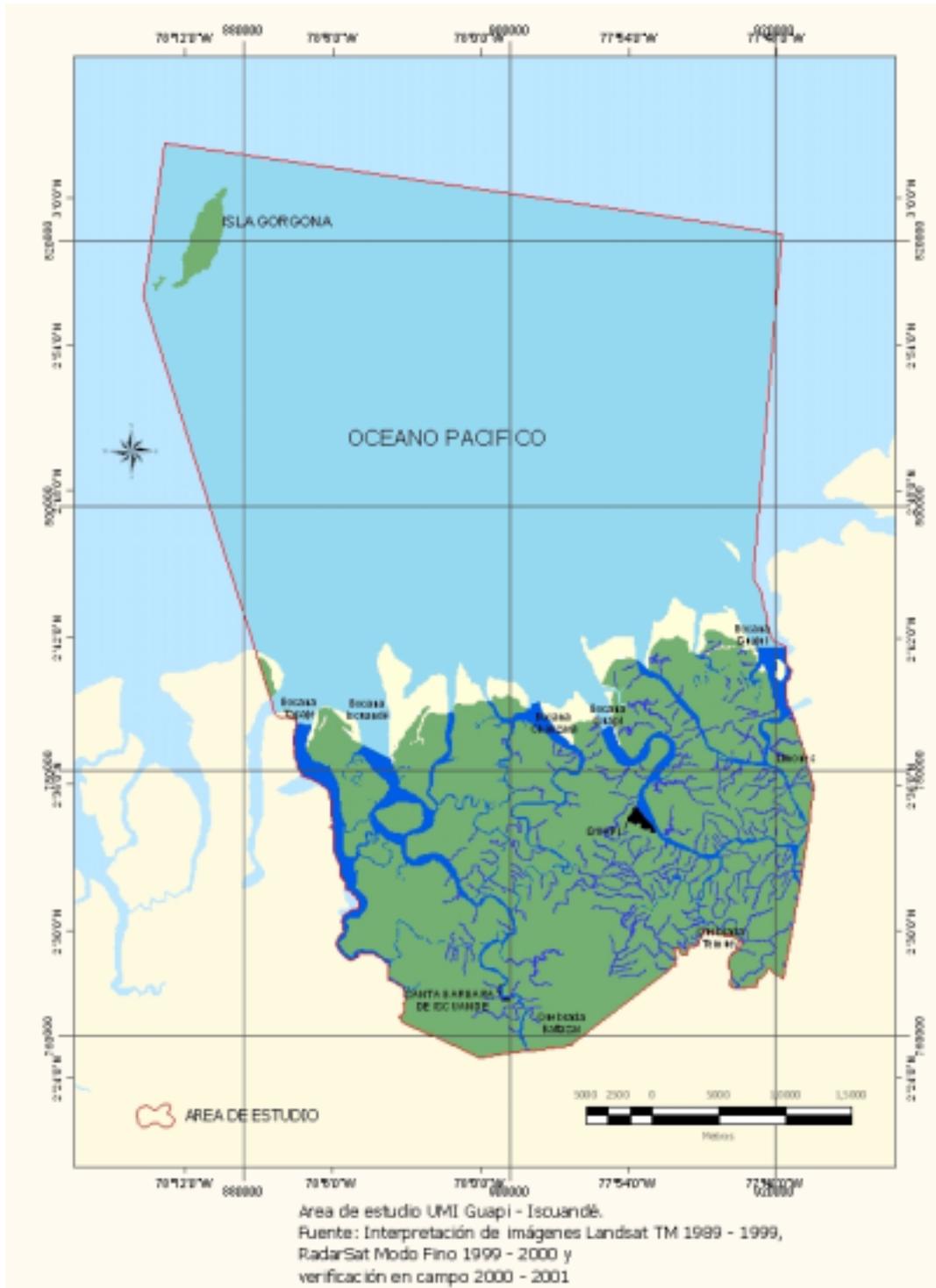


Figura 16. Ubicación y delimitación del área caso de estudio Guapi-Iscuandé



Evaluación de escenarios climáticos

Factores climáticos relevantes

Este capítulo es en esencia, un análisis de los datos obtenidos en las estaciones de la red meteorológica del Instituto de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Medio Ambiente (IDEAM), en algunas ciudades costeras del Caribe colombiano y su análisis dentro del contexto regional propuesto por el grupo trabajo conformado para examinar las implicaciones del cambio climático en el mar Intra-americano (el mar Caribe y Golfo de México y el Estrecho de Florida) en 1993, lo que compone la gran mayoría de la bibliografía aquí citada, principalmente la síntesis ofrecida en Maul (1993).

Esta síntesis fue realizada con el objeto de examinar los diferentes escenarios propuestos de temperatura en WMO/ICSU/ UNEP (1986) de 1.5° C y 20 cm de incremento del nivel relativo del mar (NRM) para el 2025. Se hace referencia específica al aumento de temperatura ambiente y de las variaciones del nivel medio del mar en las costas colombianas.

7 El aumento de 1.5° C en la temperatura ambiental

Los datos para verificar el aumento de la temperatura superficial del mar en Colombia de 1.5°C para el año 2025 resultan escasos, siendo necesario analizar registros de temperatura ambiente en Key West como representativa de la región (Hanson y Maul, 1993). El registro de 136 años evidencia un calentamiento ocurrido entre 1890-1950, sin embargo, los últimos 30 años han permanecido más o menos estables en +0.3 °C sobre la tendencia lineal de largo periodo. Un análisis similar de la temperatura ambiente de los reportes de los buques en el estrecho de la Florida, muestra que no hay desviación consistente sobre la media. Gray (1993) encontró que la temperatura máxima en Jamaica y en Trinidad y Tobago se ha incrementado en los últimos diez años, pero la evaporación ha decrecido (lo cual es inconsistente con el aumento de temperatura), y no es claro si estos cambios son debidos al cambio climático o a otros factores. Aparicio (1993) reporta una tendencia en la temperatura ambiente de +0.1° C por década en Venezuela, pero otros datos de buques de observación voluntaria en el mar Caribe central sugiere que la temperatura ha descendido desde 1950. La extrapolación lineal traída a este caso de estudio lo lleva a uno a visualizar un aumento en la temperatura ambiental en la región, pero 1.5° C parece demasiado alto; menos de 1° C de aumento para el 2025 parece ser un escenario mas plausible de nuestra temperatura ambiente futura.

7.1 Metodología

Los datos de precipitación y temperatura ambiente de las estaciones meteorológicas de los aeropuertos de Barranquilla, Cartagena, Corozal y San Andrés Isla, fueron caracterizados en el tiempo para observar las tendencias de estos parámetros sobre la costa colombiana, teniendo como estación de contraste la de San Andrés que no responde a la misma dinámica costera.

Los datos aquí analizados fueron provistos por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). La base de datos la componen la media mensual multianual de la precipitación y la temperatura ambiente que van desde 1941 hasta 1994, no siendo igual en todas las estaciones. Para esta evaluación no se tuvieron suficientes elementos de juicio que permitieran evaluar la cantidad de datos sinópticos con los que se calcularon los valores medios diarios y tampoco el criterio sobre cuantos días fueron considerados suficientes para entregar una media mensual. Por esta razón es importante advertir que los resultados producto de este análisis deben verse con precaución ya que las series son cortas (alrededor de 40 años en la mayoría de los casos) y que variabilidad del clima tiene pulsos mayores. Sin embargo, fue interesante observar que los datos tienen tendencias definidas y que los errores digitales fueron obvios y fácilmente detectables.



Para cada serie se calculó el ajuste lineal para observar la tendencia en el largo plazo y se ajustó un polinomio de grado 10 con el objeto de visualizar variaciones intra-decadales. Finalmente a cada serie se le aplicó un promedio corrido con una ventana de 21 puntos (dos años aproximadamente) con el objeto de filtrar la variabilidad estacional y de observar la variabilidad interanual. Las series fueron graficadas e interpretadas desde esos tratamientos individualmente.

7.2 Análisis de los datos climáticos

El clima de la zona costera colombiana esta modulado por el movimiento estacional de la Zona de Convergencia Inter-tropical, una cinta de baja presión que se encuentra alrededor del globo cerca del ecuador y que se mueve meridionalmente (Pujos *et al.*, 1997), encontrándose más al sur alrededor de 5° S en América durante el invierno boreal y con influencia hasta 15° N durante el verano boreal, que coincide con la época de lluvias o la llegada del Monzón Americano, al Caribe Suroccidental,. Las dos estaciones tropicales y en general la variabilidad climática del trópico es claramente definible en términos de la temperatura ambiental y la precipitación. En la estación seca la precipitación obviamente es poca y la intensidad de los vientos aumenta, haciendo que la temperatura ambiente sea menor. Durante la estación de lluvias ocurren las máximas precipitaciones y la ausencia de vientos hace que la temperatura ambiental sea mayor, Andrade (2000).

7.3 Resultados del análisis de la precipitación

La media mensual multianual de la precipitación en Barranquilla (Figura 18) muestra los picos agudos anuales correspondientes a la época húmeda de cada año. La media representa el clima semiárido tropical de la zona. La tendencia lineal de los años 1942-1994 es de un aumento de 36mm cada 10 años. Nótese los años 1954 y 1959 fueron extremadamente lluviosos.

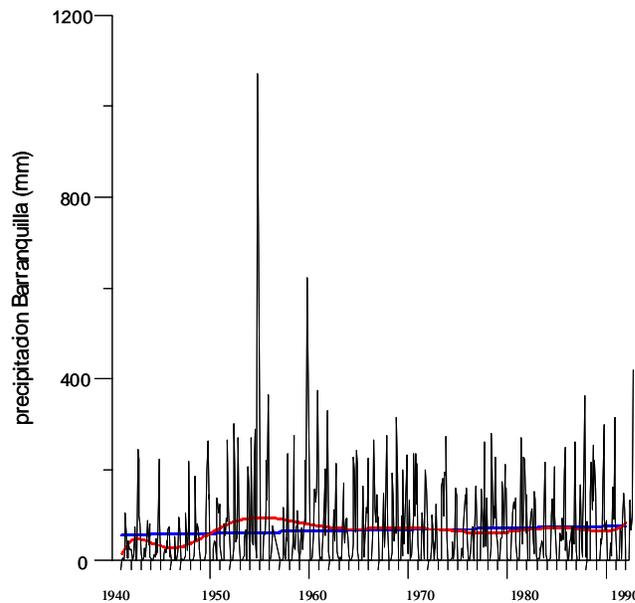


Figura 18. Media mensual multianual de la precipitación en Barranquilla con base en datos del IDEAM. Los picos agudos anuales son los correspondientes a la época húmeda de cada año, modulada por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical. La media representa el clima semiárido tropical de la zona. La tendencia lineal de los años 1942-1994 es de un aumento de 36mm cada 10 años. Nótese los valores extremos en 1954 y 1959.

La media mensual multianual de la precipitación en Cartagena (Figura 19) muestra una tendencia lineal de los años 1942-1994 aumentando 78 mm cada 10 años, el doble de lo observado en Barranquilla y fueron notables los valores extremos en 1945, 1947, especialmente en 1962, 1979 y 1986.

La media mensual multianual de la precipitación en Corozal, la estación meteorológica mas próxima al golfo de Morrosquillo (Figura 20) tiene una tendencia lineal de los años 1942-1994 de aumento de 54 mm cada 10 años. Fueron particularmente intensas las lluvias en 1948, 1955, especialmente en 1957 y 1968, muy poca

alteración en los años 1970s y hasta finales de los 1980s cuando ocurrieron intensas épocas de lluvias hasta 1992.

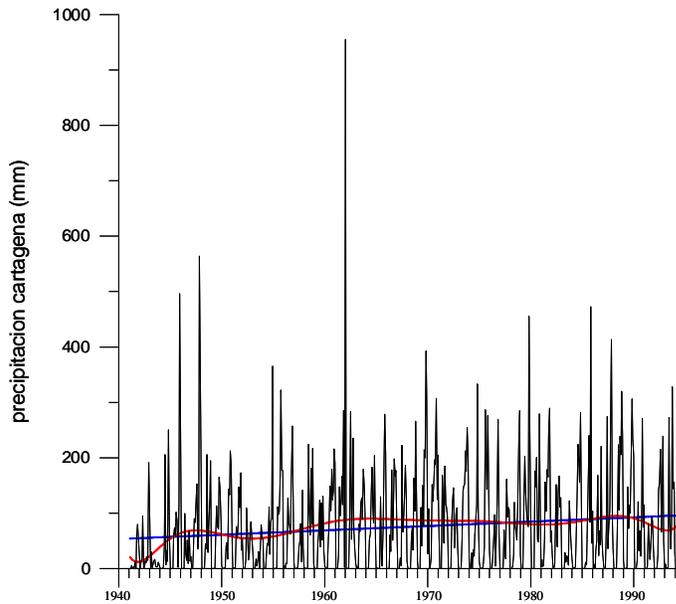
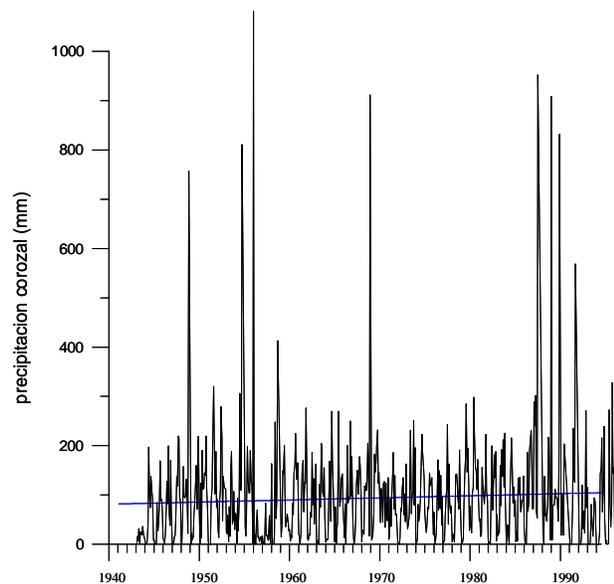


Figura 19. Media mensual multianual de la precipitación en Cartagena con base en datos del IDEAM. La tendencia lineal de los años 1942-1994 es de un aumento de 78 mm cada 10 años, el doble de lo observado en Barranquilla. Nótese los valores extremos en 1945, 1947, especialmente en 1962, 1979 y 1986.

Figura 20. Media mensual multianual de la precipitación en Corozal con base en datos del IDEAM. La tendencia lineal de los años 1942-1994 es de un aumento de 54mm cada 10 años. Nótese los valores extremos en 1948, 1955, especialmente en 1957 y 1968, muy poca alteración en los años 70s y hasta finales de los 80s cuando ocurrieron intensas épocas de lluvias hasta 1992.



Finalmente, la media mensual multianual de la precipitación en San Andrés Isla (Figura 21) tiene una tendencia lineal de los años 1959-1994 de decrecer 74 mm cada 10 años, tendencia opuesta a las estaciones de la costa caribe colombiana. Nótese que los valores medios son significativamente más altos que los que ocurren en la costa caribe y que los eventos extremos son más numerosos.

Sin embargo desde finales de los años 70s y principios de los 80s se nota una disminución de las lluvias seguida por una actividad máxima cuando ocurrieron intensas épocas de lluvias hasta 1992. Aunque en estos rasgos generales son similares, este régimen es significativamente diferente al costero y responde mas a la

ocurrencia y paso de las tormentas tropicales en la temporada de huracanes y a los frentes fríos boreales que a la posición de la Zona de Convergencia Tropical.

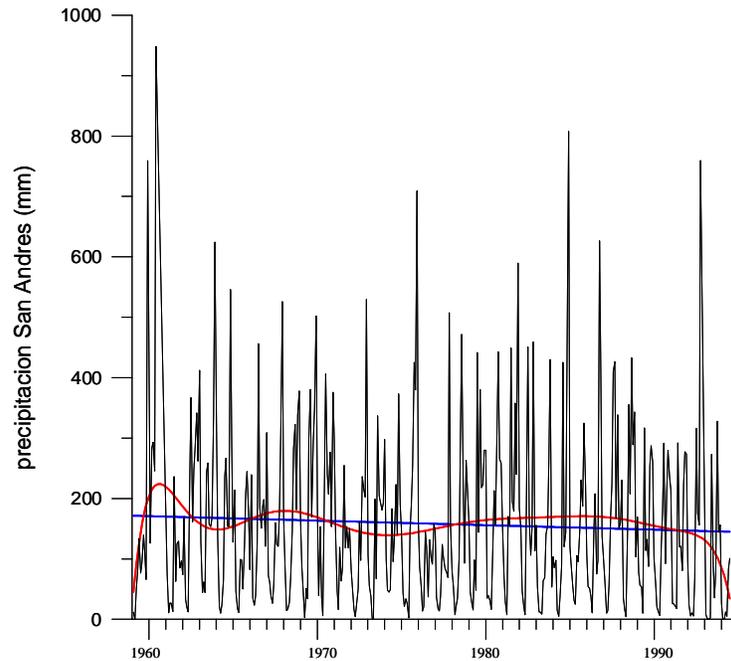


Figura 21. Media mensual multianual de la precipitación en San Andrés Isla con base en datos del IDEAM. La tendencia lineal de los años 1959-1994 es de un decrecimiento de 74mm cada 10 años, tendencia opuesta a las estaciones de la costa caribe colombiana. Nótese que los valores medios son significativamente más altos que los que ocurren en la costa norte de Colombia y que los eventos extremos son más numerosos. Sin embargo desde finales de los 70s y principios de los 80s se nota una disminución de las lluvias seguida por una actividad máxima cuando ocurrieron intensas épocas de lluvias hasta 1992. Este régimen es significativamente diferente al costero y responde más a la ocurrencia y paso de las tormentas tropicales en la temporada de huracanes y a los frentes fríos boreales que a la posición de la Zona de Convergencia Tropical.

Como puede observarse, la cantidad de estaciones de lluvias agudas parece tener una dependencia de la latitud (meridional) o de la cercanía a la máxima zona de precipitación de las selvas del Chocó colombiano. Durante el mismo periodo de observación, las estaciones de lluvias que fueron mayores de 400 mm de precipitación fueron solo dos en Barranquilla, en Cartagena fueron siete y en Corozal diez estaciones lluviosas muy fuertes.

Con el objeto de visualizar la variación multianual. A las medias mensuales multianuales de precipitación se les aplicó un filtro a las altas frecuencias que desaparece el efecto estacional principalmente (Figura 22). Independientemente de la tendencia lineal (de largo periodo), todas las series muestran un patrón común de aumento de la precipitación correspondiente con los años en los que ocurrió un evento frío del fenómeno ENOS (La Niña) y lo opuesto en los años de los eventos calientes.

Si bien la intensidad de los eventos es diferente en cada estación, el fenómeno regional es marcado e inverso a lo que ocurre en el Pacífico colombiano en el cual la precipitación aumenta durante los eventos cálidos del ENOS (Montealegre y Pabón, 1992).

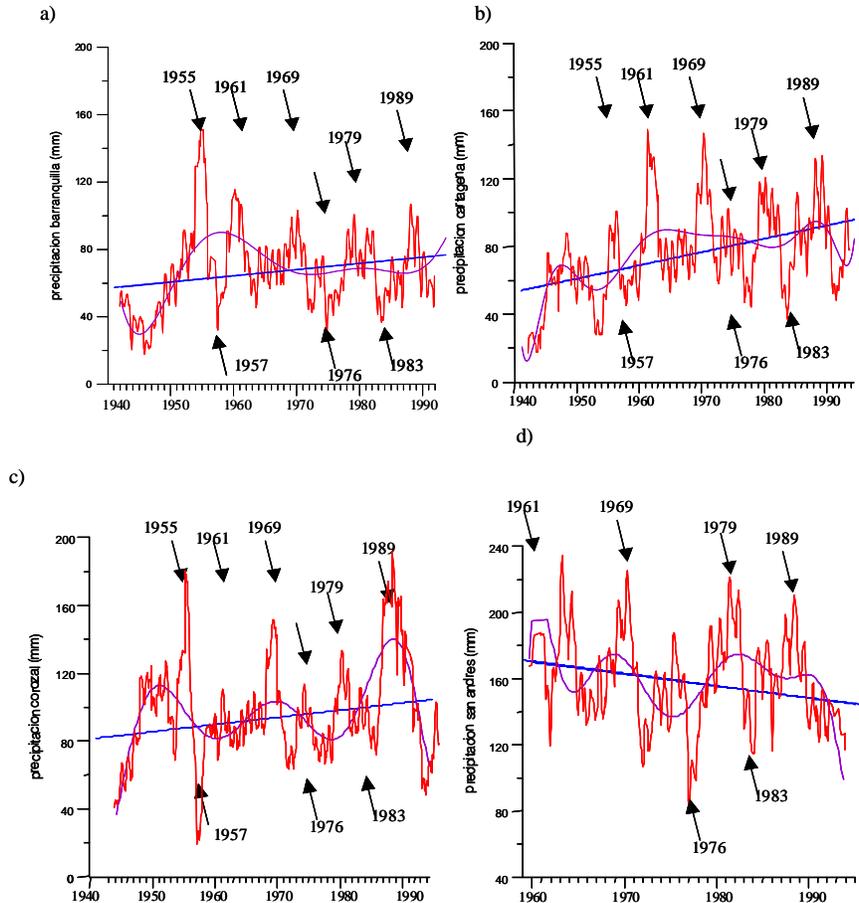


Figura 22. Medias mensuales multianuales de precipitación en a) Barranquilla, b) Cartagena, c) Corozal y d) San Andrés. Los valores han sido filtrados por una 'media corrida' de 21 puntos con el objeto de visualizar la variación multianual. La tendencia lineal (línea recta) y el ajuste polinomial (línea curva) muestra mejor la variación decadal. Las series tienen un patrón común de aumento de la precipitación correspondiente con los años en los que ocurrió un evento frío del fenómeno ENOS (La Niña) y lo opuesto en los años de los eventos calientes.

Estas observaciones se comparan razonablemente con los cambios en la precipitación para diferentes partes del Hemisferio Norte, desde datos de tierra solamente presentados por Wigley y Santer, (1993) en la (Figura 23). En el panel medio se encuentra la zona que incluye el Caribe colombiano. La tendencia muestra un decrecimiento de la precipitación desde los años 60s de la manera como se comportó la precipitación en San Andrés Isla. Las estaciones costeras respondieron de manera diferente en los últimos años incrementando la precipitación.

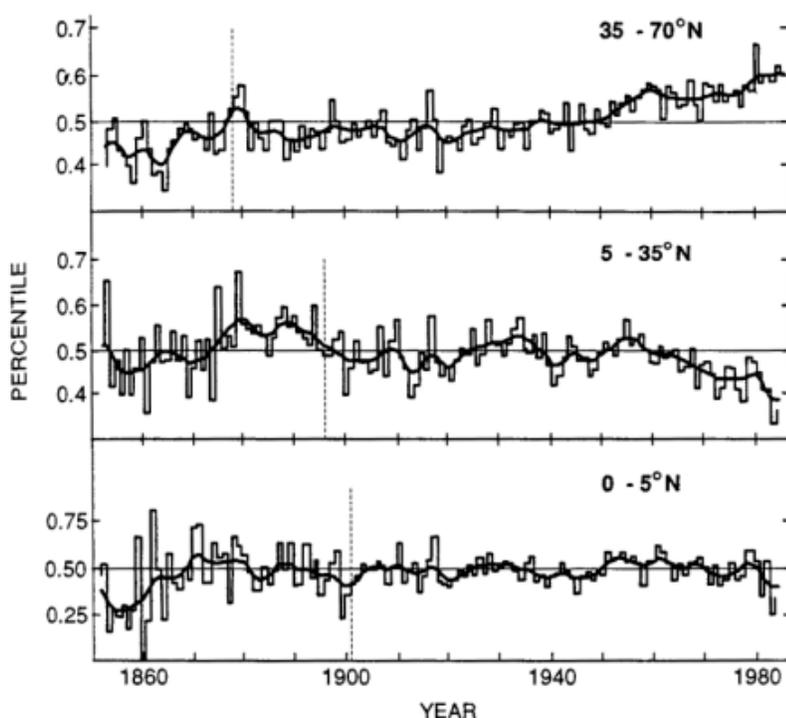


Figura 23. Cambios en la precipitación para diferentes partes del Hemisferio Norte, desde datos de tierra solamente (Wigley y Santer, 1993). En el panel medio se encuentra la zona que incluye el Caribe Colombiano. La tendencia muestra un decrecimiento de la precipitación desde los años 60s de la manera como se comportó la precipitación en las estaciones estudiadas, especialmente en San Andrés Isla.

7.4 Resultados del análisis de la temperatura ambiental

La media mensual multianual de la temperatura ambiente de Barranquilla (Figura 24) muestra calentamiento desde mediados del los 50s hasta 1968 cuando descendió hasta 1974, volviendo a subir hasta 1982 y decreciendo hasta entrar a los 90s. La tendencia lineal de 1957-1991, muestra un ligero incremento de 0.04°C en 34 años de observación.

En la media mensual multianual de la temperatura ambiente de Cartagena (Figura. 25), se observa un enfriamiento desde mediados del los 50s hasta 1960 volviendo a subir hasta 1982 y decreciendo hasta entrar a los 90s. La tendencia lineal de 1941-1994 muestra un decrecimiento de 0.9°C en 53 años de observación. Esta cifra está por encima de los cálculos globales y debe corroborarse con otras fuentes de ya que parece un gradiente de enfriamiento muy elevado. Sin embargo, la elevación de la temperatura de los últimos 20 años esta de acuerdo con la tendencia global.

Así mismo, en la media mensual multianual de la temperatura ambiente de Corozal (Figura 26) . Se observa un continuo enfriamiento con un pico al final de los 50s hasta 1960 volviendo a subir desde 1975 hasta 1982. La tendencia lineal de 1945-1984 muestra un decrecimiento de 1.08°C en 39 años de observación. Igual que Cartagena, esta cifra está bien por debajo de los cálculos globales y debe corroborarse con otras fuentes de ya que este gradiente es muy importante. Sin embargo, de la misma forma que con la serie de Cartagena, la elevación de la temperatura de los últimos 20 años esta de acuerdo con la tendencia global.

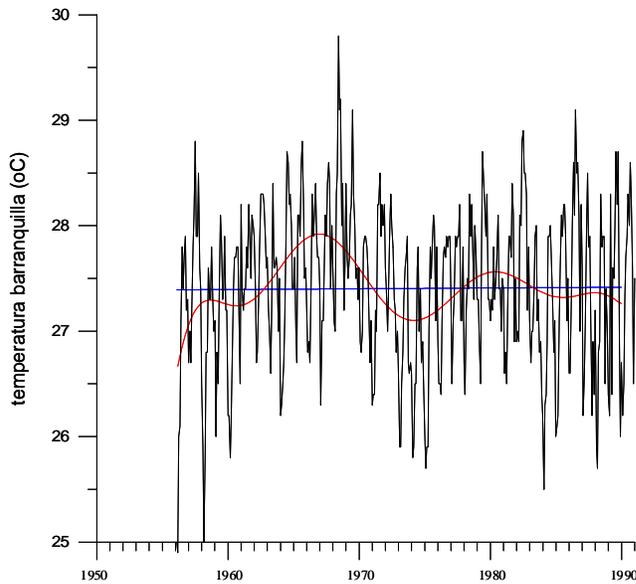
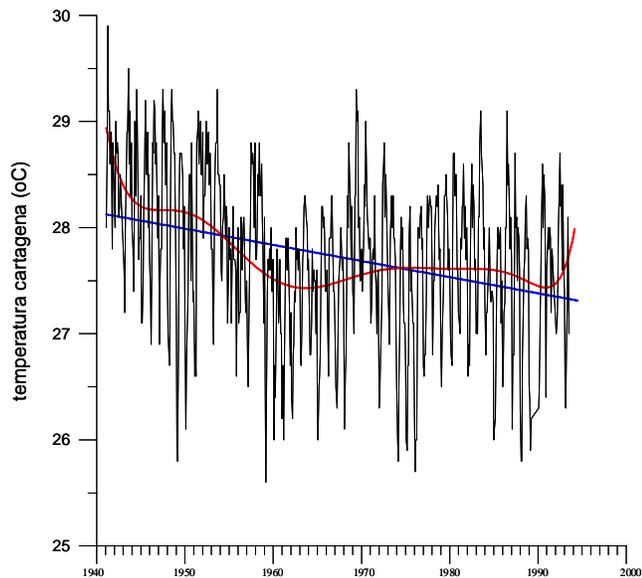


Figura 24. Media mensual multianual de la temperatura ambiente de Barranquilla con base en datos del IDEAM. Se observa un calentamiento desde mediados del los 50s hasta 1968 cuando descendió hasta 1974, volviendo a subir hasta 1982 y decreciendo hasta entrar a los 90s. La tendencia lineal 1957-1991, muestra un ligero incremento de $0.04^{\circ} C$ en 34 años de observación.

Figura 25. Media mensual multianual de la temperatura ambiente de Cartagena con base en datos del IDEAM. Se observa un enfriamiento desde mediados del los 50s hasta 1960 volviendo a subir hasta 1982 y decreciendo hasta entrar a los 90s. La tendencia lineal 1941-1994 muestra un decrecimiento de $0.9^{\circ} C$ en 53 años de observación. Esta cifra está por encima de los cálculos globales y debe corroborarse con otras fuentes de ya que parece muy elevada. Sin embargo la tendencia de los últimos 20 años es hacia la elevación.



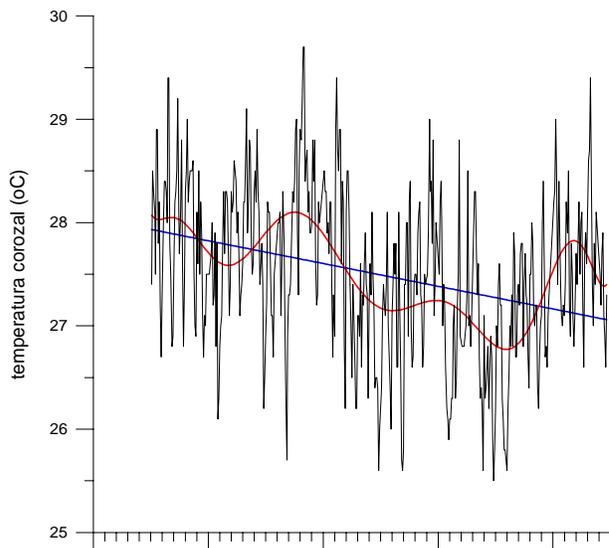


Figura 26. Media mensual multianual de la temperatura ambiente de Corozal con base en datos del IDEAM. Se observa un continuo enfriamiento con un pico al final de los 50s hasta 1960 volviendo a subir desde 1975 hasta 1982. La tendencia lineal (azul) 1945-1984 muestra un decrecimiento de 1.08° C en 39 años de observación. Igual que Cartagena, esta cifra está por encima de los cálculos globales y debe corroborarse con otras fuentes de ya que parece muy elevada. Sin embargo la tendencia de los últimos 20 años es hacia la elevación.

En contraste, en la media mensual multianual de la temperatura ambiente de San Andrés (Figura 27) se observa un enfriamiento desde el final de los 50s hasta 1982 en los cuales se han presentado años con veranos de elevada temperatura. La tendencia lineal de 1958-1991 muestra un insignificante incremento de 0.001°C en 33 años de observación.

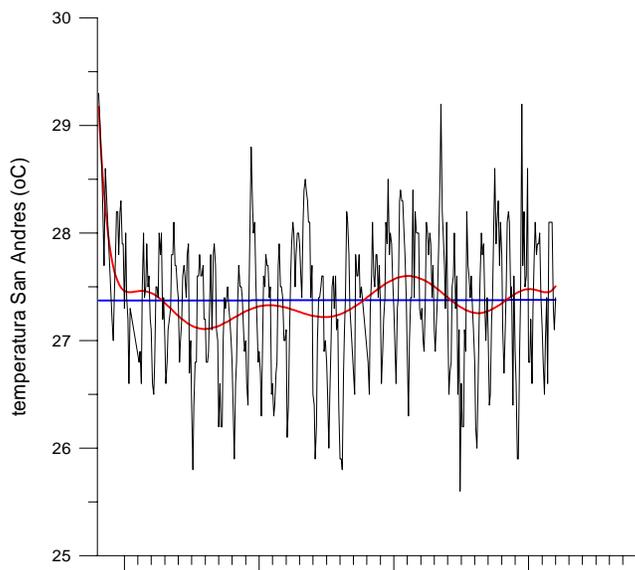


Figura 27. Media mensual multianual de la temperatura ambiente de San Andres con base en datos del IDEAM. Se observa un enfriamiento desde el final de los 50s hasta 1982 en los cuales se han presentado años con veranos de elevada temperatura. La tendencia lineal (azul) 1958-1991 muestra un insignificante incremento de 0.001°C en 33 años de observación

De la misma manera que a las series de precipitación, la media mensual multianual de la temperatura ambiente de las cuatro estaciones estudiadas han sido filtradas por un promedio corrido de 21 puntos para observar la tendencia interanual (Figura 28). Como en el caso de la precipitación, la temperatura ambiente responde al fenómeno ENOS siendo más elevadas durante los eventos “cálidos” (por ejemplo en 1957-58, 1972-73 y 1982-83) inclusive en San Andrés Isla aunque la señal es menos visible. Si bien la tendencia lineal es dominada por el descenso de la temperatura de las décadas de los 60s y 70s, todas las series muestran un ascenso reciente de la temperatura ambiental.

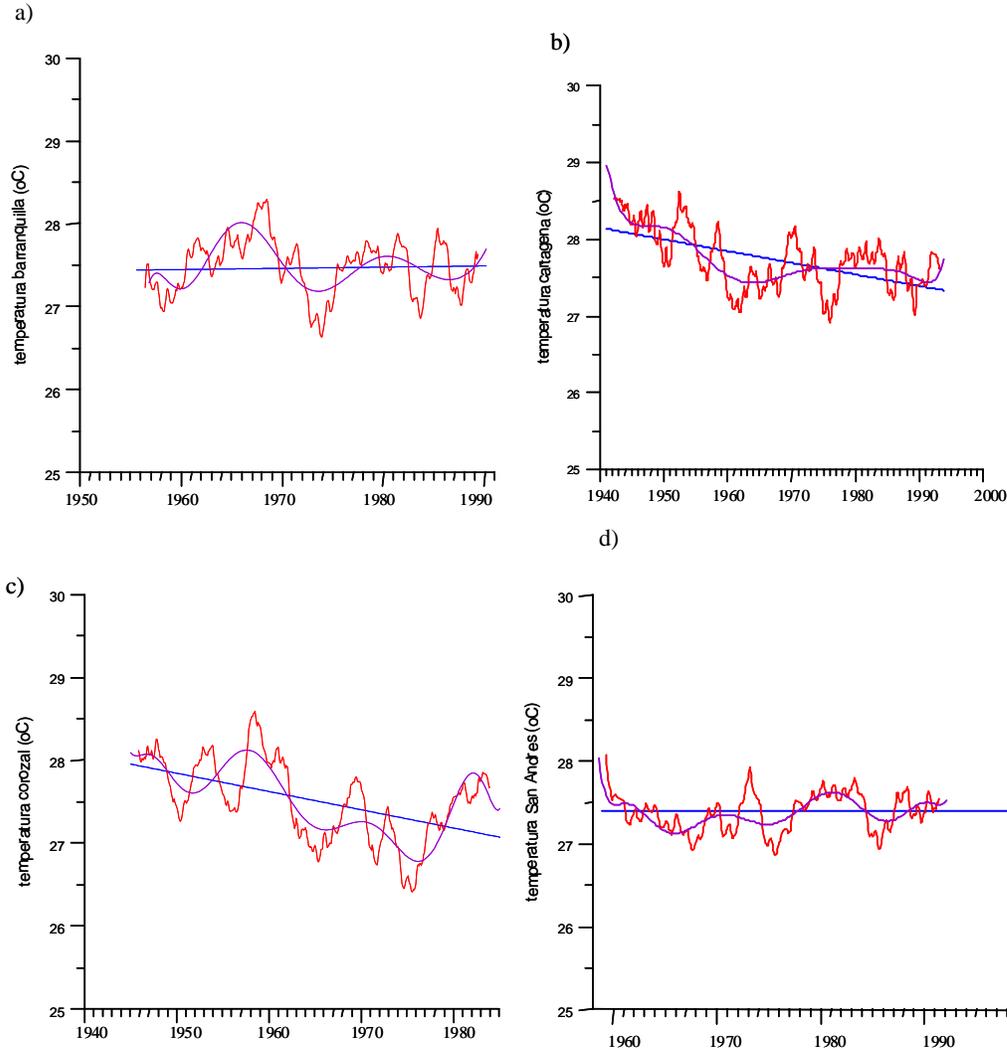


Figura 28. Media mensual multianual de la temperatura ambiente de a) Barranquilla, b) Cartagena, c) Corozal y d) San Andrés con base en datos del IDEAM. Las series han sido filtradas por un promedio de 21 puntos para observar la tendencia interanual y la tendencia decadal en el ajuste polinomial de grado 10 y el largo periodo en la tendencia lineal. Como en el caso de la precipitación, la temperatura ambiente responde al fenómeno ENOS siendo más elevadas durante los eventos “cálidos” inclusive en San Andrés Isla aunque la señal es menos visible.

Los cambios en la temperatura para diferentes partes del planeta, desde datos de tierra y marinos (Wigley y Santer, 1993) están en la figura 29. En el panel superior se encuentra la zona que incluye los mares colombianos. La tendencia muestra un decrecimiento de la temperatura desde los años 1960s y se incremento alrededor de medio grado desde los 1980s. Las estaciones costeras de Colombia respondieron de la misma manera, con un decrecimiento de la temperatura ambiente hasta 1982 y aumentando hasta años recientes.

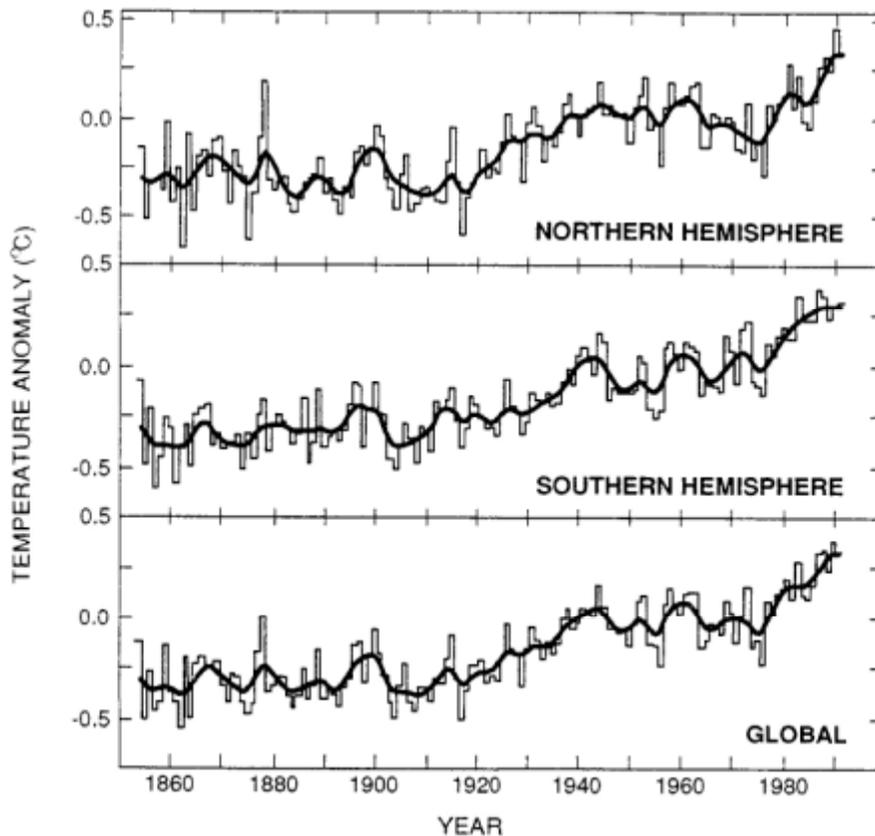


Figura 29. Cambios en la temperatura para diferentes partes del planeta, desde datos de tierra y marinos (Wigley y Santer, 1993). En el panel superior se encuentra la zona que incluye los mares colombianos. La tendencia muestra un decrecimiento de la temperatura desde los años 1960s y se incremento alrededor de medio grado desde los 1980s. Las estaciones costeras de Colombia respondieron de la misma manera, con un decrecimiento de la temperatura ambiente hasta los años 70s y un leve ascenso en adelante.

7.4.1 Modelos del clima futuro

Wigley y Santer (1993) hacen una discusión detallada del posible clima futuro del mar Intra-americano. Estos resultados pueden ser utilizados también para el Pacífico colombiano que está incluido en la simulación pero no fue parte de su análisis. Ellos comparan los resultados de cuatro modelos que predicen futuros cambios de la temperatura ambiente y la precipitación por trimestres (cuatro estaciones boreales). Cada modelo calcula el efecto que tendría sobre la temperatura y la lluvia, el doblar la cantidad de todos los gases de invernadero, expresada como si se doblara el contenido de CO_2 ($2\times\text{CO}_2$). Los cuatro modelos numéricos son globales pero Wigley y Santer (1993) solo reportan los resultados regionales de su interés. Los resultados aquí presentados son sobre los cambios en la temperatura y la precipitación media anual. Hay que tener cuidado al interpretar los resultados de un clima futuro a escala regional viendo un modelo de circulación global (MCG) y se debe ser cuidadoso en la interpretación, debido a las limitaciones numéricas que tiene un problema tan complejo como el clima. Entonces cuidadosamente, el rango de la precipitación media anual (Figura 32) y de la temperatura ambiental anual (Figura 33) se discuten a continuación.

El cambio en la temperatura media anual causado por incremento del doble de CO_2 muestra ser muy consistente en los resultados de los cuatro MCG: se calcula un incremento de 2-4° C. Los detalles del incremento de la temperatura cambian en cada modelo pero en general se modelan los bordes continentales en el trópico americano con temperaturas medias mas altas que en las islas. La variación de los resultados entre

cada modelo sobre los cambios en la precipitación media anual al doblar en CO₂ también son significativos, pero cada modelo muestra que el contorno de cero precipitación (mm por día), que pasa por el centro del Caribe, es el factor dominante del cálculo. Sin embargo, la precipitación es fuertemente dominada por las tormentas tropicales y estas no están representadas en los MGCs.

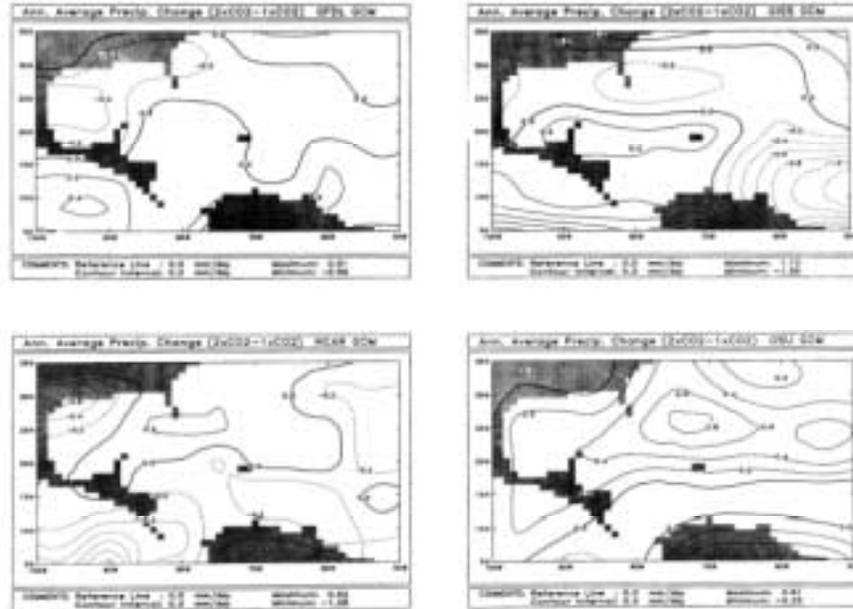


Figura 30. Cambios en la precipitación promedio anual debido al aumento efectivo por doblar la cantidad de CO₂ atmosférico desde los diferentes modelos globales del clima, a) del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL), b) Instituto Goddard para Estudios del Espacio (GISS), c) del Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera (NCAR) y d) de la Universidad del Estado de Oregon (OSU). Los mapas son tomados de Wigley y Santer (1993). Los cuatro modelos muestran resultados diferentes pero de manera general el Caribe y Pacífico colombianos se encuentran en una 'bolsa' climática que lo hace diferente al resto de la región.

Aunque los resultados presentados en las anteriores figuras varían considerablemente entre los modelos, la conclusión general está de acuerdo con el escenario de la WMO/ICSU/UNEP (1986) sobre el aumento de la temperatura ambiente. Sin embargo el clima es la suma de muchos factores geofísicos y los gases de invernadero son solo uno de ellos y puede haber factores competitivos (particularmente a escala regional) que pueden modificar los resultados de los modelos. Actividades humanas como la deforestación masiva puede alterar el balance de los factores que suman al clima de la tierra y por eso la advertencia de ser cauteloso al interpretar resultados de los modelos.

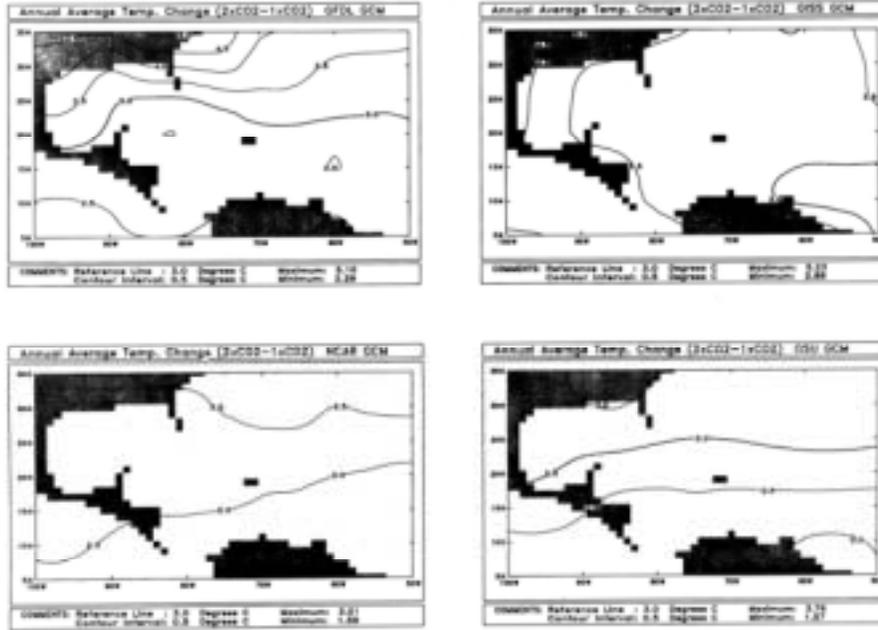


Figura 31. Cambios en la temperatura promedio anual debido al aumento efectivo por doblar la cantidad de CO₂ atmosférico desde los diferentes modelos globales del clima, a) del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL), b) Instituto Goddard para Estudios del Espacio (GISS), c) del Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera (NCAR) y d) de la Universidad del Estado de Oregon (OSU). Los mapas son tomados de Wigley y Santer (1993). Los cuatro modelos muestran que la temperatura ambiente sería aumentada entre 2-3° C en las costas colombianas

Otra manera de modelar el problema es enfocarlo en la variabilidad estacional ya que tiene implicaciones potenciales más importantes en el corto plazo que los cambios medios del clima. Basados en datos actuales Gallegos *et al.*, (1993) predicen fluctuaciones estacionales más grandes que las actuales. Ellos llevaron en escenario mas allá para observar el efecto que tendría en las aguas marinas el aumentar la variabilidad entre estaciones y predicen que unos pocos veranos “calientes” consecutivos tienen el potencial para: reajustar el nivel medio del mar costero, el cual puede afectar el balance de agua potable en los sistemas costeros, modificar la localización y magnitud de la migración de la línea de costa, alterar los patrones de especies marinas económicamente importantes, causar suficientes cambios en las corrientes superficiales para afectar el transporte marítimo y los planes de contingencia para el derrame de sustancias peligrosas y reordenar la interacción océano atmósfera la cual puede trasladar los patrones de clima locales tales como las lluvias, Maul (1993).

Cuando se comparan resultados de MGCs y de modelos de escenario (los discutidos anteriormente) se deben tener en cuenta algunas advertencias tan elocuentes como son los escenarios de Lamb (1987) donde hay interrogantes sobre si el clima pasado es un ‘presagio’ del clima futuro. Así mismo, es bien conocido que los MGCs tienen limitaciones, como la parametrización de alguna física (sobre todo de las nubes) y los efectos no modelados del volcanismo (AGU, 1992) son de preocupación sobre nuestra confianza en los resultados pronosticados de 2xCO₂-1xCO₂. De particular importancia es la pregunta ‘cómo está distribuido el cambio de la temperatura superficial global?’

MacCraken *et al.*, (1990) han explorado patrones de temperatura en el hemisferio norte utilizando reconstrucciones paleo-climáticas de algunos periodos de calentamiento relativo. Dos de sus reconstrucciones (en Maul, 1993) el Holoceno medio (6000 atp) menos la última mitad del siglo XIX (Figura 31) y el Optimum

Interglacial del Eemico (125.000 atp) menos la última mitad del siglo XIX, están representados para el verano y el invierno junto con un panel similar proveniente de las simulaciones de los MCGs, Como se puede observar hay importantes diferencias para las regiones tropicales. Los tres perfiles muestran que los cambios en temperatura superficial van a ser mayores en las latitudes altas, un patrón consistente con todos los predictores del IPCC (Houghton *et al.*, 1992). Sin embargo, en las reconstrucciones del Holoceno y del Eemico muestran que al sur de 35° N (los trópicos y sub-trópicos) las temperaturas fueron más frías durante los periodos de calentamiento. Los MGCs muestran todo lo contrario: predicen calentamiento en todas las latitudes con $2xCO_2-1xCO_2$. Si tenemos en cuenta que estamos trabajando bajo la premisa que el calentamiento global afecta de la misma manera (calentando) la zona costera colombiana, esta figura nos deja con importantes interrogantes sin resolver.

8 El cambio relativo del nivel del mar

En el resumen realizado por el Grupo de Trabajo I del IPCC para quienes toman las decisiones (IPCC 2001), las últimas predicciones muestran un aumento global promedio del nivel medio del mar entre 0.1 y 0.2 metros durante el siglo XX. El promedio mundial del nivel del mar, está proyectado a aumentar entre 0.09 a 0.08 m. entre 1990 y 2100. Se asume que este aumento estará provocado principalmente por la expansión termal de la masa de agua marina y a la pérdida en las capas de hielo glaciares.

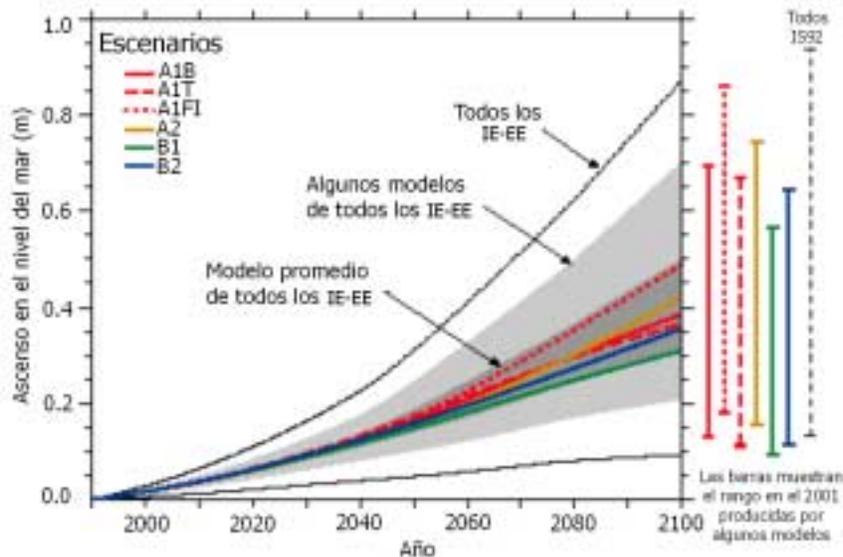


Figura 32 Los escenarios a que se refiere la figura corresponden a los utilizados por el IPCC para el análisis de los posibles cambios climáticos, sus efectos, impactos y opiniones para mitigar los cambios climáticos. La sigla IE-EE responde a la abreviatura de los escenarios propuestos en el Informe especial sobre escenarios de emisiones del Grupo de Trabajo III del IPCC (Special Report on Emissions Scenarios-SRES).

Los modelos climáticos proyectan la respuesta de muchas variables climáticas, como el incremento del nivel del mar ante varios escenarios de emisión de GEI. La figura 32, muestra el ascenso del nivel del mar para el modelo más simple y aplicado a otros modelos más complejos con un variado rango climático de sensibilidades. “Todos los IE-EE” se refiere a todo el rango de los 35 escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE) (ver anexo Escenario de emisiones); “Modelo promedio de todos los IE-EE” muestra el promedio de estos modelos para el rango de escenarios. Nótese que el ascenso del nivel del mar está proyectado a aumentar más allá del año 2100 y no incluye la incertidumbre relacionada con los cambios dinámicos relacionados con la capa de hielo de oeste Antártico, ni tampoco las proyecciones de los aerosoles no sulfatados y concentraciones de gases efecto invernadero.

8.1 Tendencias lineales del nivel relativo del mar en Colombia

El nivel del mar en las costas colombianas, es principalmente modulado por la oscilación de la marea semidiurna (dos pleamares y dos bajamares en un día). Su amplitud es del orden de centímetros en el Caribe y de metros en el Pacífico. Sumada a esta oscilación, hay 'pulsos' de ondas de distintos periodos que afectan la zona costera. Ondas de cortos periodos como las producidas por el oleaje que el estrés del viento construye cuando se forma una tormenta o las ondas que se forman al dislocarse el fondo marino durante un movimiento sísmico o un tsunami, son ondas que afectan severamente las zonas costeras durante unas horas o unos días, suficientes para impactar todos los sistemas de manera drástica.

Las ondas de largo periodo, son aquellas que viajan por los océanos en un intento por equilibrar las fuerzas producidas por la rotación terrestre, la gravedad y los enormes gradientes de presión (como ondas de Rossby u ondas de Kelvin por ejemplo). Estas oscilaciones pueden tener periodos del orden de semanas y meses, siendo de gran importancia ya que el efecto acumulado de las mareas de sicigia que ocurren en la cresta de una onda de este tipo serán más altas de lo esperado con los correspondientes efectos.

La oscilación del nivel del mar que ocurre con periodos Inter.-anuales y períodos superiores, producen ascensos y descensos graduales que son difíciles de detectar y cuyas tendencias de largo plazo producen cambios lentos pero dramáticos en las zonas costeras. Estas oscilaciones están relacionadas con las ocurridas al cambiar el balance energético del planeta que hace descongelar los casquetes polares al final de una glaciación, o con el aumento de la emisión de CO₂ en la atmósfera que calienta la superficie del mar o mas generalmente, a la expansión de volumen que ocurre en el mar al tener más calor (expansión térmica) que implica el aumento de la columna de agua, manifestado en el ascenso del nivel.

Ahora bien, el nivel "relativo" del mar (NRM) es el efecto neto entre la actividad tectónica, levantamiento o subsidencia, mas la expansión o contracción de la columna de agua. Por esa razón no es suficiente con analizar las condiciones hidrodinámicas solamente sino también que es determinante conocer la tectónica de placas de la región que se está investigando.

La diferencia en los efectos del cambio del nivel del mar a nivel regional son notorias en el caso de Colombia, ya que sus costas se encuentran en los bordes de distintas placas tectónicas. En el Caribe, la costa está sujeta a un estrés lateral entre la placa suramericana y la placa del Caribe, mientras que la costa Pacífica se encuentra en el borde, donde la placa de Nazca choca con la placa suramericana de forma casi frontal. (Figura 33).

Estudios regionales del NRM con los registros más largos encontrados hasta la fecha (Hanson and Maul, 1993) reflejan que en el Mar Intra-americano (el mar Caribe, golfo de México, y el Estrecho de Florida), el nivel del mar ha subido en los últimos 30 años a un promedio de 0.35cm/año (+0.25 cm/ año) debido a la complicada actividad tectónica, la subsidencia y la masiva extracción de petróleo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los registros de nivel del mar son 'cortos' y que se necesitan muchos mas registros, durante un mayor tiempo para determinar movimientos ondulares decadales o mayores (Gallegos *et al.*, 1993, Mercado *et al.*, 1993).

Estudios hechos en Jamaica (Hendry, 1993) muestran que durante el holoceno (últimos 10,000 años) el aumento del nivel del mar fue menor a 0.5cm/año y que en los últimos 3000 años no parece haber variado (Figura 34). Se estima que 0.5cm/año (20cm entre 2001 y 2040) podría generar un gran estrés en los ecosistemas costeros. Estas afirmaciones hacen pensar que el efecto en la zona costera del caribe colombiano podría ser similar por obvias razones de cercanía.



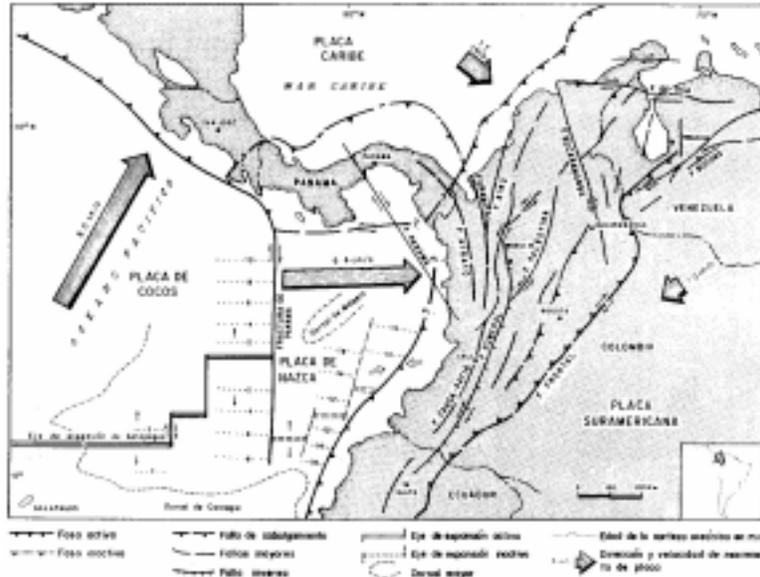


Figura 33. Marco geotectónico de Colombia. La zona costera colombiana pertenece a la corteza “transicional” que separa las áreas “cratónicas” del continente de las placas oceánicas. La costa Caribe colombiana se encuentra en el límite entre la placa Caribe y la Placa Suramericana. La costa Pacífica es el límite entre esta última y la placa de Nazca. La característica predominante de la tectónica del contacto con la placa Caribe en Colombia es el diapirismo de lodo mientras que el contacto con la placa de Nazca produce volcanismo de cenizas principalmente. (Tomado de González et al., 1988; Modificado de Kellogg et al., 1983, Lonsdale et al., 1978 y Pennington, 1981).

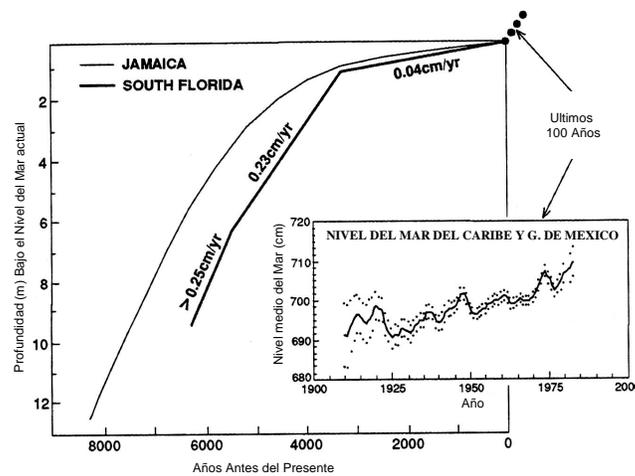


Figura 34. Cambios del nivel del mar basados en registros geológicos tomados en el sur de la Florida por Wanless et al., 1988 y de Jamaica por Digerfeldt y Hendry, 1987. El aumento relativo de 36cm en 100 años que muestra el recuadro está basado en observaciones directas de todas las estaciones de nivel del mar de la red de observación RLR (Pugh et al., 1987). Los puntos muestran la desviación estándar de la media. El retroceso de la línea de costa asociado al aumento del nivel del mar ocurre en eventos derivados de tormentas y a menudo no son vistos inmediatamente como erosión costera o inundación de costas bajas. Tomado de (Maul, 1993).



8.2 Metodología

Los datos utilizados a continuación, fueron obtenidos de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del Ministerio del Medio Ambiente; en el Caribe, con dos estaciones en la ciudad de Cartagena, como registros más próximos al área caso de estudio escogida golfo de Morrosquillo, y en el Pacífico las estaciones de Buenaventura y Tumaco para la UMI Guapi-Iscuandé, dado que Guapi se encuentra en un punto intermedio entre estos dos sitios. Fueron utilizados además, los datos de las estaciones de la Comisión del Canal de Panamá, Cristóbal en el Caribe y Balboa en el Pacífico, lo cuales fueron obtenidos a partir de la base de datos del Centro del Nivel del Mar del National Oceanographic Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica y procesados en la Universidad de Hawai, en Manoa. Dichos datos se presentan en la Tabla 3

Las estaciones de Panamá dan contexto a las mediciones en la costa colombiana y sirven para corroborar eventos sinópticos que deben aparecer en las señales de todos los puertos en la cuenca. Además, las series de nivel del mar en Panamá son de casi el doble de tiempo por lo que las tendencias son significativas para la validación de las series en las costas colombianas.

Tabla 3. Estaciones utilizadas para estimar las variaciones del nivel relativo del mar en las costas Colombianas

		Latitud	Longitud	Instrumento	Lapso
Caribe Colombia	Cartagena-A	10 23.0N	075 32.0W	Estándar con flotador 1951-1991 Leupold Stevens sensor de presión 1991-1992	02 Nov 1951 26 Apr 1993
	Cartagena-B	CIOH		Leupold Stevens sensor de presión 1991-1992	01 May 1993 01 Mar 2000
Caribe Panamá	1) Cristóbal	09 21.3N	079 54.9W	análogo Stevens Tipo F Análogo Stevens A71 Análogo	1907-1969 1970-1973 1973-1978
	2) Coco Solo	09 22.0N	079 53.0W	Stevens Digital Modelo 7001 Handar Digital 550B Stevens A71 Análogo	1981-1987 1988-1996 1988-1996
	3) Bahía Limón	09 21.3N	079 54.9W	Burbuja de Gas	1997-2001
Pacífico Colombia	Buenaventura	03 54.0N	077 06.0W	Estándar con flotador, análogo	12 May 1953 01 Apr 2000
	Tumaco	01 50.0N	078 44.0W	Estándar con flotador, análogo (1951-Oct/1989); Fisher y Porter con registro análogo- digital (Nov/1989-)	01 Nov 1951 01 Mar 2000
Pacífico Panamá	Balboa	08 57.7N	079 34.4W	1907-1970: type not confirmed (analog) 1971-1973: Stevens Type F Analog 1973-1980: Fisher & Porter Digital 1981-1987: Stevens Digital Model 7001 1982-2001: Stevens A71 Analog 1988-2001: Handar Digital 550B Hydrologger	19 Jun 1907 31 Dic 1997

Los datos horarios fueron obtenidos directamente de las lecturas de los sensores. Los datos diarios fueron obtenidos mediante un filtro de convolución de 119 puntos centrado al medio día, aplicado a los datos horarios con periodos respectivos de 95, 50 y 5% puntos de amplitud a 124.0, 60.2 y 40.2 horas. Los valores mensuales fueron calculados mediante el promedio simple de los datos diarios, (si sólo se perdían siete días o



menos). Los datos están referidos a un nivel arbitrario establecido en la instalación del equipo. Sin embargo, muchos ‘desplazamientos’ en los datos que no se pudieron corregir, fueron desechados (NODC, 2000).

8.3 Estimaciones del nivel relativo del mar en el Caribe

8.3.1 Nivel del Mar en Cartagena

En Cartagena, la oscilación del nivel del mar diurna (Figura 35a) es marcadamente mixta semidiurna, con sicigias de alrededor de 40cm de amplitud (Figura 35b) teniendo dos mareas de sicigia y una de cuadratura al mes (por ejemplo, Figura 35c) o dos mareas muertas y una sicigia al mes, dependiendo de la lunación que corresponda.

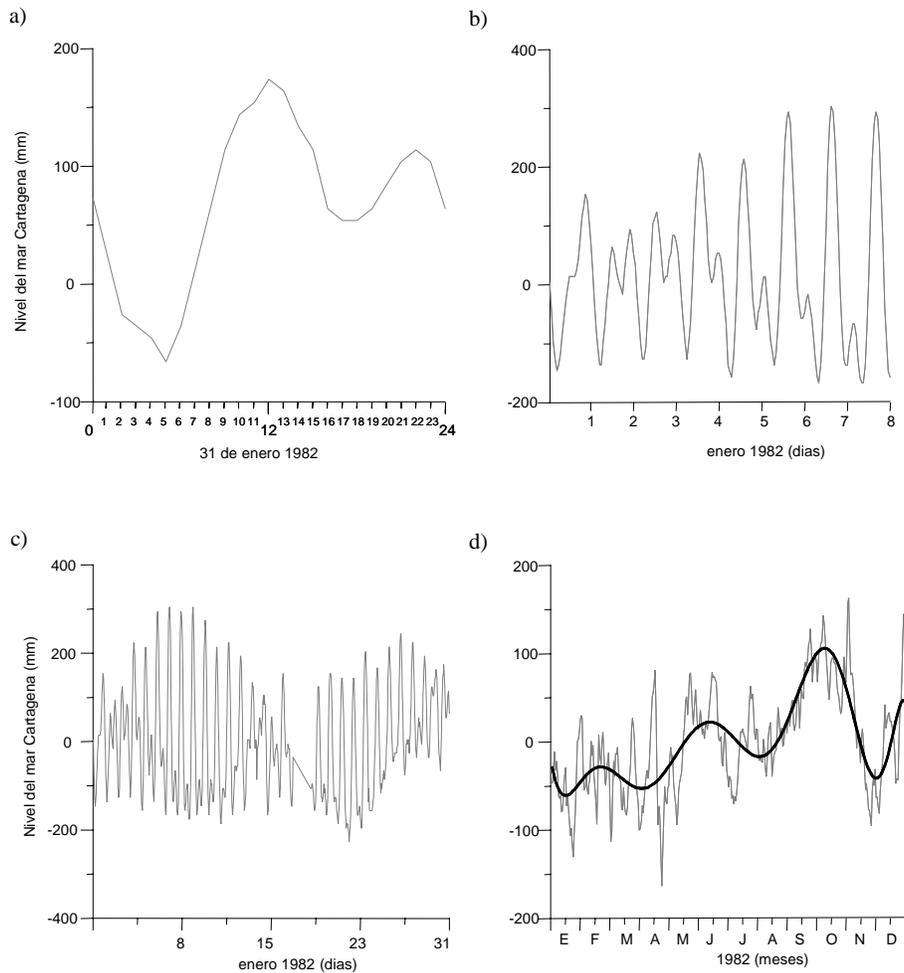


Figura 35. Nivel del mar en Cartagena durante 1982 a) el 31 de enero 1982 b) la primera semana del año c) mes de enero. La oscilación de la marea es mixta semidiurna con una máxima amplitud de 40cm en las sicigias d) Media diaria durante el año una vez filtrada la marea.

La variación del nivel corresponde al efecto térmico en la columna de agua por la estacionalidad climática que hace subir el nivel hasta octubre, bajando hasta marzo y el efecto del viento que es opuesto y lo hace bajar, este efecto es particular en el meses de Julio-Agosto durante el “veranillo”.

Una vez la marea es filtrada, la variación anual del nivel medio del mar, (Figura 35) es marcadamente estacional e inversamente proporcional al esfuerzo de los vientos Alisios del Noreste en la costa del Caribe

colombiano, Andrade (2000). El nivel del mar es menor usualmente en Abril al final de la época de vientos y aumenta durante la época de transición hasta la llegada del “Veranillo” en julio o agosto cuando tiene un ligero y marcado descenso y alcanza su máximo nivel en octubre, al final del verano boreal, debido a la expansión térmica estacional, el cambio de dirección del viento y a la intensidad de la Contracorriente de Panamá-Colombia (Andrade, 2000).

El nivel del mar vuelve a bajar a finales de noviembre con la llegada de la época de vientos. Esta variación anual alcanza a cubrir un rango de alrededor de 40cm, que sumados a los 40cm de amplitud en una marea de sicigia en los meses de octubre, producen durante unas horas un aumento de casi un metro sobre el nivel medio, produciendo las conocidas inundaciones de las zonas bajas de la costa en Cartagena, el desborde de las cañerías, la apertura de la barra de la Ciénaga de Tesca (del mar hacia dentro) entre otros aspectos que han sido observados y poco estudiados.

Cuando se habla de la problemática del aumento del nivel del mar, como se dijo anteriormente, normalmente se refiere al posible aumento que ocurre en plazos interanuales mayores a diez años y son estas variaciones las más importantes en el presente estudio. La variación interanual del nivel del mar en Cartagena desde 1951 (Figura 36a) posee una gran cantidad de oscilaciones producidas por variados fenómenos. Como situación particular se tienen los niveles anormalmente bajos ocurridos alrededor de 1970-1972 también aparecen en la serie de Cristóbal (Panamá) y requieren de mas investigación. El sitio de la estación fue movido en Mayo de 1993 al CIOH. El enlace de las dos series de datos se hizo ajustando a la serie tomada a partir de esa fecha 675 mm. Hay que anotar que la estación en el CIOH contiene numerosos vacíos especialmente durante 1993. Los datos del 7-24 de junio 1996 y del 8-12 enero de 1999 son anormalmente bajos y se deben usar con precaución, sin embargo la tendencia general fue claramente similar, a la serie original.

La serie filtrada muestra una ‘pulsacion’ alrededor de 6.5 años muy parecida a la del fenómeno ENOS. De la variación interanual observada en las dos últimas décadas (Figura 36b) se puede observar que en los años del fenómeno ENOS el nivel del mar es significativamente menor a los años “normales” y que durante los años de “la Niña” (cuando las condiciones son inversas a las del fenómeno ENOS) el nivel del mar es relativamente más alto (Figuras 36 c y d). Esta observación debe ser fruto de análisis posteriores.

Con base en cincuenta años de registro (1951-2000), la tendencia lineal del nivel del mar en la serie de Cartagena es:

$$\text{Nivel del mar (mm)} = 0.452533 * \text{años};$$

que da como resultado un aumento de más de 22 cm en cincuenta años.

Para efectuar una validación de los registros de Cartagena se efectuó una comparación entre las observaciones hechas por el servicio colombiano con los datos obtenidos en Panamá, se efectuó el mismo procedimiento en la serie del nivel del mar obtenida en Cristóbal, que funcionó posteriormente en Coco Solo y ahora funciona en Bahía Limón (Figura 37a), como aparece en la Tabla 3, los datos históricos de los tres segmentos de esta serie Cristóbal, Coco Solo, y Bahía Limón fueron enlazados a un solo nivel de referencia y calibrados como uno solo.

Las calibraciones y ajustes hechos a estas series fueron basadas en las comparaciones diarias y los residuos de estos con la estación de Cartagena. Los datos de Abril de 1907 a Abril de 1908 parecen demasiado bajos alrededor de 10cm. Las causas del drástico aumento de tendencia desde 1971-1973 son desconocidas. El resto de la serie no revela ningún salto o deslizamiento del nivel por esa razón los niveles altos del nivel del mar corresponden con anomalías reales a nivel global, como las que se presenta en el ENOS (Figura 38b).

Con base en noventa años de registro (1907-1997), la tendencia lineal del nivel del mar en Cristóbal es :

$$\text{Nivel del mar (mm)} = 0.16701 * \text{años};$$

Como puede observarse esta tendencia es mucho menor y produce una menor elevación (menos de la mitad) del nivel del mar que la producida por el registro de Cartagena (alrededor de 15 cm en el doble del tiempo).

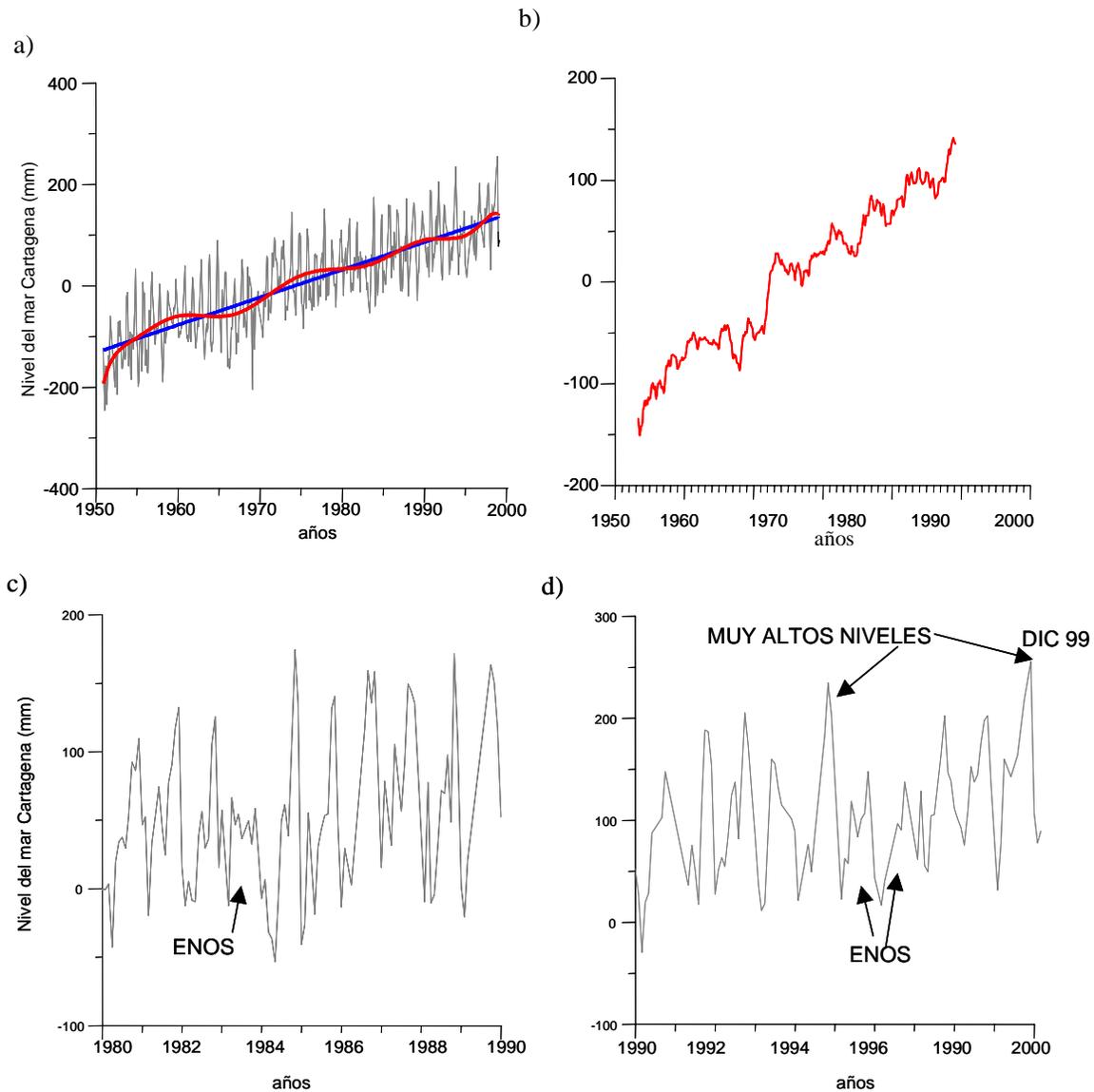


Figura 36 a) Media mensual multianual (1951-2000) en Cartagena la tendencia lineal (en azul) muestra un constante ascenso del NRM, la tendencia polinomial (en rojo) muestra un pulso de alrededor de 20 años b) el registro anterior filtrado para observar cambios estacionales, obsérvese la periodicidad de 6.5 años en las últimas dos décadas c) ampliación del registro en la década del 80s, d) ampliación del registro en la década de los 90s. La menor variabilidad durante los años de ENOS (1982-83 y 1996-97) es evidente. Los niveles alcanzados en diciembre del 99 son los más altos registrados hasta la fecha.

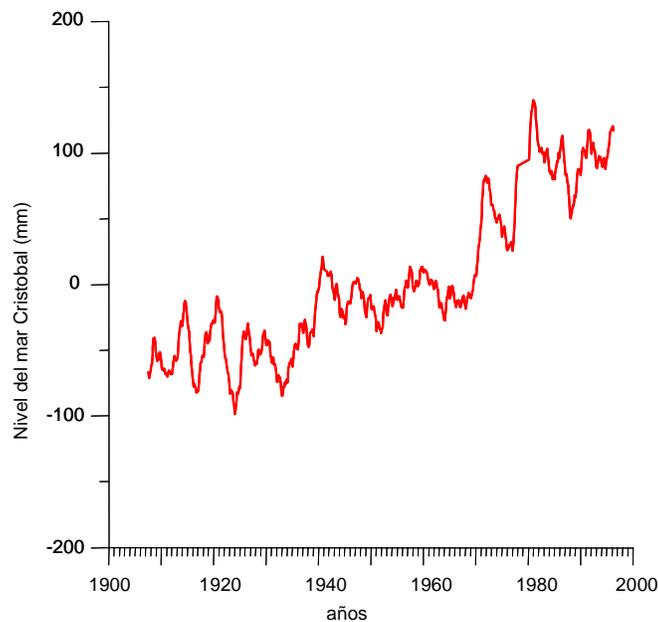
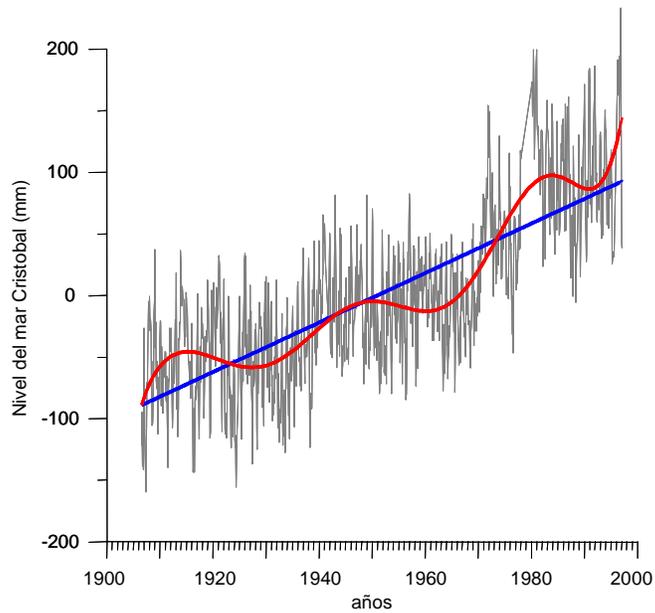


Figura 37 a) Media mensual multianual del nivel del mar en Cristóbal (Panamá) la tendencia lineal (en azul) muestra el ascendente nivel medio y el ajuste polinomial, los grandes modos de variación con un periodo de alrededor de 30 años b) la misma señal filtrada muestra pulsos de 6.5 años semejantes a los encontrados en el registro de Cartagena lo que indica que el fenómeno existió y que existe modulación del nivel del mar en el Caribe por eventos del sistema océano-atmósfera de carácter interanual con los mismos periodos como el fenómeno ENOS.

8.4 Estimaciones del nivel relativo del mar en el Pacífico

El escenario de 1 m de ascenso relativo del nivel del mar para la costa Pacífica está probablemente condicionado a los fenómenos de subsidencia costera asociados a la alta actividad tectónica del área, como resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana. La información histórica

disponible señala la ocurrencia común de eventos sísmicos con magnitudes mayores a 7 (escala de Richter) en la zona; dentro de los cuales los eventos mas documentados fueron los terremotos de 1906 y 1979, que generaron maremotos con efectos destructivos importantes sobre amplias áreas de la parte sur de la Costa Pacífica. En el sector norte, el terremoto de 1970 con epicentro ubicado al norte de la ciudad de Bahía Solano también ha sido documentado (Ramírez y Goberna 1980; Herd *et al.*, 1981).

De los eventos sísmicos mencionados anteriormente, el efecto mas generalizado es el de subsidencia tectónica súbita de terrenos sobre amplios sectores costeros, dentro de los cuales el terremoto de Tumaco (diciembre 12 de 1979), alcanzó alrededor de 60cm en las cercanías de Guapi y 1.6m a lo largo de la línea de costa del delta del Patía (Herd *et al.*, 1981). En el contexto estratigráfico del Holoceno, información publicada recientemente aporta evidencias fuertes de la ocurrencia de al menos un evento sísmico importante en el sector del delta del San Juan y que habría causado una subsidencia de litoral generalizada en el área de alrededor de los 8 m (González y Correa, 2001).

En este contexto, y en el ejercicio más simple de suponer para este siglo la ocurrencia de al menos un evento como los ya mencionados, los cambios relativos del nivel del mar para sectores de la costa Pacífico eventualmente afectados por subsidencia sísmica podrían duplicar o triplicar los 88cm previstos por el ascenso eustático, generando modificaciones drásticas en extremo sobre la morfología litoral y las correspondientes zonas de vida y sucesiones vegetales.

Por último, es importante tener presente que factores adicionales no tectónicos, como la compactación de sedimentos por peso y la expulsión de fluidos (dewatering), relacionados con la subsidencia de los ambientes costeros, podrían influir en el cambio relativo del nivel del mar para la costa Pacífica. Para varios deltas del mundo, las tasas de subsidencia no tectónica han sido estimadas, en el orden de los cm/siglo, máximo 1m/siglo en sectores del delta reciente del Mississippi (Committee on Engineering Implications of Sea Level Changes, 1991). En la costa Pacífica colombiana, no se ha encontrado ningún dato de estos efectos, sin embargo este es un factor que deberá tenerse en cuenta en estimaciones detalladas sobre los cambios del nivel del mar a futuro.

8.4.1 Nivel del mar en Buenaventura

En la serie registrada en Buenaventura hubo necesidad de ajustar el nivel de referencia del instrumento en varias ocasiones donde fue obvio que era alterado por mala manipulación del equipo. Los numerosos espacios sin datos que se encontraron en los datos de 1973-1975 y entre 1987-1991 se atribuyen a la incertidumbre del nivel de referencia del instrumento en esos años. Un gran número de espacios cortos sin información fueron reemplazados por interpolación lineal utilizando la marea pronosticada y sus residuales.

Los datos diarios (Figura 38a) y semanales (Figura 38b) así como los mensuales (Figura 38c) muestran que la marea en Buenaventura es semidiurna con una tendencia menos mixta que las mareas del mar Caribe, con amplitudes cercanas a los cuatro metros que contrastan con los cuarenta centímetros del Caribe. Las medias mensuales están en razonable acuerdo con su estación vecina de Tumaco. Los valores filtrados durante un año muestran que el nivel del mar es mínimo también en Febrero-Marzo (por ejemplo Figura 38d) y aumenta a lo largo del año para volver a descender de manera brusca a partir de noviembre. La amplitud de esta oscilación es unos 60cm.

La media mensual multi-anual una vez filtrada muestra importantes cambios del nivel del mar en los años de la fase aguda de ENOS, especialmente altos en 1965, 1982 y 1996 (Figura 39). Igualmente es significativamente mas bajo en los años en que ocurre la fase negativa del ENOS (La Niña). Esta modulación se encuentra sobre una perceptible tendencia de aumento continuo del nivel del mar.

Con base en cincuenta años de registro (1951-2000), la tendencia lineal del nivel del mar en la serie de Buenaventura es:

$$\text{Nivel del mar (mm)} = 0.204389 * \text{años};$$

que da como resultado un aumento de un poco más de 10 cm en cincuenta años.

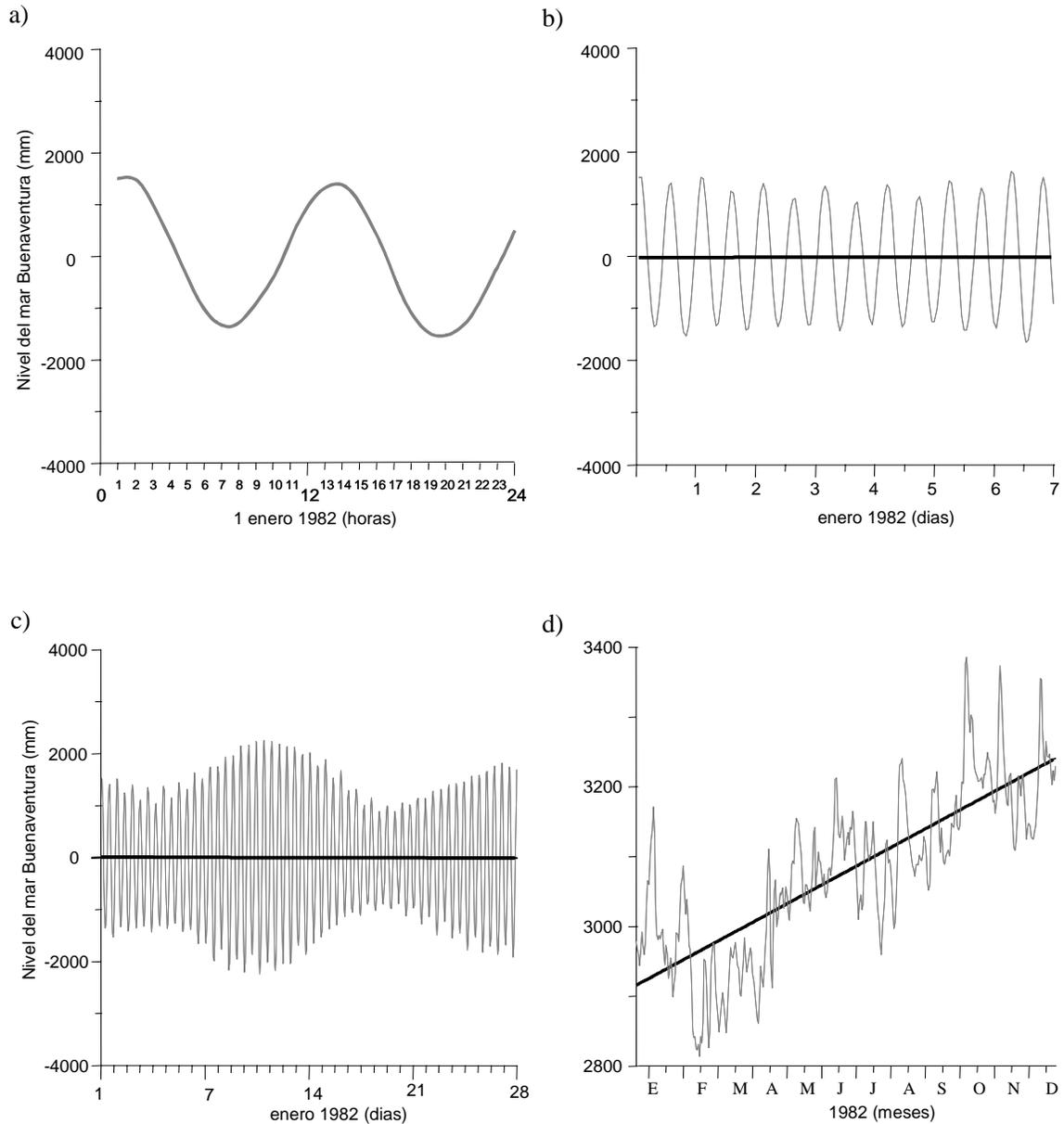


Figura 38 Aspectos del nivel del mar en la estación de Buenaventura a) durante 24 horas (el 1 de enero de 1982) b) la primera semana de enero de 1982 c) el mes de enero de 1982 y d) el año 1982. La oscilación diaria es la marea que tiene caracter semidiurno y modula la mayoría de la varianza alrededor de la media. Una vez filtrada la señal de la marea, la variación del nivel del mar residual es debida a otras causas como tsunamis, el fenómeno de El Niño-Oscilacion del Sur (ENSO) u ondas de Rossby de gran amplitud. Durante 1982 hubo un notable aumento del nivel del mar producido por el ENSO de ese año.

8.4.2 Nivel del Mar en Tumaco

Los datos en Tumaco también fueron fruto de extensos análisis y correcciones para poder obtener una serie continua. En especial la serie fue ajustada por 2.258m desde Mayo 1995 a Marzo 2000 por adecuación del instrumento.

La serie de Tumaco en su variación diaria y semanal es muy parecida a la de su vecina Buenaventura por obvias razones (Figuras. 39a, b, c) y su variación anual es muy parecida a la encontrada en el registro de Cartagena, con un mínimo en marzo, y un leve descenso en agosto, máximos valores del año se encuentran en noviembre antes de volver a descender. La amplitud de esta oscilación es de unos 40cm (Figura 39d).

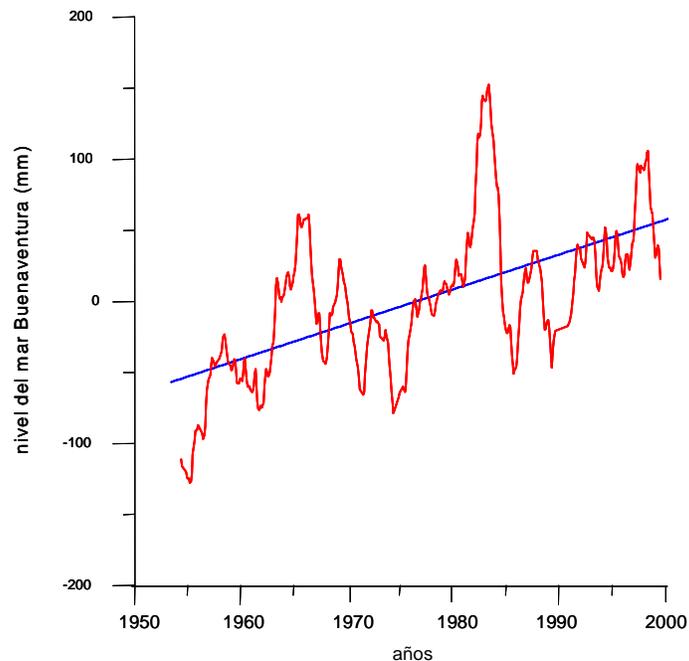


Figura 39 Media mensual multianual del nivel del mar en Buenaventura (1951-2000) luego de haber filtrado la señal con un 'running average' de 21 puntos. Los picos prominentes en las fluctuaciones más extremas ocurrieron durante los eventos cálidos del fenómeno ENSO (1976, 1982, 1997) y lo contrario durante los eventos 'fríos' conocidos como "La Niña". Los valores mensuales multianuales muestran grandes amplitudes durante la fase positiva del fenómeno ENSO y una vez filtrada la oscilación es notable al responder a dicha anomalía climática.

Con base en cincuenta años de registro (1951-2000), la tendencia lineal del nivel del mar en la serie de Tumaco es:

$$\text{Nivel del mar (mm)} = -0.080 * \text{años};$$

dando como resultado un descenso de 4 cm en cincuenta años. Este resultado se podría atribuir, si se tiene en cuenta que la localización del mareógrafo se encuentra en la isla del Morro, cercana a Tumaco, donde por estar en una zona tectónica muy activa y sobre un eje de levantamiento, es factible que esta isla esté subiendo más rápido que el nivel del mar en ese sector.

Para contrastar las series de nivel del mar en la costa colombiana con otras más largas en la vecindad se escogió la del puerto de Balboa en Panamá, el cual tiene registros desde 1907 (Figura 40).



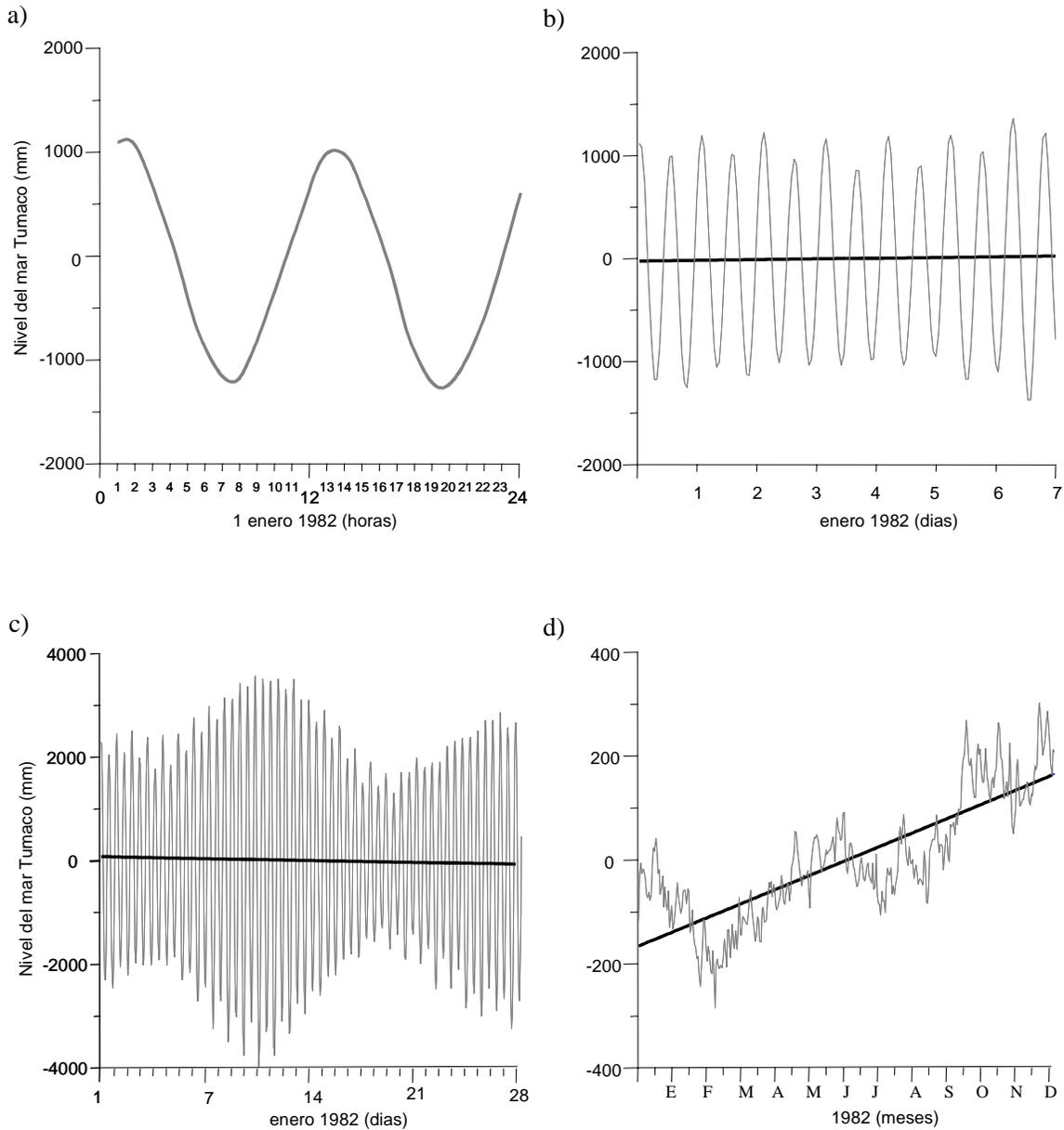


Figura 40 Aspectos del nivel del mar en la estación de Tumaco a) durante 24 horas (el 1 de enero de 1982) b) la primera semana de enero de 1982 c) el mes de enero de 1982 y d) el año 1982. La oscilación diaria es la marea que tiene caracter semidiurno y modula la mayoría de la varianza alrededor de la media. Una vez filtrada la señal de la marea, la variación del nivel del mar residual es debida a otras causas como tsunamis, el fenómeno de El Niño-Oscilacion del Sur (ENSO) u ondas de Rossby de gran amplitud. Durante 1982 hubo un notable aumento del nivel del mar producido por el ENSO de ese año.

Las medias diarias y mensuales no muestran signos de desplazamientos y están de acuerdo con las estaciones vecinas mas cercanas. Los datos de 1907-1981 fueron tomados en 08 57.4N, 079 33.7W y luego la estación fue movida alrededor de una milla a su posición actual. Diferencias en los valores diarios de Balboa con Tumaco, Puerto Armuelles, y Quepos (NODC, 2000) indican que el periodo entre el 22-Mayo- 20 Julio 1987 pudo haber sido 8cm muy alto sin que esto sea significativo para el presente estudio. Los valores anormales en 1988 y 1989 están de acuerdo con el viento durante el mismo periodo el cual fue anormalmente fuerte del

ENE durante los meses de invierno. Esta anomalía aun se encuentra en investigación. Los altos valores anormales de Sep 29 – Oct 1, 1992 han sido confirmados y no fue un desperfecto del instrumento.

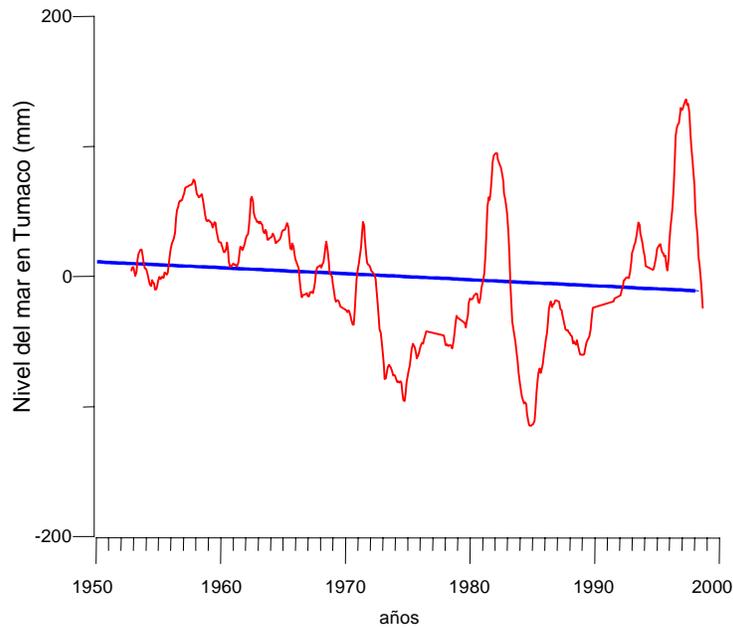


Figura 41 Media mensual multianual del nivel del mar en Tumaco (1951-2000) luego de haber filtrado la señal con un ‘running mean’ de 28 puntos. Los picos prominentes en las fluctuaciones más extremas ocurrieron durante los eventos cálidos del fenómeno ENSO (1976, 1982, 1997) y lo contrario durante los eventos ‘fríos’ conocidos como “La Niña”. En esta serie es notable cómo el aumento del nivel del mar en cada evento ha sido consistentemente más elevado en los últimos 30 años.

Un tsunami aparece en la serie llegando a Balboa el 24 de Mayo de 1960 (Figura 42b), En esta serie los picos producidos durante los años del ENSO son altamente distinguibles y corresponden con los aumentos en ambas estaciones colombianas. Con base en 90 años de registro (1907-1997), la tendencia lineal del nivel del mar en la serie de Balboa es:

$$\text{Nivel del mar (mm)} = 0.119 * \text{años};$$

que da como resultado un ascenso de casi 11 cm en 90 años.

En resumen, las estaciones de nivel del mar en Cartagena y Buenaventura muestran un aumento más rápido que el encontrado en las estaciones de Panamá, donde parecería subir a la mitad de la velocidad. La estación de Tumaco muestra un leve descenso en el nivel del mar en los últimos 50 años.

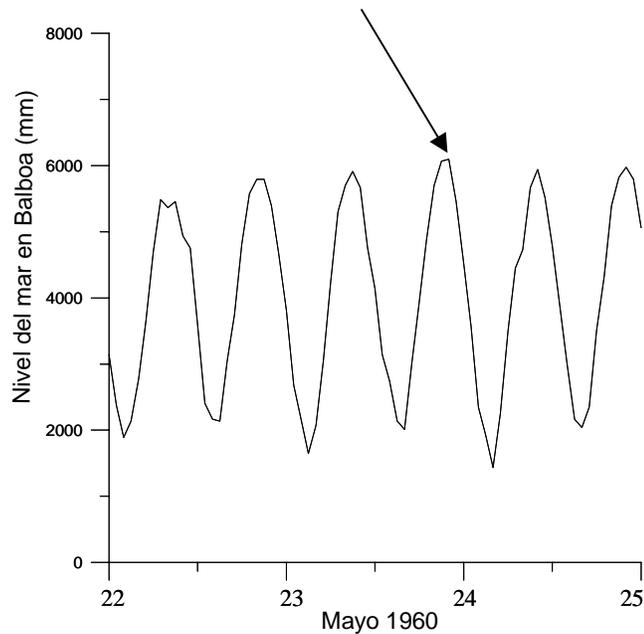
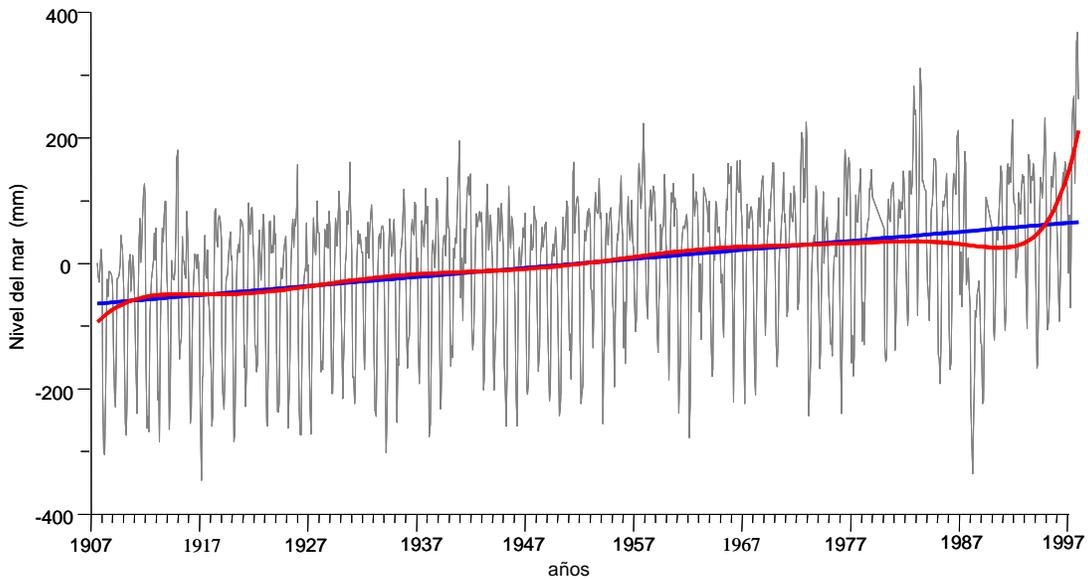


Figura 42 a) Media mensual multianual del nivel del mar Balboa 1907-1997. La elevación de los años de ENSO es consistente con las presentadas a lo largo de la costa colombiana. La tendencia lineal muestra un aumento constante de 1.43 mm/año (12.9cm en 90 años), mucho menor a la ocurrida en Buenaventura (2.4mm/año). El descenso ocurrido en 1988-89 también aparece en otras estaciones cercanas y están en relación con la intensidad del viento en esos años. b) La llegada de un tsunami a Balboa (indicado por la flecha) en Mayo de 1960 quedó registrada en la observación horaria como una oscilación de marea anormalmente mayor en esos días.

8.5 Conclusiones y escenarios climáticos adoptados

Un pronóstico de la temperatura y nivel del mar para el 2100 se representa en la Figura 43. El área sombreada para cada proyección representa el grado de incertidumbre en la 'mejor suposición' del escenario descrito por Houghton *et al.*, (1992) calculado por Wigley y Raper (1992) para un cambio de equilibrio de la temperatura global ($\Delta T_{2x}=2.5^{\circ}\text{C}$) debido al equivalente doblamiento del CO_2 .

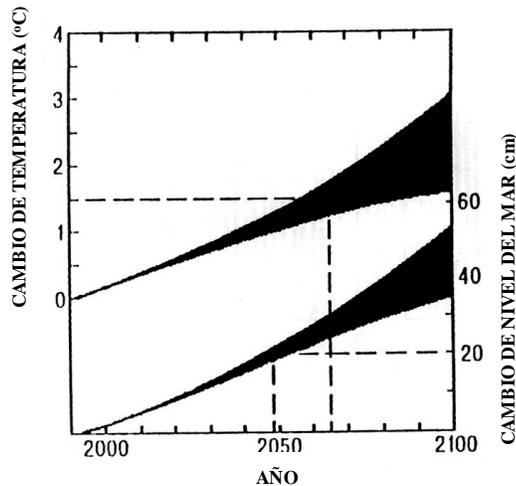


Figura 43. Proyecciones de la temperatura global (curvas superiores) y nivel del mar (curvas inferiores) para varios escenarios propuestos por el IPCC (1992). El campo de estimación de las proyecciones se encuentra entre las áreas oscurecidas de acuerdo con los 'mejores predictores' y los modelos del clima. Redibujados de Wigley y Raper (1992), las proyecciones solo muestran el componente antropogénico de un clima futuro, con una variabilidad natural súper impuesta, (adaptado de Maul, 1993). De acuerdo con esta proyección los 20 cm de elevación del nivel relativo del mar se alcanzarán alrededor del 2050 mientras que la elevación de la temperatura ambiente en 1.5°C solo ocurriría en el 2065.

Basados en las estimaciones del IPCC, la temperatura global y el nivel del mar estarán más altos 2.5°C y 48cm en el 2100 con respecto del nivel actual, un poco más bajos que los estimados en el IPCC (1990) con respecto al escenario que se analizó por la WMO/ICSU/UNEP (1985) de 1.5°C y 20cm para el 2025 respectivamente, la Figura 32 sugiere que la elevación de 1.5°C es más probable que ocurra en el 2060 y los 20cm de elevación alrededor del 2050. Ahora bien, el rango de incertidumbre es mucho mayor para el 2100 que para el 2050 y hay pocas dudas que en los cálculos de Wigley y Raper (1992) para la mitad de este siglo estamos esperando una tierra más caliente.

En el periodo estudiado (alrededor de 50 años desde 1941 hasta 1994) los datos de precipitación en la costa colombiana muestran que esta decreció de manera significativa hasta los años 80 luego de los cuales el régimen está cambiando y ha aumentado en algunos casos. La temperatura ambiental en la costa colombiana está subiendo desde los años 80 como lo ha hecho el resto del globo, las tendencias muestran como las décadas de los 60s y 70s fueron más frías y menos variables. La bondad de los datos observados no fue analizada ya que no se tienen elementos para efectuar un análisis del error en la observación. Por tal razón estas conclusiones deben utilizarse con precaución hasta poder corroborar estos datos con otras fuentes. Sin embargo, y debido a que las tendencias encontradas en los resultados son compatibles con eventos conocidos, de manera inversa los resultados encontrados hablan bien de los registros por lo que al menos se puede aseverar que las series son aceptables.

Como hay tantos registros cortos de nivel del mar y del clima y es tan difícil hacer conclusiones con ellos, valdría la pena hacer un análisis de datos históricos, arqueológicos y geológicos como un método efectivo para fortalecer estas conclusiones.

Del análisis anterior y de acuerdo a las condiciones del océano y la atmósfera predominantes en el área de influencia sobre la costa colombiana y teniendo en cuenta la gran extensión de las costas colombianas y la falta de información cartográfica y la poca predicción de los datos registrados, se toma para efectos del presente estudio, dos únicos escenarios de ascenso del nivel del mar correspondiente a 30 cm de ascenso del nivel del mar para el año 2030 y 1 m de ascenso en el año 2100. Este último valor permite la comparación entre los diferentes estudios pertenecientes al NCCSAP.

SIN PROYECCIÓN	Sin aumento del nivel del mar (ARNM₀)
	<u>Nivel del Mar:</u> 0.0 m. <u>Precipitación:</u> Promedio <u>Aumento de la temperatura del aire</u> 0°C <u>Anomalías de temperatura del mar</u> : 0° C <u>Emisión de CO₂:</u> niveles actuales
ESCENARIO	Con aumento del nivel del mar(ARNM₁)
	<u>Nivel del Mar:</u> 0.30 m. <u>Precipitación:</u> Promedio <u>Aumento de la temperatura del aire</u> +1.6°C <u>Anomalías de temperatura del mar</u> : <1.5° C <u>Emisión de CO₂:</u> Menos de una vez la emisión actual
ESCENARIO	Con aumento del nivel del mar(ARNM₂)
	<u>Nivel del Mar:</u> 1 m. <u>Precipitación:</u> Moderada, – 15% del promedio <u>Aumento de la temperatura del aire</u> +2.5°C <u>Anomalías de temperatura del mar</u> : <2.5° C <u>Emisión de CO₂:</u> Dos veces la emisión actual

Límites de áreas en riesgo

Oscilaciones anómalas del nivel del mar en la costa colombiana

Como se mencionó en el capítulo anterior, el nivel del mar en las costas colombianas es principalmente modulado por la oscilación de la marea semidiurna, siendo su amplitud del orden de centímetros en el Caribe y de metros en el Pacífico. Sumada a esta oscilación, hay ‘pulsos’ de ondas de distintos periodos que afectan la zona costera.

La probabilidad de que oscilaciones del nivel medio del mar produzcan inundaciones parciales sobre la costa, como parte integral de la evaluación de la vulnerabilidad ante eventos súbitos de ascenso del nivel medio del mar, puede ser estudiada a través del análisis de los registros históricos de niveles medios de marea; En las costas colombianas es posible ubicar cuatro estaciones mareográficas, dos en el Caribe (Cartagena) y dos en el Pacífico (Tumaco y Buenaventura). Estos registros pueden ser traducidos en elevaciones máximas de nivel promedio del mar que reflejan la probabilidad y el riesgo de inundación de cada una de las costas. A partir de los datos de estas estaciones se genera un modelo de predicción de eventos extremos, lo cuales son de gran importancia para evaluar las posibles áreas de riesgo causados por un súbito ascenso del nivel del mar.

Debido a que no se cuenta con una cartografía detallada de nuestras costas que muestre cotas de nivel inferiores a 25 m o 60 m (para algunas regiones del Pacífico colombiano), fue necesario desarrollar un modelo basado en la construcción de representaciones digitales de elevación, que permiten comparar los valores de altura del terreno con los valores de frecuencia de inundación de acuerdo al área geográfica estudiada, generando como resultado un mapa de áreas de riesgo para cada caso.

9 Modelo de riesgo de inundación

El modelo de riesgo de inundación se basa en la construcción de un modelo digital de elevación que permite comparar los valores de altura del terreno con los valores de frecuencia de inundación de acuerdo al área geográfica estudiada, generando como resultado un mapa de áreas de riesgo para cada caso.

9.1 Modelos digitales de terreno

Un modelo digital de terreno (MDT⁵) se puede definir como la estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Son modelos simbólicos ya que las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto real tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. Entonces se puede decir que el MDE es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, es decir, describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de cotas, que de forma genérica puede expresarse como una función bivariable continua $z = f(x,y)$ donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x,y) y f es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevación –MDE, se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto, D . En consecuencia, $MDE = (D, f)$

⁵ Puede observarse el uso del término MDT como sinónimo de MDE (Modelo digital de elevación) ya que no se hace referencia explícita a la variable representada que puede ser cualquiera que cumpla los requisitos de la misma.

9.2 Estructura de los datos en MDE

La estructura de los datos en el MDE se han dividido en dos grupos en función de la representación de los datos (Figura 44):

1. Vectorial. Basado en entidades u objetos geométricos definidos por coordenadas de sus nodos y vértices. Se representan mediante puntos, líneas o polígonos. Las mas representativas son:
 - Contornos: polilíneas de altitud constante
 - TIN: red de triángulos irregulares adosados.
2. Raster. Basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie. Se representan mediante las llamadas celdas, teselas o pixeles.
 - Matrices regulares: Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada.
 - Quadrees: matrices imbricadas en una estructura jerárquica.

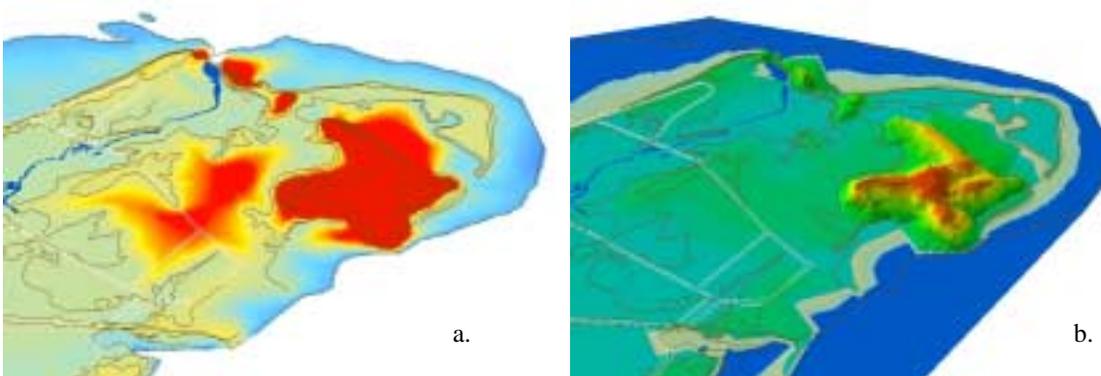


Figura 44. Modelo digital de elevación (MDE) en forma a. raster Matriz regular y forma b. vectorial "TIN"; Cerro del Faro de Tumaco, Pacífico colombiano

Los Sistemas de Información Geográfica -SIG y algunas aplicaciones dedicadas al tratamiento de los MDT usan las alternativas de matrices regulares y TIN, optando por usar más las matrices, ya que aunque los TIN son capaces de representar con fidelidad la topografía por su capacidad de adaptarse al terreno con un nivel de resolución variable, no permiten efectuar cálculos ni desarrollar modelos con la facilidad y rapidez de las matrices, éstas se han mostrado como estructuras mucho más simples conceptualmente y más adaptadas al tratamiento informático.

10 La construcción del MDE

La construcción de un MDE tiene como pasos generales la captura de la información hipsométrica, operaciones de estructuración y asignación de atributos y finalmente la interpolación.

La captura de la información de altitudes puede realizarse por varios métodos clasificados en directos e indirectos.

- Métodos directos que son medidos directamente sobre el terreno (altimetría, GPS, levantamientos topográficos)
- Métodos indirectos que son una medida estimada a partir de documentos previos (restitución, digitalización)

Antes de comenzar la operación de generar el MDE el archivo resultante del proceso de captura debe someterse a una serie de operaciones de estructuración y asignación de atributos que pueden ser las siguientes:

- Estructuración topológica, mediante la cual se crea la base de datos necesaria para mantener y gestionar las relaciones línea-nodo.
- Asignación de atributos a las líneas y puntos, si este no es asignado en el proceso de digitalización.
- Generalización, proceso de filtrado selectivo mediante el cual se elimina la información innecesaria o redundante en función del error admisible.

El conjunto de datos formado por las estructuras mencionadas sirve para generar un MDE que aproveche adecuada y eficazmente la información disponible. La totalidad de estructuras son vectoriales y son representadas en puntos, líneas o polígonos.

La elaboración del MDE entendido como la matriz regular a partir de la información vectorial es básicamente lo que se denomina interpolación, la cual consiste en la ubicación de los puntos de intersección de filas y columnas y estimación de la altitud de cada uno de ellos en función de los datos del entorno existentes en el modelo vectorial. Existen diversos algoritmos de interpolación, los más utilizados son interpolación en función de la distancia y kriging.

Como resultado del proceso se obtiene un MDE que intenta representar una realidad cuya veracidad depende directamente de la calidad y cantidad de datos que hayan sido incorporados, por tanto se conoce de antemano que existe un error inherente al proceso de modelización, el cual puede ser reducido pero no eliminado (<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT>).

10.1 Áreas de riesgo de inundación

Se conocen como áreas en riesgo de inundación las que son anegadas durante eventos extraordinarios como fenómenos de invierno en los que se incluyen las lluvias y cambios estacionales (aguaceros intensos, crecientes poco frecuentes o avalanchas) y algunos otros fenómenos que causan aumentos anómalos del nivel medio del mar.

Los fenómenos de mal tiempo que causan inundación en la zona costera pueden determinarse según el origen del fenómeno, sus consecuencias e intensidad. De esta forma, las marejadas, mares de leva, oleajes peligrosos, pujas y tormentas tropicales (vendavales, tormentas, tornados y demás ciclones reportados), se incluyen dentro de aquellos fenómenos que causan aumentos súbitos en el nivel medio del mar.

Para efectos de la determinación de las áreas en riesgo presente (2001) y futuro (2100) representados en los mapas anexos⁶. y utilizadas en los análisis del presente estudio, se incluyen además áreas inundables de los cauces mayores o rondas de los ríos, los cuales son ocupados con frecuencia del orden de una vez en 10 años (Silva, 2001) y que dan origen de igual forma a áreas con riesgo de inundación.

⁶ Mapas anexos: Áreas de riesgo de inundación actual, Caribe y Pacífico colombiano. Escala 1: 1'000.000

El modelo de inundación y la áreas demarcadas incluyen entonces todas las posibles causas que generan las inundaciones, dentro de las cuales se cuentan las siguientes:

- Encharcamiento por lluvias intensas sobre áreas planas.
- Encharcamiento por deficiencias de drenaje superficial.
- Desbordamiento de corrientes naturales.
- Desbordamiento de ciénagas.
- Avalanchas producidas por erupción volcánica, sismos, deslizamientos y formación de presas naturales.
- Obstáculos al flujo por la construcción de obras civiles: Puentes, espolones y obras de encauzamiento, viviendas en los cauces y represamientos para explotación de material aluvial.
- Sedimentación.

Estas causas pueden presentarse en forma individual o colectiva, generando así las líneas de contorno del modelo de inundación. Algunos de los problemas que han sido identificados con las inundaciones son los siguientes:

1. Anegamiento de las llanuras de inundación y daños en viviendas, vías de comunicación, y producción agropecuaria, con pérdida de vidas humanas en algunos casos.
2. Drenaje lento de las áreas inundadas las cuales se convierten en depósito de aguas prácticamente estancadas. Esta situación genera problemas sanitarios sobre la población.
3. Ataques del flujo sobre las márgenes del cauce principal lo cual produce cambios de curso permanentes y pérdida de áreas productivas.

Los problemas anteriores ya se han detectado en el sur del Caribe y en otras áreas vecinas. Este análisis debe servir de alarma para que independientemente que se presente el esperado aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático global o no, la adecuación de tierras sujetas a inundaciones extensas debe tener la debida atención, involucrando aspectos sociales, ecológicos y de ingeniería, los cuales solo pueden analizarse dentro de un contexto de desarrollo integrado de la región. En general las zonas donde se presentan inundaciones ocasionales, constituyen zonas altamente desarrolladas tanto rurales como urbanas, debido a que los prolongados períodos de retorno involucrados en dichos fenómenos hacen que las personas afectadas subestimen la magnitud del riesgo.

11 Valores de frecuencia

Teniendo como base los valores de nivel medio del mar de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el Caribe y en el Pacífico (Tabla 4), se realizaron los análisis necesarios para determinar los valores de frecuencia de inundación máxima en períodos de 10 y 100 años (utilizando los valores de las estaciones de Panamá) teniendo que ser el valor de riesgo en 1000 años extrapolado de las curvas de ajuste generadas a partir de las siguiente ecuación:

$$y^{0.5} = a + bx^{2.5}$$

donde: **a**= 54.56 **b**= 4.87 **x**= año

Los valores de frecuencia de riesgo de inundación estimados para cada área de estudio se expresan en la Tabla 4 y Figura 45:

Tabla 4. Valores de nivel medio del mar en metros, causados por eventos extremos en períodos de 10 años, 100 años y 1000 años, con base en el modelo de predicción.

Área geográfica	Riesgo Actual (metros)			Riesgo Futuro (metros)		
	Area I 1/10	Area II 1/100	Area III 1/1000	Area I 1/10	Area II 1/100	Area III 1/1000
Costa Caribe	0.850	0.907	0.9832	1.850	1.907	1.9832
Costa Pacífica	4.15911	4.303	4.45499	5.1591	5.303	5.45499
Caso UMI-Guapi Iscuandé	4.15911	4.303	4.45499	5.1591	5.303	5.45499
Caso Golfo de Morrosquillo	0.850	0.907	0.9832	1.850	1.907	1.9832
Caso Area Urbana de Tumaco	0.300	4.640	6.370	1.300	5.640	7.370

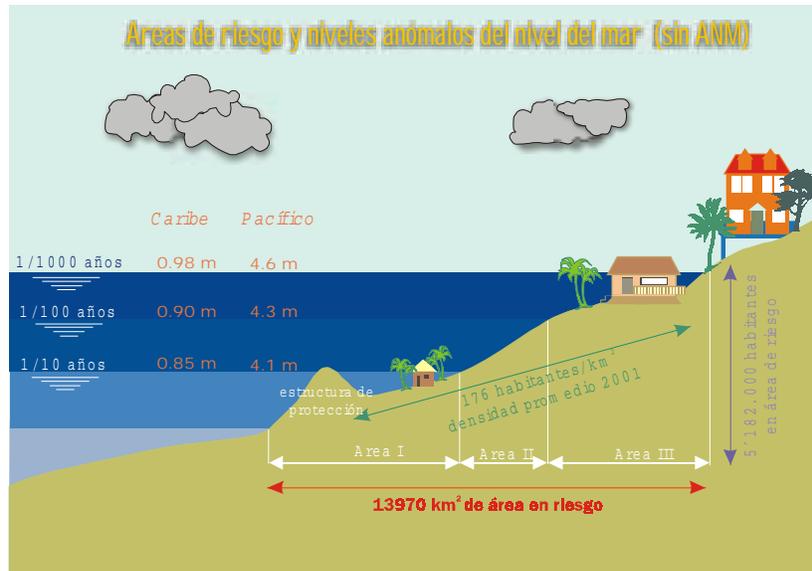


Figura 45. Representación esquemática de los límites que definen las áreas de riesgo, incluyendo algunos datos referentes a la población total al año 2001 que habita dentro de la misma.

11.1 Construcción de líneas de riesgo de inundación 1/10, 1/100, 1/1000

11.1.1 Captura y estructuración de datos

Como no se cuenta con topografía digital al nivel de detalle necesario para el modelo en las áreas de estudio de la costa Caribe, costa Pacífico, caso de estudio UMI Guapi-Isucandé y caso de estudio Golfo de Morrosquillo, se asumieron los siguientes supuestos:

1. La línea de inundación obtenida por criterios geomorfológicos se asumió como la cota de un metro.
2. Los límites de las lagunas costeras es la cota de 0.3 metros
3. Las terrazas (en el Pacífico) es la cota de 5 metros
4. La línea de costa es la cota de 0 metros

Los datos de nivel medio del mar proveniente de las estaciones mareográficas de Cartagena, fueron extrapolados como valores para todo el Caribe. De igual forma la serie de datos de Buenaventura, por tener un registro histórico mayor al de Tumaco, se extrapoló al resto de la costa del Pacífico colombiano.

Adicionalmente, para complementar estos datos se incorporaron las curvas de nivel de 50 m y 25 m de la cartografía digital del DANE en las zonas donde existía y la línea de 60 m definida para los límites del área de estudio.

Para garantizar que los datos fueran coherentes y no generaran resultados erróneos se realizó una verificación detallada de estas líneas apoyada en la información obtenida en la caracterización e información secundaria.

En el caso de estudio Tumaco si se contaba con curvas de nivel a buen nivel de detalle.

11.1.2 Interpolación

A partir de los datos vectoriales obtenidos del proceso anterior, se procedió a generar el MDE con una resolución espacial (tamaño del pixel) de 50 m y el soporte tecnológico del software Ilwis por su capacidad para manejar grandes cantidades de información raster.

El algoritmo de interpolación utilizado es el denominado “Interpolación en función de la distancia” y se aplica mediante el comando ‘Contour Interpolation’ generando un modelo de matriz regular.

11.1.3 Análisis de riesgo de inundación



Sobre el MDE se clasifican o agrupan los valores del mapa raster en los rangos definidos como valores de frecuencia de inundación mediante la utilización de la función “Slicing”⁷ de Ilwis.

Por ejemplo, los valores de altura que estén entre 0 y 0.850 metros estarán en riesgo de inundación 1/10 (Área I), los valores que se encuentre entre 0.850 y 0.907 metros serán del área en riesgo 1/100 (Área II) y así respectivamente para cada uno de los rangos. Como resultado se obtiene un mapa de áreas de riesgo de inundación representadas en polígonos con su atributo respectivo (Figura 46).

Figura 46. Ejemplo de áreas de riesgo de inundación. Sector Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano

12 Conclusiones

Con el fin de observar los posibles impactos y efectos causados por el acelerado ascenso del nivel del mar sobre las costas colombianas, se ha definido como área de estudio, la franja de territorio demarcada por las líneas de nivel de -200 m mar afuera y 60 m tierra adentro sobre las costas Caribe (62217 km²) y Pacífico continental (40345 km²). La escala de trabajo del análisis se realiza con una resolución de 1:300.000. El área Insular de San Andrés, es contemplada de igual forma en el informe, pero basándose en un estudio similar al presente.

⁷ <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT>, Conceptos básicos, modelo y simulación y El modelo digital de elevaciones, de FELICISIMO Angel Manuel.



De igual forma se han escogido tres áreas caso de estudio, para realizar un análisis a más bajo nivel de resolución que el nacional, con el fin de que sirvan de herramienta de análisis en el estudio. Estas son, la zona norte de la Unidad Ambiental Costera del Golfo de Morrosquillo (1:100.000), la Unidad de Manejo Integrado Guapi-Iscuandé (1:50.000) y el área urbana de la población de San Andrés de Tumaco (1:10.000).

Teniendo en cuenta la gran extensión de las costas colombianas y la falta de información cartográfica detallada, se evalúan dos únicas proyecciones de ascenso del nivel del mar, correspondientes a 30 cm de ascenso del nivel del mar para el año 2030 y 1 m de ascenso en el año 2100. Este último valor permite la comparación entre los diferentes estudios pertenecientes al NCCSAP.

Bibliografía

- AGU-American Geophysical Union. 1992. Special Report. Volcanism and Climate Change, AGU, Washington DC., 27pp.
- Andrade, C.A. 2000. Circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea, Ph.D. Thesis at the University of Wales Menai Bridge, U.K. 223pp.
- DANE. 2001. Población Total Censada en 1993, 1985, 1973 y 1964 por sexo, según grupos de edad. Total Nacional. http://www.dane.gov.co/Informacion_Estadistica/informacion_estadistica.html.
- Díaz, J. M., L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G.H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Angel, F.A. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas Coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 5, Santa Marta, 176.
- Digerfeldt,-G.; Hendry,-M.D. An 8000 year Holocene sea-level record from Jamaica: Implications for interpretation of Caribbean reef and coastal history. CORAL-REEFS. 1987. vol. 5, no. 4, pp. 165-169.
- Espinal, L. S. y E. Montenegro. 1963. Formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Bogotá: Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Editorial Canal Ramírez, 201 p. + 1 mapa. [reeditado en 1977].
- Gallegos, A., S. Czitrom, J. Zabala and A. Fernández. 1993. Scenario Modelling Of Climate Change On The Ocean Circulation Of The Intra-Americas Sea, , in: Climatic Change in the Intra-Americas Sea, Edited by G. Maul, Edward Arnold Press, 55 – 74.
- GIECC- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático . 2001 Informe Especial del IPCC Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de Políticas. 27 p.
- González, H., A. Núñez y G. Paris. 1988. Mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá.
- González, J. L. e I. D. Correa. 2001. Late Holocene Evidence of Coseismic Subsidence on the San Juan Delta, Pacific Coast of Colombia. Journal of Coastal Research.17 (2): 459-467.
- Hansen y Lebedeff. 1998. Global surface air temperature: Update through 1987, Geophys. Res. Lett., 15(4), 323-326.
- Hanson, K. and G.A. Maul. 1993. Analysis Of Temperature, Precipitation And Sea-Level Variability With Concentration On Key West, Florida, For Evidence Of Trace-Gas-Induced Climate Change, in: *Climatic Change in the Intra-Americas Sea*, Edited by G. Maul, Edward Arnold Press, 193 – 211.
- Herd, D. G., L. Youd, H. Meyer, J. L. Arango, W. J. Person y C. Mendoza. 1981. The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 december 1979. Science, 211. 441-445.
- Hodell, D.A., J.H. Curtis, G.A. Jones, A. Higuera-Gundy, M. Brenner, M.W. Binford y K.T. Dorsey. 1991 Reconstruction of Caribbean Climate Change over the past 10.500 years, Nature, 352, 790-793
- Houghton, J., B. Callander y S. Varney. 1992. Climate Change 1992, the supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 224 pp.



- Hulme, M. y Sheard, N. 1999. Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte, Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6pp.
- Idso, S.B., Carbon Dioxide and Global Change: Earth in Transition, IBR Press, Tempe, Arizona, 292pp., 1989.
- IGAC- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. 2001. Mapa Oficial de la República de Colombia. <http://www.igac.gov.co/mapas.htm#>
- IPCC. 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 365 pp.
- IPCC. 1992. Climate Change, the Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. J. T. Houghton, B. A. Callendar, and S. K. Varney, eds. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 200 pp.
- IPCC. 1994. Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations with a Summary for Policy Makers and a Technical Summary T.R.Carter, M.L.Parry, H.Harasawa, S.Nishioka (Eds). Department of Geography, University College London, UK and the Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan. pp 59.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change; J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (Eds.); Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- IPCC. 2001. Summary for Policymakers. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>]
- INVEMAR, CRC, CORPONARIÑO, IIAP. 2001. Formulación del plan de manejo integrado de la zona costera del complejo de las bocanas de Guapi-Iscuandé, Pacífico Colombiano. Fase I Caracterización y Diagnóstico. 621 páginas + anexos.
- INVEMAR-Carsucre-CVS. 2002. Formulación del plan de manejo integrado de la zona costera de la UAC Golfo de Morrosquillo. Documento interno. Santa Marta, 498 p.
- Lamb, P.J. 1987. On the development of regional climatic scenarios for policy-oriented climatic-impact assessment. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 68(9), 116-1123.
- MacCraken, M.C., M.I. Budyko, A.D. Hecht y Y.A. Ysrael, (Eds). 1990. Prospects for Future Climate, Lewis Pubs., Inc., Chelsea MI 48118, 270pp.
- Maul, G. 1993. Implications of future climate on the ecosystems and socio-economic structure in the marine and coastal regions of the Intra-Americas sea, in: Climatic Change in the Intra-Americas Sea, Edited by G. Maul, Edward Arnold Press, 3 –28.
- Mercado, A., J.D. Thompson and J.C. Evans. 1993. Requirements of Modelling of future storm surge and ocean circulation, , in: Climatic Change in the Intra-Americas Sea, Edited by G. Maul, Edward Arnold Press, 75 – 84,.
- Mercer, J. H. 1970. Antarctic Ice and Interglacial High Sea Levels. Science, 168:1605-1606.
- Ministerio del Medio Ambiente – MinAmbiente-. 2001. Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia. Panamericana Formas e Impresos S.A. Bogotá. 95 p.



- Montealegre, E. y D. Pabón, Características climáticas relevantes en el nor-occidente sudamericano durante la ocurrencia de los fenómenos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), Bol Cient. CIOH, 12, 55-68, 1992.
- Prahl, H. von, J.R. Cantera, and R. Contreras. 1990. Manglares y hombres del Pacífico colombiano. Fondo FEN COLOMBIA/COLCIENCIAS. Editorial Presencia. Bogotá, D.E. (Colombia), 193 p
- Pugh, D. T., N. E. Spencer, and P. L. Woodworth. 1987. Data Holdings of the Permanent Service for Mean Sea Level. Bidston Observatory, England.
- Pujos, M., J. Monente, C. Latouche y N. Maillet. 1997 Origin of sediment accumulation in the Orinoco Delta and the Gulf of Paria- Amazon river sediment input: *Oceanologica Acta*, 20 (6): 799-809.
- Ramírez J. y J. Goberna. 1980. Terremotos colombianos Noviembre 23 y Diciembre 12 de 1979. Instituto Geofísico de los Andes. Universidad Javeriana. Serie A: Sismología No. 45. Bogotá.
- Steer, R.; F. Arias; A. Ramos; P. Sierra-Correa; D. Alonso y P. Ocampo 1997. Documento Base para la Elaboración de la “Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas”. Serie de Publicaciones especiales No.6. 390 p.
- Titus J. G., S. P. Leatherman, C. H. Everts, D. L. Kriebel y R. G. Dean. 1985. Potential Impacts of Sea Level Rise on the Beach at Ocean City, Maryland. EPA 230-10-85-013 Washington, DC 20460. [Internet Version 9/99]
- UAESPNN-Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales. 1998. El Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. I/M. Editores. Santafé de Bogotá. 498p.
- Wanless, H. R., Tyrrell, K. M., Tedesco, L. P., and Dravis, J. J. 1988. Tidal-flat sedimentation from Hurricane Kate, Caicos Platform, British West Indies: *Journal of Sedimentary Petrology*, v., 58, p. 724-738.
- Wigley, T.M.L. y S.C.B. Raper, Implications for climate and sea-level of revised IPCC emissions scenarios, *Nature*, 357, 293-300, 1992.
- Wigley, T.M.L. and B.D. Santer. 1993. Future climate of the Gulf/Caribbean Basin from the global circulation models. In: *Climatic Change in the Intra-Americas Sea* [Maul, G.A. (ed.)]. Edward Arnold, London, United Kingdom, pp. 31–54.
- WMO/ICSU/UNEP.1986. Report of the International Conference on the Assessment of the role of Carbon Dioxide and of other greenhouse gasses in the Climate variations and Associated Impacts, held in Villach, Austria, 9-15 October 1985, WMO ref. No. 661, 1-4.

Anexo

Escenarios de emisiones

Las proyecciones sobre el clima futuro han sido formalmente debatidas desde 1985 en la literatura científica. En 1990 y 1992, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo. Esos escenarios se han utilizado profusamente para el análisis de un posible cambio climático, de sus repercusiones y de las opciones para mitigar dicho cambio. Estos cambios conciernen, por ejemplo, a la intensidad en carbono del suministro de energía, a la desigualdad de ingresos entre los países desarrollados y los países en desarrollo y a las emisiones de azufre.

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico o el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta (GIECC, 2001).

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis.

Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota (GIECC, 2001).

Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollan cuatro líneas evolutivas diferentes. Cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental, que algunos pueden valorar positivamente y otros negativamente.

Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia” de escenarios (Figura A1).

Para cada línea evolutiva, se han desarrollado varios escenarios distintos basados en diferentes planteamientos de los modelos, con objeto de examinar todos los posibles resultados que se obtendrían de una serie de modelos basados en unos supuestos similares sobre los factores determinantes. Dentro de cada familia, se han desarrollado dos clases principales de escenarios: unos, basados en supuestos armonizados sobre la población mundial, el crecimiento económico y el uso final de la energía, y otros basados en una cuantificación alternativa de la línea evolutiva.

En conjunto, se han armonizado 26 escenarios mediante la adopción de unos supuestos comunes sobre la población mundial y sobre el desarrollo del producto interior bruto (PIB). Así pues, los escenarios armonizados de cada familia no son independientes entre sí.

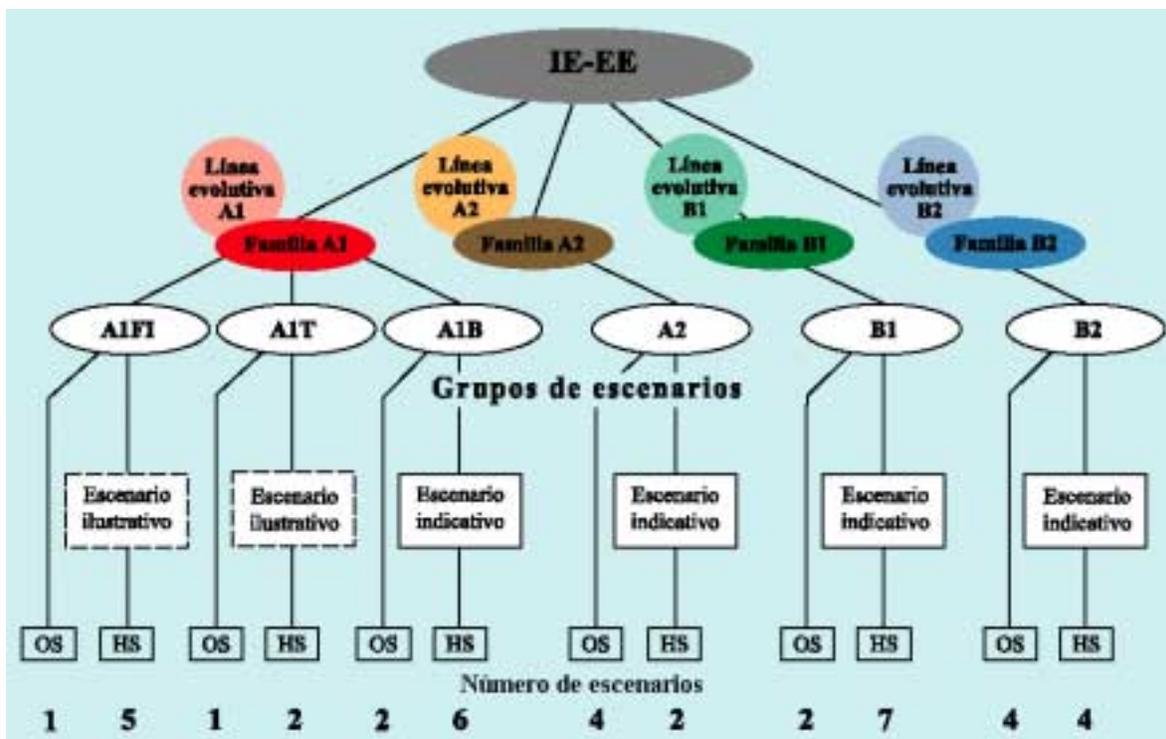


Figura A 1. Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE. Cuatro líneas evolutivas cualitativas proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados “familias”: A1, A2, B1 y B2. En total, seis equipos de modelizadores han desarrollado 40 escenarios IE-EE. Todos ellos son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A1, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía: AIFI (utilización intensiva de combustibles de origen fósil), A1B (equilibrado) y AIT (predominantemente con combustibles no de origen fósil). Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final. Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados. Se indica también el número de escenarios desarrollados en cada categoría. Para cada uno de los seis grupos de escenarios se ofrece un escenario ilustrativo (que será siempre armonizado). En el proceso abierto del IE-EE de 1998 se utilizaron cuatro proyectos de escenario indicativos, uno para cada familia; dichos escenarios se incluyen en la versión revisada del presente informe. Se incluyen también otros dos escenarios ilustrativos de los grupos AIFI y AIT, con lo que se obtiene un total de seis escenarios ilustrativos de todos los grupos de escenarios. Todos ellos son igualmente correctos. Tomado de GIECC, 2001.

En los 14 escenarios restantes se han adoptado interpretaciones alternativas de las cuatro líneas evolutivas, con objeto de explorar las incertidumbres adicionales con independencia de los planteamientos metodológicos de los distintos escenarios. Dichos escenarios están también relacionados entre sí dentro de cada familia, aun cuando no compartan supuestos comunes con respecto a algunas fuerzas determinantes. Hay seis grupos de escenarios que deberían considerarse igualmente adecuados y que abarcan muy diversos valores de incertidumbre, conforme se requiere en el mandato. Dichos escenarios abarcan cuatro combinaciones de cambios demográficos y de evoluciones sociales y económicas, así como de grandes corrientes tecnológicas, en correspondencia con las cuatro familias (A1, A2, B1, B2), cada una de ellas acompañada de un escenario de referencia a título ilustrativo. Dos de los grupos de escenarios de la familia A1 (AIFI, AIT) exploran explícitamente evoluciones alternativas de las tecnologías de la energía manteniendo constantes las demás fuerzas determinantes, cada una de ellas con un escenario ilustrativo.

Un crecimiento rápido produce un rendimiento del capital elevado, lo cual significa que una diferencia inicialmente pequeña entre dos escenarios puede convertirse en una gran diferencia en 2100. Por esa razón, para ilustrar este efecto se ha elegido la familia A1, en la que el cambio tecnológico es más rápido que en todas las demás (GIECC, 2001).

En el año 2100 el mundo habrá experimentado cambios que resulta difícil imaginar: tan difícil como lo habría sido concebir, a finales del siglo XIX, los cambios acaecidos en los 100 años subsiguientes. Cada línea evolutiva está basada en una dirección de los acontecimientos futuros claramente diferenciada, de tal manera que las cuatro líneas evolutivas difieren con un grado de irreversibilidad creciente. En su conjunto, describen futuros divergentes que cubren una parte considerable de las incertidumbres inherentes a las principales fuerzas determinantes. Abarcan una gran diversidad de características “futuras” decisivas, como el cambio demográfico, el desarrollo económico o el cambio tecnológico. Por esa razón, su plausibilidad o su viabilidad no deberían considerarse solamente en base a una extrapolación de las tendencias económicas, tecnológicas y sociales actuales (GIECC, 2001).

- La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).
- La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la auto-suficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lenta-mente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.



Escenarios de Cambio Climático para Colombia

La información contenida a continuación fue obtenida de una serie producida por la WWF que describe el conocimiento en escenarios de cambio climático para un número de países y regiones alrededor del mundo⁸. Estos escenarios utilizan datos climáticos obtenidos por la Unidad de Investigación Climática, un grupo de escenarios para gases invernadero preparados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change o IPCC), y una serie reciente de experimentos en cambio climático que utilizan siete modelos de climático global, y cuyos resultados se encuentran disponibles en el Centro de Distribución del IPCC.

Los cuatro escenarios climáticos que se muestran aquí se relacionan con cuatro trayectorias de emisiones, definidas en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE) del IPCC. Estos son llamados B1, B2, A1 y A2. El cambio en emisiones de dióxido de carbono de fuentes energéticas/industriales para el año 2100, varía de un decremento del 4 por ciento (escenario B1) a un aumento de alrededor de 320 por ciento (escenario A2), si se compara con lo estimado para el año 2000 para estos cuatro escenarios.

*Tabla A- 1. Resumen de los cambios en el medio ambiente global para los años 2020, 2050 y 2080 para los cuatro escenarios. Los cambios han sido calculados con respecto al promedio en 1961-90. Los efectos de las partículas de sulfato sobre el clima no se calcularon. Los cambios en la temperatura global para los años 1980 y 1990 son los que se observan. (ppmv = partes por millón por volumen). *Se indican décadas.*

1980*	1990*		2020			2050			2080		
Temp GradC	Temp GradC		CO ₂ ppmv	Temp GradC	Nivel del Mar cm	CO ₂ ppmv	Temp GradC	Nivel del Mar cm	CO ₂ ppmv	Temp GradC	Nivel del Mar cm
0.13	0.28	B1-bajo	421	0.6	7	479	0.9	13	532	1.2	19
0.13	0.28	B2-med	429	0.9	20	492	1.5	36	561	2.0	53
0.13	0.28	A1-med	438	1.0	31	555	2.8	70	888	3.3	98
0.13	0.28	A2-alto	440	1.4	38	559	2.6	68	721	3.9	104

De acuerdo a estas estimaciones en futuras emisiones, se asume que no se existe ninguna aplicación de política climática. La concentración de dióxido de carbono atmosférico aumentará de la concentración actual de 1999 (370 ppmv) a una concentración cercana a 550 ppmv en el escenario B1 para el año 2100, y por arriba de 830 ppmv en el escenario A2. Las concentraciones de otros gases invernadero también aumentarían.

Se han escogido tres valores diferentes para la llamada sensibilidad climática ante el aumento de concentraciones de GEI- bajo (1.5°C), mediano (2.5°C) y alto (4.5°C). Mediante la combinación de estas tres elecciones de sensibilidad climática con los cuatro escenarios de emisiones del IE-EE, se calculan las variaciones en las curvas de cambio climático global y aumento en el nivel del mar (Tabla A1 y Figura A2), que tal vez, capturan aproximadamente el 90 por ciento de las posibles fluctuaciones del clima global.

Cambios en el clima y en el nivel del mar

Las temperaturas globales promedio aumentarían entre 1.3 y 4.6°C para el año 2100 (Figura A2), lo cual representa rangos de calentamiento global entre 0.1 y 0.4°C por década. Uno de los cambios más impresionantes debido al calentamiento climático será el aumento en el nivel del mar. Los escenarios propuestos sugieren un futuro aumento global promedio en el nivel del mar de entre 2cm y 10 cm por década, comparado con el aumento de entre 1cm y 2cm por década que se ha observado durante el último siglo.

⁸ Hulme, M. y Sheard, N. 1999. Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte, Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6pp.

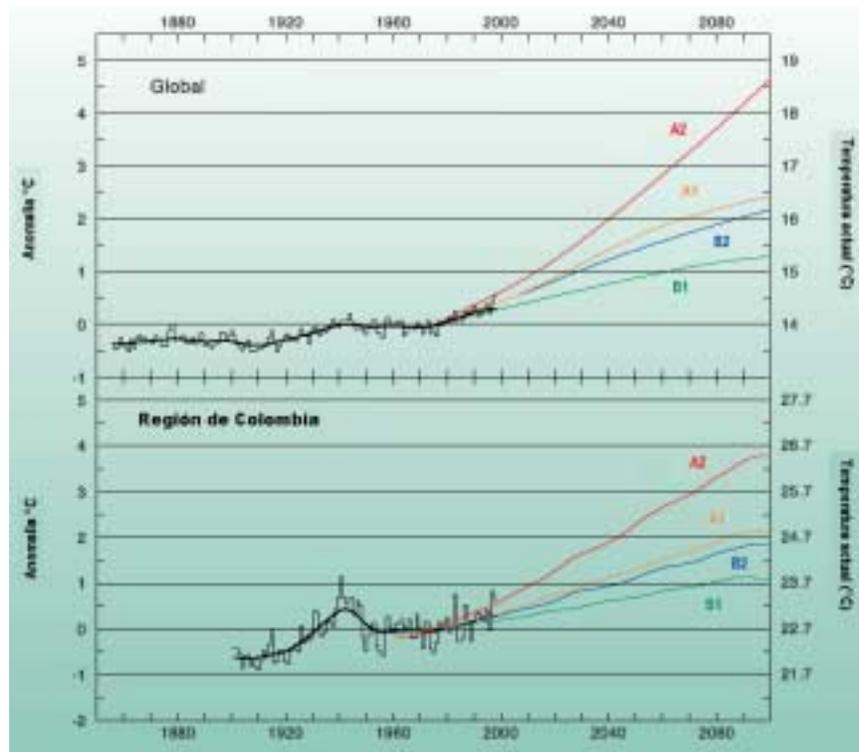


Figura A 2. Cambios calculados(1960-2100) en las temperaturas globales del aire superficial promedio (arriba) y en los Andes del Norte (abajo) anualmente y para los cuatro escenarios mostrados en la Tabla 1.

La mayor contribución para este cambio en el nivel del mar viene de la expansión del agua más caliente del océano, lo cual es un proceso inexorablemente lento que asegurará que el nivel del mar en el mundo continúe aumentando en los próximos siglos. futuros.

Estos varían de B1-bajo (el escenario de emisiones más bajo combinado con el de menor sensibilidad) a A2-alto (el escenario de emisiones más alto combinado con el de mayor sensibilidad). Siendo una región tropical, los Andes del Norte se calientan más lentamente que el promedio global (Figura A2).

El calentamiento anual para la década de 2050 varía de un poco más de 1°C en el escenario B1-bajo hasta a más de 3°C en el escenario A2-alto (Figura A3a). La tasa de calentamiento es constante a través del año, pero es un poco o algo más rápida en la meseta Andina y en el interior de la región, que a lo largo de la costas del Pacífico y de El Caribe

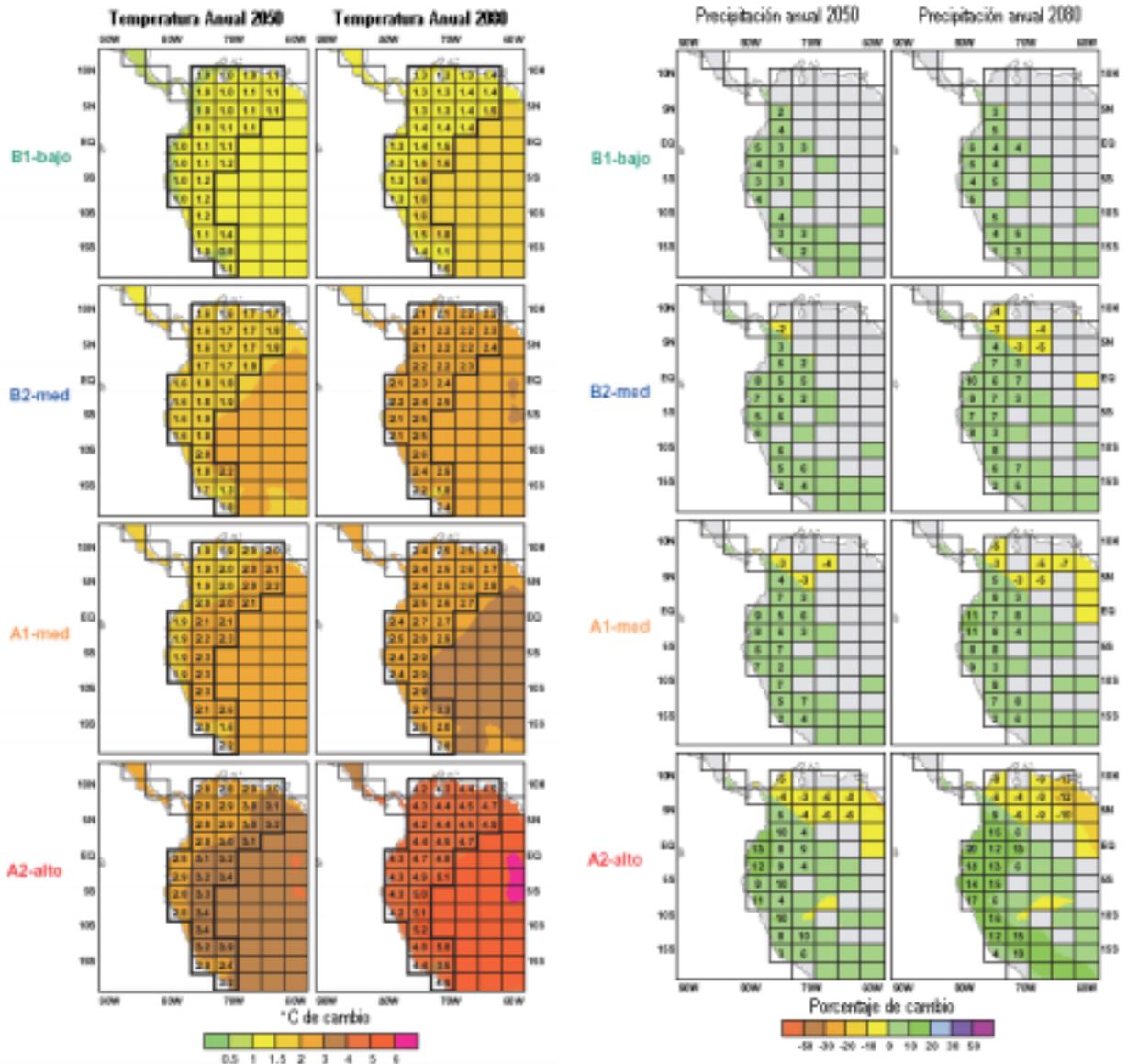


Figura A 3a Cambio en la temperatura anual media (grados Celsius del promedio del clima 1961-90) para periodos de 30 años centrados en las décadas de 2050 y 2080 para cada uno de los cuatro escenarios. Los números impresos muestran el cambio para cada modelo de tierra cuadriculada sobre la región de los Andes del Norte. Los cambios sólo son mostrados en donde estos son grandes en relación con la variación natural de la temperatura en escalas de tiempo de 30 años. b). Cambio en la precipitación media anual (cambio porcentual del promedio del clima 1961-90) para periodos de 30 años centrados en las décadas de 2050 y 2080 para cada uno de los cuatro escenarios. Los números impresos muestran el cambio estimado por cada modelo de tierra cuadriculada sobre la región de los Andes del Norte. Los cambios sólo se muestran en donde estos son mayores en relación a la variabilidad natural de la precipitación en escalas de tiempo de 30 años.

Cambio en la precipitación fluvial futura

Perú, Ecuador y la parte sur de Colombia se tornarán más húmedas en el futuro, pero el norte de Colombia y Venezuela serán más secos (Figura A3b).

Para el escenario B1-bajo estos cambios son muy modestos de tan sólo un porcentaje bajo. Sin embargo, para el escenario A2-alto hacia la década de 2080, el incremento en la precipitación anual sobre Ecuador alcanzará el 20 por ciento.

El contraste de las tendencias de precipitación entre el norte y el sur de la región es más evidente en la estación de junio a agosto; en la estación entre diciembre y febrero, prácticamente toda la región será más húmeda.

Niveles de Confianza e Imprevistos

Hay algunos aspectos del cambio climático en los que tenemos más confianza que en otros. Por ejemplo, tenemos más confianza con respecto a los incrementos en las concentraciones de bióxido de carbono y elevaciones del nivel del mar, que la que tenemos con respecto al aumento de las tormentas o eventos de precipitaciones intensas (Tabla 3). El comportamiento de los eventos de El Niño no siempre está bien representado en los modelos climáticos, por lo que predecir cómo cambiarán estos eventos debido al calentamiento global es también difícil- cualquier cambio en el fenómeno de El Niño podría tener un impacto en la región. Los escenarios mostrados aquí han sido derivados de modelos climáticos que incluyen la mejor representación posible de los procesos en la atmósfera, océano y continentes, dados nuestros conocimientos científicos actuales y la tecnología en informática con la que contamos.

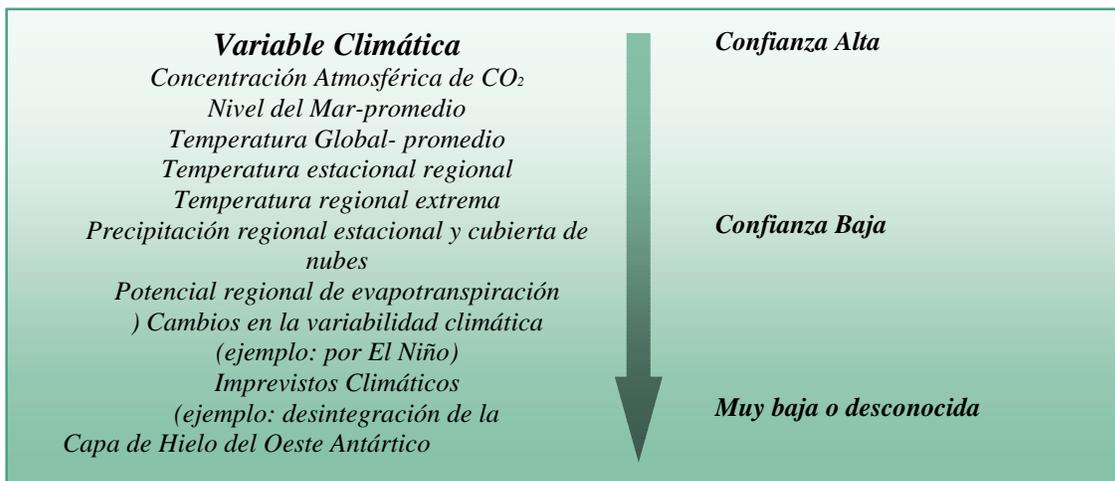


Figura A-5 Lista de climas y variables asociadas de escenarios, ordenadas subjetivamente en orden decreciente de confianza.



