

5. VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN

5.1. Evaluación de la vulnerabilidad y adaptación de los recursos hídricos de Nicaragua

Tomando como base los resultados de los “Escenarios Climáticos y Socioeconómicos de Nicaragua para el siglo XXI”, estudio mediante el cual queda demostrada la tendencia de incremento de la temperatura y la evaporación, y la disminución de la nubosidad y las precipitaciones en el transcurso de las próximas décadas, se ha llegado a la conclusión de que dichas variaciones podrían impactar negativamente el Sector Recursos Hídricos en lo referente a la disponibilidad, cantidad y calidad del agua. Por lo tanto se han desarrollado estudios de vulnerabilidad y adaptación del sector ante un futuro cambio climático, con el objetivo de que el país cuente con herramientas que le permitan reducir los efectos negativos de la variabilidad climática en la vida cotidiana de la nación e identificar los sectores de uso más vulnerables, la estrategia de aprovechamiento sostenible del recurso y las posibles medidas de adaptación.

La evaluación de la V&A de los Recursos Hídricos se ha desarrollado basándose en el análisis aplicado del concepto del ciclo hidrológico, utilización de los modelos hidrológicos CLIRUM3 y Visual Modflow para la evaluación de las aguas superficiales y subterráneas respectivamente. Dichos modelos fueron calibrados en distintas cuencas hidrográficas representativas de las regiones Pacífica, Central y Atlántica, simulando correctamente los distintos parámetros de las cuencas objeto de estudio.

Se estimó el Índice de Escasez¹⁶ como indicador de la vulnerabilidad de los recursos hídricos o de la presión de la demanda sobre la oferta hídrica, en base a los resultados de las simulaciones de los modelos tanto de agua superficial como subterránea, para distintos escenarios de cambio climático y horizontes de tiempo.

La diferencia entre el potencial natural y el porcentaje de deterioro de la calidad del agua se utilizó para obtener la oferta neta, que incluye la suma del potencial de agua superficial (escorrentía) y agua subterránea (recarga) multiplicado por el área de influencia.

5.2. Potencial y demanda de los recursos hídricos

Los principales sectores usuarios del recurso hídrico en Nicaragua son: doméstico, riego, hidroeléctrico, industrial, ganadería y demanda ecológica. De la relación entre potencial, demanda y disponibilidad actual de los recursos hídricos por sectores de usuarios, es posible identificar la vulnerabilidad de estos por categoría de usuarios, desde la perspectiva del estrés causado por la reducción de la disponibilidad real; a lo que debe sumársele el efecto de la reducción potencial debido al riesgo de contaminación, tomando en cuenta la relación entre la vulnerabilidad natural y la carga contaminante.

¹⁶ Método implementado por UNESCO para las condiciones de América Latina.

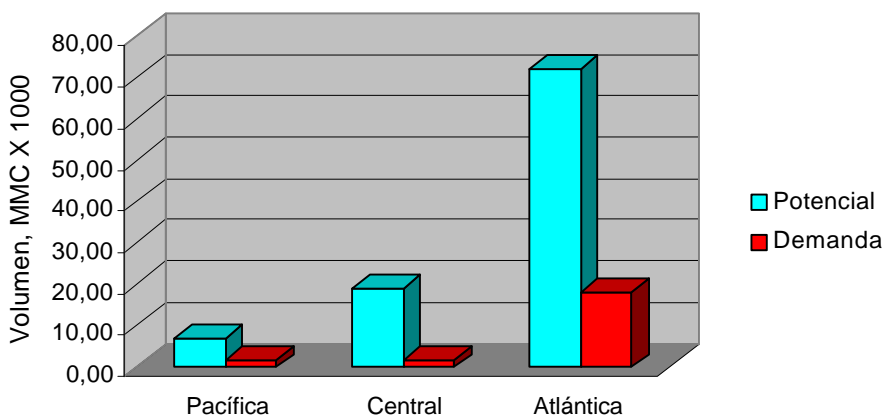
El potencial del país en cuanto a recursos hídricos se refiere, tanto de aguas subterráneas como de superficiales se presenta en Cuadro 5.1 donde además se desglosa por sectores de usuarios y una sumatoria de la demanda y la disponibilidad total; siendo la región del Atlántico la que posee mayor disponibilidad y mayor demanda del recurso debido exclusivamente a la demanda ecológica la cual no afecta la vulnerabilidad, por ser parte integrante del balance hidrológico natural y no representa un estrés en su disponibilidad. En la región del Pacífico la situación es distinta, el sector que consume más agua es el riego seguido del doméstico, a diferencia de la región central donde el sector energía consume cantidades considerables de este recurso.

Cuadro 5.1. Potencial y demanda de agua por sector usuario en millones de metros cúbicos por año (MMC/Año).

Regiones	Potencial, MMC		Demanda de sectores usuarios, MMC						Demanda total MMC	Disponibilidad MMC
	Agua Sup.	Agua Subt.	Riego	Doméstico	Ganadería	Industria	Energía	Ecología		
Pacífico	4,023.0	2,868	977.8	218.0	29.3	12.0	0.0	288.0	1,525.1	6,891.0
Central	18,798.0	172,3	522.0	72.0	45.0	0.0	481.0	535.0	1,655.0	18,970.3
Atlántico	72,194.0	30.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	17,681.0	17,686.0	72,224.0

En general la disponibilidad de agua en el país es suficiente para satisfacer la demanda actual, la figura 5.1 ilustra el alto potencial hídrico del país y la reducida demanda actual del recurso.

Figura 5.1. Disponibilidad del recurso agua por regiones.



5.3. Vulnerabilidad por efecto de la demanda actual

Bajo condiciones del clima actual los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, tienen un nivel variable de vulnerabilidad para las distintas regiones, el que depende del régimen pluviométrico, condiciones fisiográficas, efecto de la demanda e impacto de los diferentes usuarios tanto en la cantidad y como en la calidad. La vulnerabilidad actual desde el punto de vista de la disponibilidad, es mayor en la región Pacífica, menor en la región Central y muy baja en la región del Atlántico.

La vulnerabilidad actual en la región del Pacífico, no se origina por la disponibilidad en términos de cantidad del recurso, sino por el posible efecto de la calidad del agua por usos domésticos y de riego (actividad agrícola); aunque sus demandas son importantes y aún no superan la disponibilidad del recurso, son las principales fuentes de contaminación tanto por aguas residuales como por agroquímicos, lo que consecuentemente significa una reducción de agua disponible, principalmente para uso potable.

Entre las principales fuentes de contaminación están la industrial, agroquímica, deforestación erosión y residual doméstica. En Nicaragua los principales factores que influyen directamente en la vulnerabilidad de los recursos hídricos son: la cercanía de centros poblacionales con respecto a las fuentes naturales de agua, nivel de desarrollo industrial, la erosión de los suelos, el nivel de manejo de las fuentes de agua, desechos sólidos y la educación sanitaria; el nivel de manejo y aplicación de plaguicidas.

5.4. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos

La falta de información hidrométrica en algunas cuencas hidrográficas del territorio nacional, limitó la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico a las cuencas de Guanas, Río Viejo, Paiwas y El Tamarindo. Sin embargo para solventar esta limitación se seleccionaron cuencas representativas para cada una de las macroregiones: Pacífico, Central y Atlántica. Para la región del Pacífico se escogió la cuenca del río Tamarindo; para la región Central, las cuencas del río Viejo y Guanas en el río Coco; y para la región Atlántica, la estación de Paiwas en la cuenca del río Grande de Matagalpa.

En base a los resultados del estudio de los Escenarios Climáticos y Socioeconómico para el siglo XXI y a las proyecciones calculadas para las variables climáticas, la precipitación media anual tiende a reducirse e incrementarse la evapotranspiración en los diferentes escenarios y horizontes de tiempo. Estas reducciones serán más evidentes en la cuenca del río Tamarindo que representa a la región del Pacífico, y en la cuenca del río Viejo, representativa de las zonas secas de las regiones Norte y Central. Bajo un escenario pesimista y para el horizonte 2100, se observa que en ambas cuencas la reducción de la precipitación podría ser de -36.6% ; mientras que el incremento de la evapotranspiración variaría desde 12.15% en la cuenca del río Tamarindo a 25.0% en la cuenca del río Viejo.

Para la cuenca de Guanas, la variación anual probable sería de -39.3% con respecto a la precipitación del período base 1961-1990, probablemente durante el período seco (noviembre a abril) ocurrirían las variaciones más importantes con valores entre -45% y -77.8% .

Aguas superficiales

Con el modelo CLIRUM3 se simulieron las series de escurrimiento en milímetros por día (mm/día) para cada una de las cuatro cuencas seleccionadas, referidas a los distintos escenarios climáticos (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Resultados de la escorrentía media anual simulada por cuencas (mm).

AÑO	PESIMISTA	MODERADO	OPTIMISTA
GUANAS EN RÍO COCO			
2030	313	331	331
2050	259	293	299
2100	156	227	260
TAMARINDO EN RÍO TAMARINDO			
2030	488	506	507
2050	434	467	473
2100	309	397	433
MOJARRAS EN RÍO VIEJO			
2030	155	174	396
2050	128	145	338
2100	99	113	128
PAIWAS EN PAIWAS			
2030	584	606	607
2050	516	559	565
2100	372	474	515

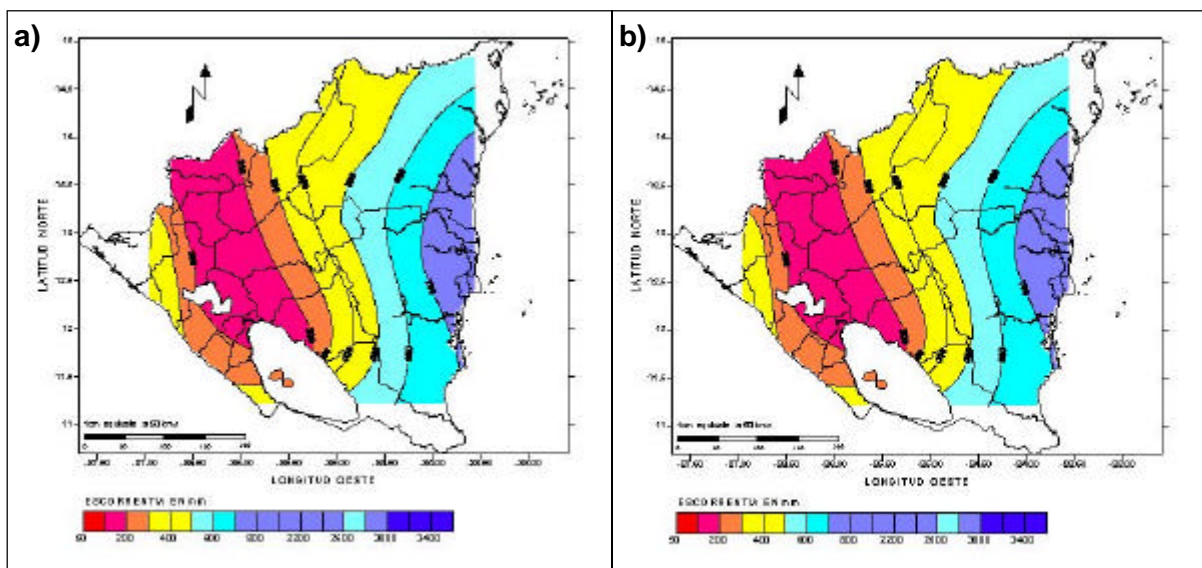
Estos resultados se utilizaron en el mapa de zonas de vida de Holdridge para el cálculo de las isopletras de escorrentía superficial disponible, mediante la extrapolación de valores a otras zonas con características similares, adoptando que el coeficiente de escorrentía encontrado en la calibración de cada punto de interés es válido para una zona de vida determinada.

De la relación entre el coeficiente de escorrentía por cuencas con los valores de precipitación a nivel nacional, se estimaron las isolíneas de escorrentía superficial disponible referidas al escenario moderado (Mapa 5.1 a y b).

El análisis de la distribución de la escorrentía superficial muestra que las cuencas de El Tamarindo, Río Viejo y Guanas son altamente vulnerables en los tres escenarios y para los horizontes de tiempo del 2050 y 2100. La cuenca de Paiwas es parcialmente vulnerable bajo los escenarios pesimista y moderado del año 2100, sobre todo en la parte alta de la cuenca.

La región del Atlántico no es vulnerable en ninguno de los tres escenarios, los impactos se deberán principalmente a las inundaciones. En la región del Pacífico por las características físico – químicas del suelo y por la deforestación observada en el último siglo, la vulnerabilidad de la misma estaría asociada a condiciones de poco escurrimiento. Considerando que la mayor concentración de la población y las áreas potenciales para riego se ubican en esta región, la vulnerabilidad estaría relacionada con la agricultura y el suministro de agua para consumo doméstico. En la región Central, además de la agricultura se verían afectadas las plantas hidroeléctricas.

Mapa 5.1. Escorrentía superficial media anual disponible bajo un escenario moderado: **a)** para el año 2030, **b)** para el año 2100.



Aguas subterráneas

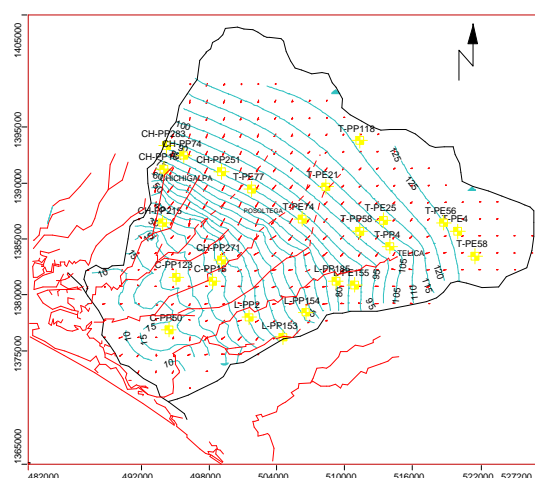
Con el modelo numérico Visual Modflow se simuló el campo de aguas subterráneas de la subcuenca Oriental Acuífero Chinandega – León. Los valores de recarga utilizados en el análisis de sensibilidad oscilaron entre 0.001 a 0.0026 metros/día para los planos horizontales y para el plano vertical de 0.05 a 2 metros/día.

En la Fig. 5.1, se muestra la reproducción de la superficie freática por el modelo, condicionada por los valores de los parámetros utilizados, partiendo de los datos del monitoreo de niveles estáticos georeferenciados en m.s.n.m para 1999.

Se realizó el balance hídrico del sistema de agua subterránea en $\text{m}^3/\text{día}$, obteniéndose que el sistema de agua subterránea se abastece principalmente por recarga directa procedente de la precipitación (95% del total), y en forma secundaria por percolación en el lecho de los ríos (5% del total); el acuífero se descarga mediante los ríos como flujo base (75% respecto al total), por extracción de los pozos (23.6%) y el resto descarga directamente al mar; así mismo el bombeo actual no produce aún, efecto de entrada de agua salina procedente del mar. El balance dio como resultado, que el potencial de agua subterránea es de 441 MMC/Año ($1.2 \text{ m}^3/\text{día} \times 10^6$) aproximadamente.

Se simuló el efecto de la reducción potencial de la recarga causado por el cambio climático para tres escenarios (pesimista, moderado y optimista) y cinco horizontes de tiempo (Cuadro 5.3). Se observa una tendencia bien marcada de reducción de la recarga para todos los escenarios a partir del año 2050.

Fig. 5.2. Superficie freática, vectores de velocidad y pozos de observación.



En el escenario pesimista y para el año 2050, el flujo base reflejado como salida del acuífero es cuatro veces menor con respecto al actual, y para el año 2100 representaría sólo el 10% del actual, lo que implicaría una imperceptible conexión hidráulica entre el agua subterránea y superficial.

Bajo un escenario moderado, la recarga en el año 2050 podría ser muy similar a la descarga determinada por el bombeo de los pozos, esta situación se agravaría para los horizontes 2070 y 2100, cuando la extracción por bombeo se tornaría superior a la recarga. También se observa una tendencia en la disminución de descarga del acuífero al mar, la cual se acentúa cuando los pozos se ubican mas cerca de la costa, incrementando el riesgo de contaminación por intrusión salina.

En el escenario optimista, se espera que la recarga varíe con respecto a la actual desde 81% en el año 2010 hasta 57% en el 2100. Las extracciones por bombeo respecto al actual, se incrementarán en 2.5 y 4 veces para los años 2050 y 2100 respectivamente. Para los horizontes 2070 y 2100, el bombeo sería superior a la recarga en 1.25 y 1.72 veces.

Cuadro 5.3. Recarga simulada con respecto a la recarga actual.

Horizontes de Tiempo	Recarga simulada en %		
	Optimista	Moderado	Pesimista
2010	81.16	81.16	79.95
2030	72.66	72.50	69.00
2050	66.00	64.60	48.00
2070	61.00	57.70	47.80
2100	57.00	50.50	35.50

5.5. Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante el cambio climático

La estimación de la vulnerabilidad de los recursos hídricos, se realizó a partir de la estimación del índice de escasez de dichos recursos, el cual se adaptó para las condiciones de Nicaragua; definiéndose como la relación de la demanda de agua, entre la oferta determinada por el potencial de las aguas superficiales y subterráneas.

A este potencial se le dedujo un volumen definido por el deterioro de la calidad del agua, estimándose que las regiones del Pacífico, Central y Atlántico están expuesta a un riesgo de contaminación alto, moderado y bajo respectivamente, lo que equivale a un 30, 20 y 10% de afectación volumétrica con respecto al potencial disponible.

La vulnerabilidad actual de los recursos hídricos, en base a la estimación del índice de escasez como indicador de la presión de la demanda sobre la oferta hídrica, presenta valores altos, medios y bajos, los cuales se corresponden con una vulnerabilidad mayor en la región del Pacífico, menor en la región Central y baja en la región del Atlántico, la que posee excedentes del recurso agua (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4. Estimación del Índice de Escasez como indicador de la vulnerabilidad actual.

Región	Potencial (P) MMC/Año	Demanda (D) MMC/Año	Afectación al Potencial (AP) en %	Oferta Neta (ON) Igual a Potencial -% afectación (AP) en MMC/Año	Índice de escasez (IE) $IE = (D/ON) \times 100$	Categoría de Vulnerabilidad según Índice de Escasez
Pacífico	6,891.00	1,237.10	30.00	4,823.70	25.60	Alta
Central	18,970.30	1,120.00	20.00	15,176.20	7.30	Moderada
Atlántico	72,224.00	5.00	10.00	65,000.00	0.76	Baja

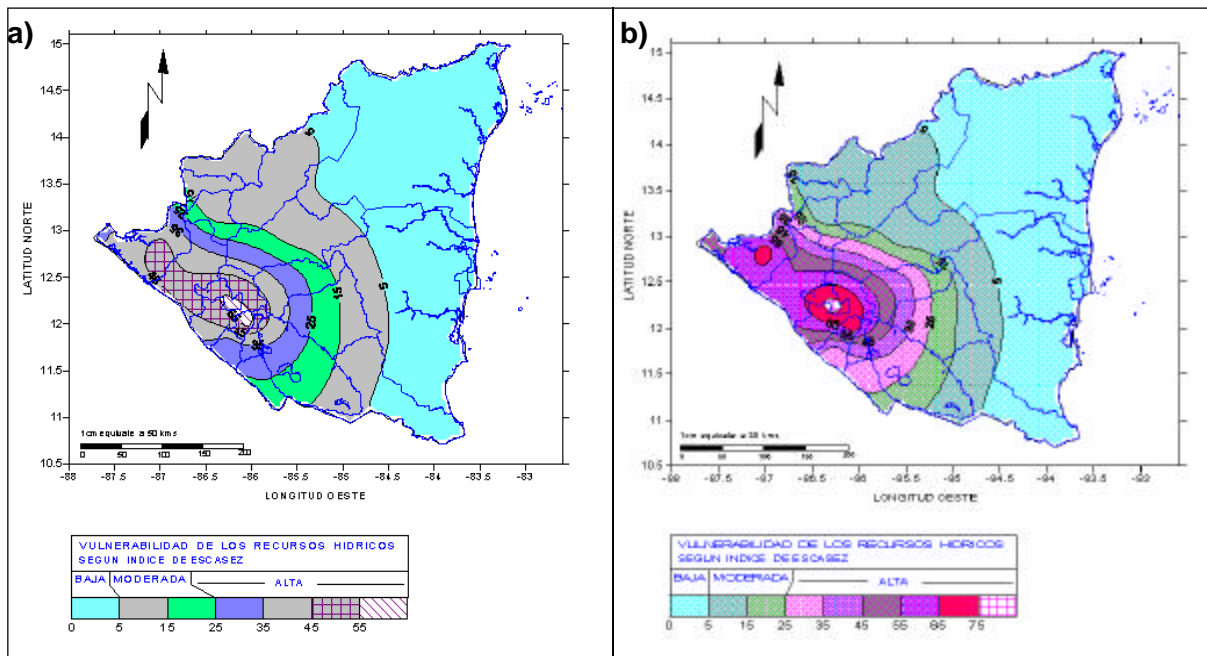
El volumen de la oferta asociada al área de influencia y la correspondiente demanda, fue referenciada a 16 puntos correspondientes al número de departamentos del país para asociarlo a la distribución geográfica de la demanda por los distintos usuarios, para obtener la relación del índice de escasez (oferta neta/demanda) y la correspondiente vulnerabilidad del cambio climático.

En los Mapas 5.2 y 5.3 se presenta la distribución espacial del índice de escasez correspondiente a los escenarios optimista y pesimista de los años 2030 y 2100 respectivamente; en los que las áreas comprendidas entre las isolíneas de mayor valor se corresponden con los sectores de mayor vulnerabilidad.

Importantes centros poblacionales de las regiones del Pacífico y Central presentan altos índices de escasez, consecuentemente tienen un nivel de vulnerabilidad alta. En la región del Pacífico, se puede asociar a las ciudades de Managua, Masaya, Granada, Rivas, Chinandega y León, así como los municipios de Posoltega, Chichigalpa y Quezalaguaque. También se incluyen áreas dedicadas al desarrollo del riego, como las de occidente y la planicie de Tipitapa – Malacatoya.

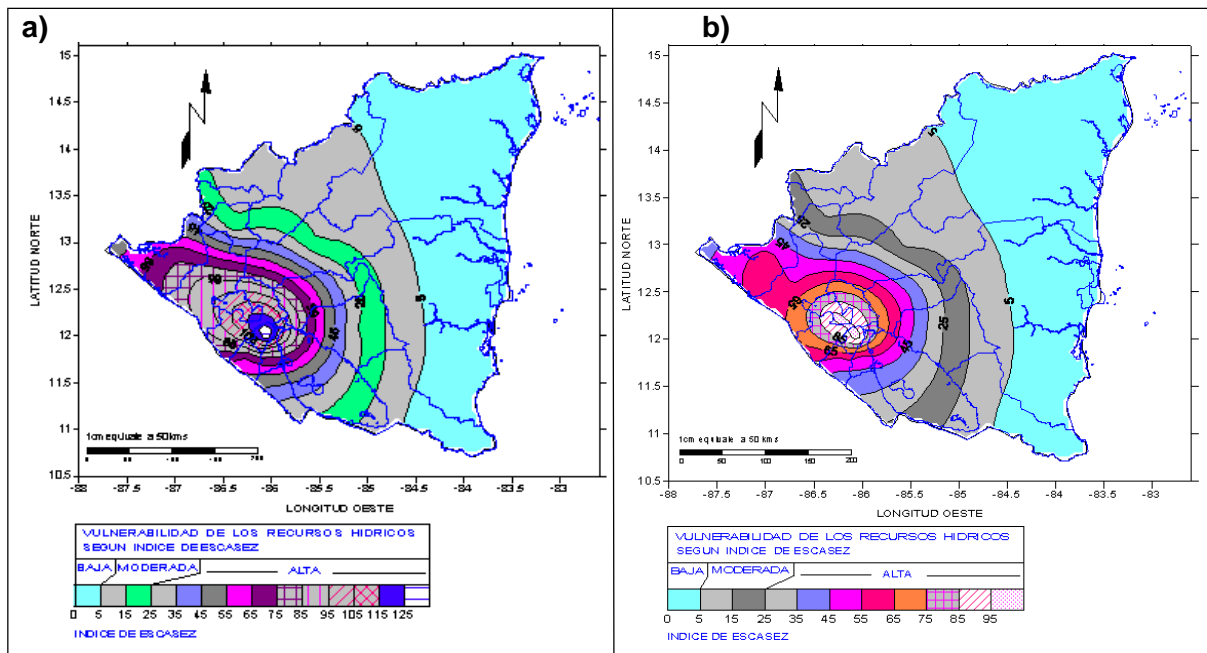
Mapa 5.2. Vulnerabilidad de los recursos hídricos según índice de escasez para el año 2030.

a) Escenario optimista, b) Escenario pesimista. *unificar colores de mapas*



Mapa 5.3. Vulnerabilidad de los recursos hídricos según índice de escasez para el año 2100.

a) Escenario optimista, b) Escenario pesimista.



En la región Central, la mayor vulnerabilidad corresponde a las ciudades de Boaco, Matagalpa, Jinotega, Estelí, Somoto y Ocotol; lo mismo que en zonas con un uso intensivo de agua para riego, con frecuente aplicación de agroquímicos y sobre todo donde existe conflicto entre los usuarios, como el Valle de Sébaco.

La región del Atlántico presenta una vulnerabilidad baja, por cuanto existe un volumen considerable de agua disponible y una demanda muy baja de uso consuntivo; sin embargo el impacto en la calidad del agua se asocia a ciudades como Puerto Cabezas, Bluefields, Laguna de Perlas, El Rama, así como ríos tributarios influenciados por la contaminación del sector minero.

Con el tiempo el efecto de la disponibilidad de los recursos hídricos y el incremento de la demanda, probablemente incrementará el índice de escasez de las regiones más vulnerables bajo los diferentes escenarios y en condiciones de un clima cambiado.

5.6. Medidas de adaptación de los recursos hídricos ante el cambio climático

Con base a la determinación de zonas con diferentes niveles de vulnerabilidad por efecto del futuro cambio climático, se identificaron las siguientes medidas de adaptación para ser implementadas en el marco de un plan integral de acción de los recursos hídricos:

† Implementar un plan de conservación y manejo de cuencas hidrográficas en las áreas más vulnerables ante el impacto del cambio climático, que incluya:

- Un programa de prevención y protección de las riveras de los ríos y zonas de mayor vulnerabilidad, con la perspectiva de reforestar de forma sostenible los bosques ribereños para prevenir que la erosión de los suelos azolven el cauce de los ríos y así mantener el curso natural histórico de las aguas. Un costo estimado según PROLEÑA, es de US\$150 y \$250 por hectárea, con y sin el uso de Eucalipto respectivamente.
- Promover y auspiciar la construcción de pequeñas represas sin revestimiento, orientadas al incremento de la recarga de acuíferos en zonas altas, a fin de utilizarlas en períodos de escasez del recurso agua.
- Priorizar el desarrollo de determinadas cuencas hidrográficas y definir la preservación de otras, con el propósito de implementar estrategias de zonificación de áreas orientadas a establecer el balance con respecto a los diferentes usuarios.
- Proteger y desarrollar cuencas hidrográficas con potencial hidroeléctrico.

† Establecer criterios ambientales e implementar con base en los mismos un plan de prevención y control de la calidad del agua. Considerando que la prevención tiene mucho menor costo que la descontaminación, si consideramos que un tratamiento de agua con aplicación común, como la cloración del agua tiene un costo inferior a los costos de tratamiento de enfermedades hídricas. El proceso de descontaminación del agua tiene costos muy superiores a los de abastecimiento de agua (C\$4.0 x M³ de agua abastecida), según JICA /INAA(1993).

- El plan de control de calidad del agua debe ser extensivo a la mitigación y/o reducción de la contaminación de aguas residuales domésticas, industriales y de zonas con manejo

de agroquímicos. Esto último amerita un plan de manejo de agroquímicos con enfoque participativo a nivel de todos los actores.

- Implementar un plan de control y prevención de enfermedades hídricas en períodos proyectados según la afectación del cambio climático.
- † Incluir dentro de los planes de ordenamiento territorial ambiental, con énfasis en el uso actual de la tierra, el componente de las evaluaciones del impacto del cambio climático.
- † Implementar proyectos de trasvases de agua hacia zonas con alta vulnerabilidad ante el cambio climático, según los índices de escasez de los recursos hídricos.
- † La regulación del uso del agua, su aprovechamiento sostenible, la prevención de desastres y de la contaminación en los respectivos niveles de participación de usuarios y planificadores, debe contar con una autoridad del agua.
- † Establecer un marco legal de agua, como herramienta de adaptación de los recursos hídricos ante el cambio climático, ya que actualmente las leyes nicaragüenses no incluyen disposiciones que se refieran al impacto del cambio climático y a la vulnerabilidad de este recurso, por lo que se hace necesario considerar la implementación de los siguientes aspectos:
 - Gestionar ante la Asamblea Nacional la discusión y aprobación del Ante Proyecto de Ley General de Aguas; así mismo en tanto no sea aprobada dicha ley, se hace necesario en algunos casos reformar las leyes actuales y reglamentar algunos aspectos de las mismas a fin de establecer el inicio de una administración integral y eficiente del agua, específicamente sería importante reglamentar del Título III, Capítulo II, De las Aguas, los artículos 72 al 94 inclusive; de la Ley General del Medio Ambiente.
 - En el contenido del Ante Proyecto de Ley General de Aguas, es necesario la definición de la Autoridad del Agua, la que por definición debe ser una institución autónoma, con suficiente independencia para no politizar sus decisiones y no sectorizarla.
 - El marco jurídico ya reformado debe abolir la legislación sectorial del recurso y establecer los instrumentos regulatorios de acuerdo a la realidad del sector (riesgos de contaminación, vulnerabilidad, y conflicto entre usuarios entre otros) y desde luego del país.
- † A corto plazo se deben mejorar los instrumentos legales existentes, a fin de incidir positivamente en la administración integral de los recursos hídricos:
 - Es necesario reformar las leyes que otorgan doble competencia sobre el recurso y establecer una instancia como encargada de administrar éste.
 - Reglamentar la Ley General sobre la Explotación de las Riquezas Naturales, a fin de agilizar el procedimiento de otorgación, cancelación y finalización de concesiones, licencias y permisos.

- Inicialmente para solucionar los conflictos existentes y los potenciales que se puedan presentar, se debería solicitar a MARENA que dichas zonas de conflicto sean declaradas “zonas de reserva”; una vez que está declaración entre en vigor, MARENA reglamentaría su uso y determinaría una distribución racional del recurso, sobre la base de los artículos 61 y 77 de la Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (LGMARENA). Una vez reglamentada la distribución, es facultad del MIFIC la administración del uso de dichas aguas, así como de garantizar el cumplimiento de las asignaciones a cada usuario, establecidas por MARENA.
 - Como la LGMARENA no establece los mecanismos necesarios para la solución de conflictos entre los diferentes usuarios del recurso, es preciso establecer estos mecanismos partiendo de la facultad otorgada a la Comisión Nacional de Recursos Hídricos y actualmente trasladada a AdAguas (Arto. 2, literal j del decreto N°249); de tal forma que en calidad de instancia de solución se podrían usar los servicios de los mediadores y arbitros recién nombrados por la Corte Suprema de Justicia.
- † Considerando el nivel de vulnerabilidad ante el cambio climático de las zonas identificadas a través del índice de escasez y su relación con los usuarios, es importante enfocar los esfuerzos hacia una reglamentación que implemente políticas objetivas y coherentes respecto al impacto del cambio climático; que considere criterios técnicos y legales con visión de conjunto en la estrategia de planificación, aprovechamiento y manejo de los recursos hídricos.
- † Mejorar la eficiencia de la gestión de los recursos hídricos, considerando la descentralización de la administración del recurso agua a nivel de cuenca, a fin de garantizar su uso equitativo.
- † Preparar normas técnicas que regulen la ubicación de pozos en las zonas costeras, no permitiendo que el radio de influencia de éstos se extienda por debajo de la cota de 30 m.s.n.m, y que el descenso máximo de los niveles de agua subterránea sea superior al nivel medio del mar, con el fin de evitar la contaminación por intrusión salina.
- † Crear e implementar programas de capacitación dirigidos a las instituciones relacionadas con el tema y a la población en general que enfrentará el reto que se nos avecina, así como para adecuar las estructuras organizativas de los organismo involucrados.