

**Análisis de los Indicadores de Agua Subterránea
Propuestos por las Evaluaciones Regionales del Agua - ERA,
para San Andrés isla, Colombia.**

Documento de análisis en el marco del proyecto “Evaluación, del estado, dinámica y tendencia del agua subterránea” - Contrato Interadministrativo No. 217 de 2017 entre Coralina y la Universidad Nacional de Colombia
Sede Caribe

Jairo Humberto Medina
Director

Universidad Nacional de Colombia
Sede Caribe
Jardín Botánico
San Andrés Isla
2018



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	5
1. OBJETIVO	7
2. MARCO LEGAL	7
3. MARCO GEOGRÁFICO.....	9
3.1. TERRITORIO INSULAR.....	9
3.2. CUENCA EL COVE	9
4. METODOLOGÍA	16
5. ANALISIS DE LOS INDICADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA	17
5.1. ÍNDICE DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (IEAS)	17
5.2. ÍNDICE DE RECARGA RESPECTO A LA EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA SUBTERRÁNEA (IREAS).....	24
5.3. ÍNDICE DE OFERTA RENOVABLE DE AGUA SUBTERRÁNEA CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES (IOASH)	25
5.4. ÍNDICE DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES (IASAP)	33
5.5. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA (IVICA)	36
5.5.1. DRASTIC	42
5.5.2. GALDIT	50
5.6. ÍNDICE DE PRESIÓN DEMOGRÁFICA SOBRE EL AGUA (IPD)	0
5.7. ÍNDICE INTEGRAL DE USO DE AGUA (IIUA)	15
5.8. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO HÍDRICO (IVH)	20
6. CONCLUSIONES	25
BIBLIOGRAFÍA.....	43





INDICE DE TABLAS

Tabla 1. - Marco legal de referencia.....	7
Tabla 2.- Escenarios para IEAS.....	19
Tabla 3. Valores de Recarga del Acuífero según bibliografía consultada.....	19
Tabla 4. Distribución de pozos por formación geológica en cada UPI.....	26
Tabla 5. Resultados de IOASH por UPI.....	27
Tabla 6. Categorías de IASAP.....	33
Tabla 7. Resultados IASAP General.....	34
Tabla 8. Resultados IASAP incluyendo extracción de UPI.....	35
Tabla 9. Resultados de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de San Andrés evaluados con otras metodologías.....	39
Tabla 10. Descripción de variables del método DRASTIC.....	42
Tabla 11. Valoración para cada variable de DRASTIC.....	43
Tabla 12. Factores de ponderación para DRASTIC.....	45
Tabla 13. Grados de vulnerabilidad DRASTIC.....	45
Tabla 14. Distribución de UPI de acuerdo a vulnerabilidad iv DRASTIC.....	47
Tabla 15. Pesos para cada variable del Índice de Vulnerabilidad GALDIT.....	52
Tabla 16. Valores de importancia por variable en Método GALDIT.....	53
Tabla 17. Rangos de vulnerabilidad en GALDIT.....	54
Tabla 18. Resultados Generales de Vulnerabilidad GALDIT.....	55
Tabla 19. Pesos específicos planteados en (Massa-Sanchez, Arteaga-Marín, Viñan-Merced, & Martínez-Fernández, 2017).....	7
Tabla 20. Redistribución de pesos específicos entre los indicadores que integran el IPD para el Caso de San Andrés Isla.....	9

20 años Sede Caribe



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geomorfología de San Andrés Isla	11
Figura 2. Formación geológica de San Andrés Isla	12
Figura 3. Resultados IEAS general	22
Figura 4. Resultados IEAS Vs. Extracción agua subterránea en UPI Rurales	23
Figura 5. Resultados IEAS Vs. Extracción agua subterránea en UPI Urbanas	23
Figura 6. Resultados IREAS General	24
Figura 7. Resultados IOASH general	29
Figura 8. IOASH para UPI Rurales y UPI Urbanas	29
Figura 9. IOASH para UPIs Urbanas	31
Figura 10. IOASH para UPIs Rurales	32
Figura 11. Mapa Vulnerabilidad iV DRASTIC en UPI Urbanas	48
Figura 12. Mapa de vulnerabilidad iV DRASTIC en UPI Rurales	49
Figura 13. Mapa Vulnerabilidad GALDIT en UPI Rurales	56
Figura 14. Mapa Vulnerabilidad GALDIT en UPI Urbanas	57
Figura 15. Zona de Vida de la isla de San Andrés Pirámide de Holdridge	1
Figura 16. Resultados generales del IPD en San Andrés Islas	10
Figura 17. Resultados IPD en UPI Urbanas	11
Figura 18. Resultados IPD en UPI Rurales	12
Figura 19. IPD para UPIs Urbanas	13
Figura 20. IPD para UPIs Rurales	14
Figura 21. Resultados IIUA para las UPI Rurales	18
Figura 22. Resultados IIUA en UPI Urbanas	19
Figura 23. Categorías IRH y sus características	22
Figura 24. Curva de caudales acumulados UPI Rurales	23
Figura 25. Curva de caudales acumulados UPI Urbanas	24





INTRODUCCIÓN

Las evaluaciones regionales del agua fueron reglamentadas en el Decreto 1640, artículo 8. En este artículo se precisa que “Las autoridades ambientales competentes elaborarán las Evaluaciones Regionales del Agua que comprenden el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos asociados al recurso hídrico en su jurisdicción para la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental, teniendo como base las subzonas hidrográficas” (IDEAM, 2013).

El IDEAM, a través de la Subdirección de Hidrología, en el marco de sus funciones y del Plan Estratégico de Investigación Ambiental (PENIA) en su línea de orientar y caracterizar la estructura y dinámica de la base natural del país en sus componentes abióticos, en este caso el agua y sus relaciones con la biota, considera necesario avanzar en la construcción conceptual y metodológica para la realización de Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) coherentes con los desarrollos y resultados del Estudio Nacional de Agua 2010, sus actualizaciones y los objetivos de la PNGIRH (IDEAM, 2013). Esto permitirá a las autoridades ambientales avanzar en el conocimiento, la disponibilidad y eficiencia en generación de información sobre el comportamiento y estado del agua en Colombia, presiones y escenarios futuros para el mejoramiento de su gestión (IDEAM, 2013). Así pues, es responsabilidad de las autoridades ambientales llevar a cabo las evaluaciones regionales sobre el recurso agua.

Con lo cual se logrará caracterizar, entre otras cosas, variables de oferta, demanda, calidad y las alteraciones del régimen natural, en el marco de un sistema de indicadores hídricos propuestos por el IDEAM entre 2011 y 2013 y que para el caso de aguas subterráneas incluye el Índice de extracción de agua subterránea (IEAS), Índice de recarga respecto a la extracción total de agua subterránea (IREAS), Índice de oferta renovable de agua subterránea con





respecto al número de habitantes (IOASH), Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP), Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas subterráneas, Índice de presión demográfica sobre el agua (IPD), Índice integral de uso de agua (IIUA) y Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH). En el 2013, IDEAM solo contempla 5 de los indicadores anteriormente mencionados.

Teniendo en cuenta que la principal fuente de abastecimiento para la isla es el agua subterránea y su condición de isla oceánica hace que este recurso, su protección y conservación, sea de especial atención para toda la comunidad, este documento aborda el análisis de dichos indicadores con base en la información existente desde la Autoridad Ambiental CORALINA cuyas redes de monitoreo del recurso hídrico ha venido recolectando información durante varios años, así como han sido estos insumo para diversos documentos, informes y análisis, así mismo aquella información recolectada en campo como parte de los productos del proyecto “Evaluación, del estado, dinámica y tendencia del agua subterránea” - Contrato Interadministrativo No. 217 de 2017 entre Coralina y la Universidad Nacional de Colombia Sede Caribe.



Este documento no solo le permitirá a la Autoridad Ambiental dar cumplimiento a sus funciones como parte de un requisito en el marco de la normatividad nacional ya expuesta, sino que, aún más importante, busca generar las bases para una mejor planificación, ordenamiento y administración del recurso hídrico de la isla de San Andrés.



1. OBJETIVO

Analizar los indicadores de agua subterránea propuestos por el IDEAM a través sistema nacional de indicadores para las evaluaciones regionales del recurso, aplicados en San Andrés Isla, Colombia.

2. MARCO LEGAL

La normativa que sustenta las acciones nacionales sobre el tema y que por lo tanto se constituyen en un referente para la presente investigación se reúnen en la Tabla 1.



Tabla 1. - Marco legal de referencia

Norma	Objeto
Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII <sic>, Título 2, Capítulo III del Decreto-Ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
Decreto 155 de 2004	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones, y sus modificaciones.
Resolución 866 de 2004	Por el cual se adopta el formulario de información relacionada con el cobro de las tasas por utilización de aguas y el estado de los recursos hídricos a que se refiere el Decreto 155 del 2004 y se Adoptan otras disposiciones.
Resolución 872 de 2006	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.



Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico PNGIRH, 2010	Establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años.
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título IV - Parte III-Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos Líquidos y se dictan otras disposiciones.
Decreto 4748 de 2010	"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010"
Decreto 1640 de 2012	Por el cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.



Fuente: las normas citadas.



3. MARCO GEOGRÁFICO

3.1. TERRITORIO INSULAR

La Isla de San Andrés se encuentra situada en el departamento de San Andrés y Providencia, en el Mar Caribe a 619.6 Km al noroeste de Cartagena, entre los 12°28'55" y 12°35'37" de latitud Norte, y entre 81°40'49" y 81°43'23" de longitud Oeste. El archipiélago de San Andrés tiene una superficie aproximada de 27 km², consta de un conjunto de islotes y cayos que se extienden por espacio de cerca de 500 Km², los cuales, se conocen como Johnny Cay, Rose Cay, Rocky Cay, Haynes Cay, Cotton Cay, Courtwon Cay, Haynes Cay, Albuquerque Cay, Grunt Cay, Grasey Cay, Roncador Bank, Serrana Bank, Serranilla Cay y Quitasueño Bank (CORALINA, 2014).



3.2. CUENCA EL COVE

La cuenca El Cove presenta características vitales de sostenibilidad para San Andrés Isla en sus 430,4 hectáreas de área total, por cuanto se sitúa como una zona núcleo de la Reserva de Biosfera Seaflower (Gobernación de San Andrés, 2003 citado en (CORALINA, 2014)), donde se ubican los cuerpos de agua superficiales con mayor significancia para el área, así como el sistema de Manglares de Bahía Hooker, Bahía Honda, Smith Channel, Coco Plum, Salt Creek, Little Gough, Jim Pond, Bowie Bay y manglares del Cove. En la isla, predomina un sistema de cuencas que va de norte a sur, dividiéndose a una altura aproximada de 85 m.s.n.m. en dos secciones montañosas las cuales conforman el Valle del Cove y donde se localiza la zona de mayor recarga del acuífero (Casallas & Jimenez, 2009 citado en (CORALINA, 2014)).

Geológicamente hablando San Andrés cuenta con dos formaciones como se describen a continuación (Ver Figura 1):





- Formación San Luis: Estas rocas pudieron haberse formado entre cinco y menos de un millón de años; conforma los terrenos topográficamente más bajos, colinda con la actual línea de costa, y está constituida por calizas coralinas arrecifales muy ricas en fósiles. Con un área superficial de 9.89 km² y alturas entre los 0 y 44 msnm, las aguas presentes en el acuífero de esta formación son predominantemente salobres (CORALINA & Universidad Nacional de Colombia, 2010).
- Formación San Andrés: Corresponde a las rocas más antiguas de la isla, con aproximadamente veinte millones de años de antigüedad; se ubica en la parte central del territorio insular conforma el sistema de colinas de la isla, representa tanto un 57% del área total emergida. Y es aquí donde se contiene la principal reserva de agua dulce, en la denominada Cuenca El Cove. Comprende un área superficial de 17.13 km² y una altura entre los 4 y 84 msnm (CORALINA & Universidad Nacional de Colombia, 2010) (Ver Figura 1 y Figura 2)



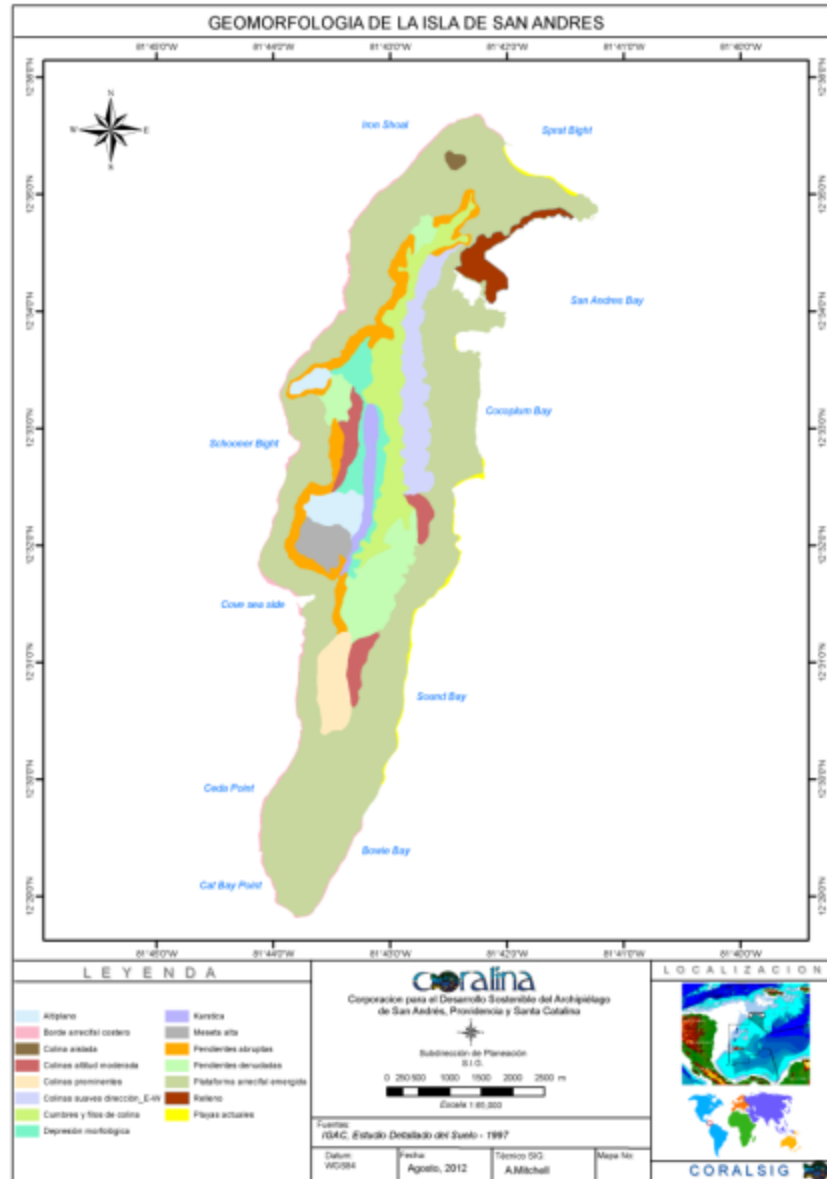


Figura 1. Geomorfología de San Andrés Isla

Fuente: CORALINA, 2012, con base en IGAC, 1997.

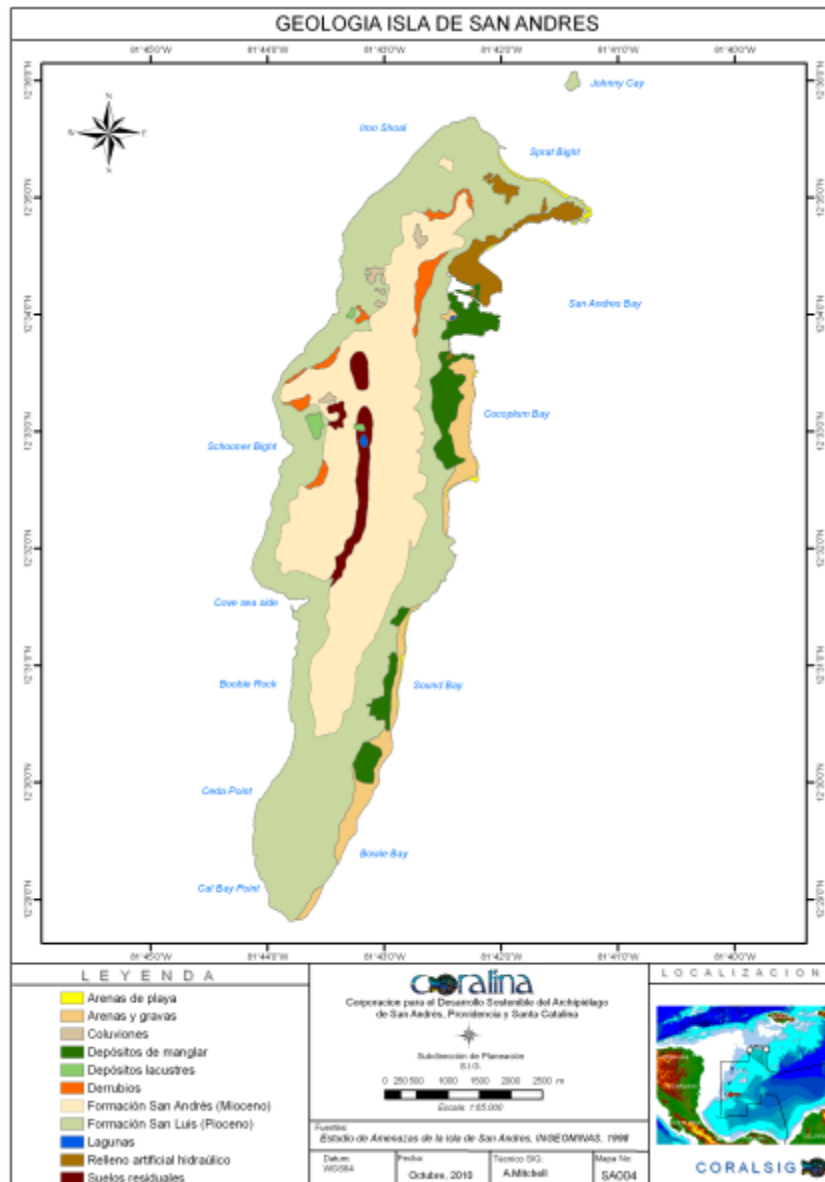


Figura 2. Formación geológica de San Andrés Isla

Fuente: CORALINA basado en INGEOMINAS, 1998.

Las rocas de la Formación San Andrés, a la cual pertenecen las calizas presentes en la Cuenca El Cove, se caracterizan por presentar fracturas moderadas a intensas y porosidad secundaria alta por disolución de carbonatos (como cavernas), permitiendo a los contaminantes moverse con altas velocidades hacia



los niveles freáticos. Lo anterior disminuye la posibilidad de que las rocas actúen como filtros naturales.

La forma alargada de la isla de San Andrés, guarda estrecha relación con la configuración de la Cuenca y la formación del lente de agua dulce allí existente. En islas de forma alargada, los sectores más anchos tienen posibilidad de desarrollar lentes de agua dulce con alta capacidad de explotación; por eso en la Cuenca El Cove se encuentran las mayores reservas de agua dulce y de allí que los pozos del acueducto se hayan perforado en ese lugar, pues es la zona más ancha de la isla (CORALINA, 2005).

De acuerdo con sus características de bienes y servicios ambientales se presentan una serie de usos permisivos con fines económicos como es el caso de agricultura a pequeña escala, turismo ecológico, pesca artesanal, explotación del acuífero con las respectivas autorizaciones y licenciamientos, y por parte ambiental, investigación, monitoreo, prevención y mitigación de actividades antrópicas, educación ambiental (Gobernación de San Andrés, 2003 citado en (CORALINA, 2014).



El 20% del área de la cuenca El Cove está dedicada a la agricultura, mientras que el 15% corresponde a bosque protector; y un 30% es dedicado a pastizales para ganado. Los asentamientos humanos presentes, 670 casas identificadas, generan impactos a los recursos naturales principalmente al suelo y al agua subterránea (Gobernación del Departamento del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2012 citado en (CORALINA, 2014))

3.3. HIDROGRAFÍA Y CLIMA

La isla de San Andrés está localizada en el extremo norte de la llamada Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT). Esta zona se forma al encontrarse los vientos alisios que vienen del nordeste con los procedentes del sudeste. El movimiento





estacional de la ZCIT sobre Centroamérica y Sudamérica controla el régimen de lluvias de gran parte de estos dos subcontinentes y del Mar Caribe. Por ejemplo, mientras en el interior de Colombia la oscilación de la ZCIT produce dos épocas de abundantes lluvias y dos poco lluviosas, en la Isla produce una sola época de sequía y una de lluvias, por hallarse en uno de los extremos de la franja de oscilación. Lo anterior implica que sólo entre los meses de junio a diciembre puede haber recarga de los acuíferos en la Isla, pues históricamente los meses de enero a mayo han presentado déficit en el balance hídrico (CORALINA, PMAS, 2000).

La Isla de San Andrés hace parte de la zona de vida del bosque seco tropical. Con una temperatura media anual de 27.4°C; los meses de mayo – julio. La temperatura mínima media anual es de 22.6°C y la temperatura máxima media alcanza los 30.9°C. La temporada lluviosa se da entre los meses de mayo y diciembre. En los meses restantes la precipitación disminuye de manera notoria (época seca), aun cuando enero bien se puede considerar como un mes de transición entre los períodos seco y lluvioso.



Los meses de mayores precipitaciones son octubre y noviembre con cerca de 300 mm/mes y el de menor pluviosidad es marzo con apenas 22 mm. En el semestre comprendido entre los meses de junio y noviembre se registra un 75% de la lluvia anual total.

En el marco del trabajo de modelación (estudio del modelo numérico y comportamiento del acuífero de San Andrés ante escenarios de cambio climático) realizado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, a través de un contrato de consultoría para CORALINA; se analizaron los datos de las estaciones de lluvia instaladas en la isla por el IDEAM, cuyos resultados coinciden con la literatura citada. Se definen un ciclo unimodal de lluvia (un periodo seca y un periodo lluvioso). El mes más lluvioso con un promedio de 338 mm y el más seco con un promedio 22 mm.



Los registros multianuales reportan un brillo solar medio anual de 2.649 horas, con un mínimo de 1844.3 horas y un máximo de 3226.3 horas. Las horas promedio mensuales de brillo solar varían entre 281 en marzo (valor máximo) y 184 en octubre (valor mínimo), para una amplitud estadística anual de 97 horas. Esta amplitud significa que en los meses secos suelen registrarse alrededor de 3 horas efectivas de brillo solar/día más que en los meses lluviosos o de menor nubosidad. La humedad relativa es similar a lo largo del año, con un valor promedio anual del 82% y una oscilación intra-anual que fluctúa entre una humedad relativa media mínima del 78% en marzo y en media máxima del 84% en junio y en octubre (POT, 2003).



La fuente de abastecimiento principal de agua dulce en la isla de San Andrés, es el agua subterránea almacenada en acuíferos, la dependencia de esta fuente por parte de la población es cercana al 80%. El acuífero de la isla constituido en las dos formaciones geológicas ya mencionadas, Formación San Andrés y Formación San Luis, se encuentran interconectado hidráulicamente desde la San Andrés a la San Luis (y no en sentido contrario) (CORALINA & Universidad Nacional de Colombia, 2010).



4. METODOLOGÍA

Este trabajo se basa en el tipo de investigación descriptiva, con el cual se pretende medir y reportar información sobre el recurso hídrico subterráneo, a través de la aplicación de los indicadores de agua subterránea en la isla de San Andrés, propuestos por las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA), Índice de extracción de agua subterránea (IEAS), Índice de recarga respecto a la extracción total de agua subterránea (IREAS), Índice de oferta renovable de agua subterránea con respecto al número de habitantes (IOASH), Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP), Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas subterráneas, Índice de presión demográfica sobre el agua (IPD), Índice integral de uso de agua (IIUA) y Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH).



Así mismo, se tienen en cuenta los estudios realizados por INGEOMINAS, CORALINA y otras instituciones, que aportan información sobre las otras variables necesarias para el cálculo de los Indicadores de Aguas Subterráneas. Para lo cual, en el desarrollo de cada indicador se describen las fuentes de información de los datos y variables necesarias para el cálculo del mismo.

Una vez obtenidos los resultados de los indicadores, se podrán realizar inferencias y conclusiones sobre dichos resultados.

Para cada Indicador de Agua Subterránea planteado en la ERA, se desarrolló una hoja de cálculo en Microsoft Office Excel con la cual se permita el cálculo del indicador de manera más automática y la fácil interpretación de los resultados. Lo anterior, siguiendo las directrices planteadas en el Documento *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional de agua (ERA)*, del IDEAM (2013) y el Estudio Nacional del Agua del (IDEAM, 2015). Para la





interpretación de los datos también se usó como referencia el documento Groundwater Resources Sustainability Indicators de la (UNESCO, 2007), así como estudios de caso a nivel nacional e internacional.

5. ANALISIS DE LOS INDICADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA

A continuación se presenta el análisis mediante índices establecidos en la ERA para San Andrés Isla, con base en las UPI como unidades de análisis, siendo 19 a nivel urbano y 12 a nivel rural.

El trabajo se basó en la información suministrada por las distintas entidades, instituciones y sectores consultados, entre ellos CORALINA, IDEAM, DANE, trabajos académicos e información recolectada en campo. Con respecto a esta última, la información se recolectó para una muestra de cada UPI y con dichos datos se realizaron ponderaciones que permitieran el análisis de los indicadores para cada UPI.



5.1. ÍNDICE DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (IEAS)

Este indicador permite reconocer a nivel anual la intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas (recarga) (UNESCO et al., 2007 citado en IDEAM, 2013). Y se identifica con la sigla *IEAS*.

Teniendo en cuenta lo anterior, se entiende por recarga de agua subterránea como “la adición de agua al reservorio de agua subterránea” La recarga natural e inducida por flujo a través de la zona no saturada ha sido aplicada para la construcción del indicador de extracción de aguas subterráneas. Las principales fuentes de recarga son la precipitación, los cuerpos superficiales de agua superficial, pérdidas de irrigación y filtraciones de sistemas de distribución de abastecimiento de agua urbana y aguas residuales (IDEAM, 2013).

Este indicador se calcula con base en la siguiente fórmula:

$$IEAS = \frac{E}{O_{rg}}$$

Dónde:

E = Extracción total de aguas subterráneas

O_{rg} = Oferta renovable de aguas subterráneas (recarga)

Para efectos del indicador la *Extracción total de Agua Subterránea* se considera el aprovechamiento total del agua a través de pozos, aljibes, manantiales y otras formas de captación, para abastecimiento público o uso agrícola, industrial u otros. Así mismo, abarca las aguas subterráneas descargadas naturalmente que puedan ser estimadas. Para calcular la extracción total de agua subterránea, año 2017 y 2018, se tomó como base la información suministrada por el FUNIAS (Formulario Único Nacional para Inventario de Puntos de Agua Subterránea) mediante el cual se registraron datos como volumen del sistema de almacenamiento, tiempo de llenado, caudal estimado y régimen de bombeo (frecuencia) para cada uno de los pozos de agua subterránea de la muestra seleccionada en cada UPI.



Respecto a la *Recarga u Oferta Renovable* será en el sentido amplio “*la adición de agua al reservorio de agua subterránea*”. Las principales fuentes de recarga son la precipitación, los cuerpos superficiales de agua superficial, perdidas de irrigación y filtraciones de sistemas de distribución de abastecimiento de agua urbana y aguas residuales. Numerosos métodos de estimación de recarga y cálculo de aguas subterráneas han sido desarrollados para diferentes condiciones hidrológicas, hidrogeológicas y climáticas (UNESCO et al., 2007 citado en IDEAM, 2013).

La escases de datos y accesibilidad afecta el cálculo de este indicador a una escala mundial. Sin embargo, solo tres escenarios se proponen para interpretar



los resultados del indicador (Ver **Tabla 2**) para dar un significado a los valores estimados, más que referirse a los números actuales, que pueden involucrar incertidumbre (UNESCO, 2007):

Tabla 2.- Escenarios para IEAS

Escenario	Condición	Valor del indicador calculado
Escenario 1	Extracción total \leq Recarga	< 90%
Escenario 2	Extracción total = Recarga	=100%
Escenario 3	Extracción total > Recarga	100%



Fuente: (UNESCO, 2007).

La recarga fue consultada en la bibliografía existente en CORALINA y para el caso de este trabajo se toma como referencia tres estudios de recarga realizados en la isla, cuyos valores se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de Recarga del Acuífero según bibliografía consultada

Autor	Título documento	Año	Recarga (mm/año)
INGEOMINAS	Caracterización y Modelación del régimen de las aguas subterráneas.	1998	Formación San Andrés: 520 mm/año*
	Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés.		Formación San Luis: 132.2 – 137 mm/año**





CORALINA Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín	Estudio de Modelación del Acuífero de San Andrés	2010	255 Para un año en fase cálida (Niño) 498 Para un año normal 810 Para un año en fase fría (Niña)***
FINDETER	Plan Director del Recurso Hídrico de San Andres- PDRH	2017	Valle El Cove: 437 mm/año Zona Urbana: 134 mm/año



Fuente: CORALINA

*Calculada en un año seco

**calculada con base en las áreas no urbanizadas de la zona norte de la formación San Luis
(INGEOMINAS, 1997)

*** aplicó el Método Vélez et al (2005) basado en Brandury et al (2000)

Con base en estos datos, el cálculo de los indicadores de agua subterránea del ERA, se realizarán con el dato de recarga reportado por INGEOMINAS, ya que es el único que se puede correlacionar con las UPI, pues es posible establecer de cada pozo de las UPI a que formación geológica pertenece, por superposición de capas en ArcGIS.

El IEAS un indicador de estado y permite conocer la intensidad de uso que se hace de la recarga de agua subterránea, respecto a la extracción de la misma. Tal





y como lo ha planteado la UNESCO (2007), se pueden presentar tres escenarios, (Ver Tabla 2) a la hora de interpretar los resultados del IEAS.

Los resultados tras aplicado el IEAS, arrojan que en todas las UPI, tanto rurales como urbanas, estuvieron por debajo del 90%, que corresponde al escenario 1 descrito por la UNESCO para este Indicador, planteando que la extracción del recurso hídrico que se da en la isla, es menor o igual a la recarga que se percibe por acción de la infiltración de la lluvia.

Diferencias entre los resultados de las UPI rurales y las UPI urbanas se pueden observar al ver que en las primeras el IEAS fue superior al 1% en la mayoría de las UPI's (60%) mientras que en las UPI Urbanas solo el 21% superó el 1% (ver Figura 3). Se destacan las UPI R9, UPI R4, UPI R3, UPI U3 y UPI U4, que están relacionadas con barrios como Morris Landing, Lox Bight, Massany Hill, Hill Well, Ginnie Bay, San Luis para las rurales y barrios como Barrio de los Profesores, Modelo II Etapa, Guinea Hen, Tablitas, San Francisco de Asis, Cabañas Altamar, Natania, Serranilla, La Union y School House en las UPI Urbanas.



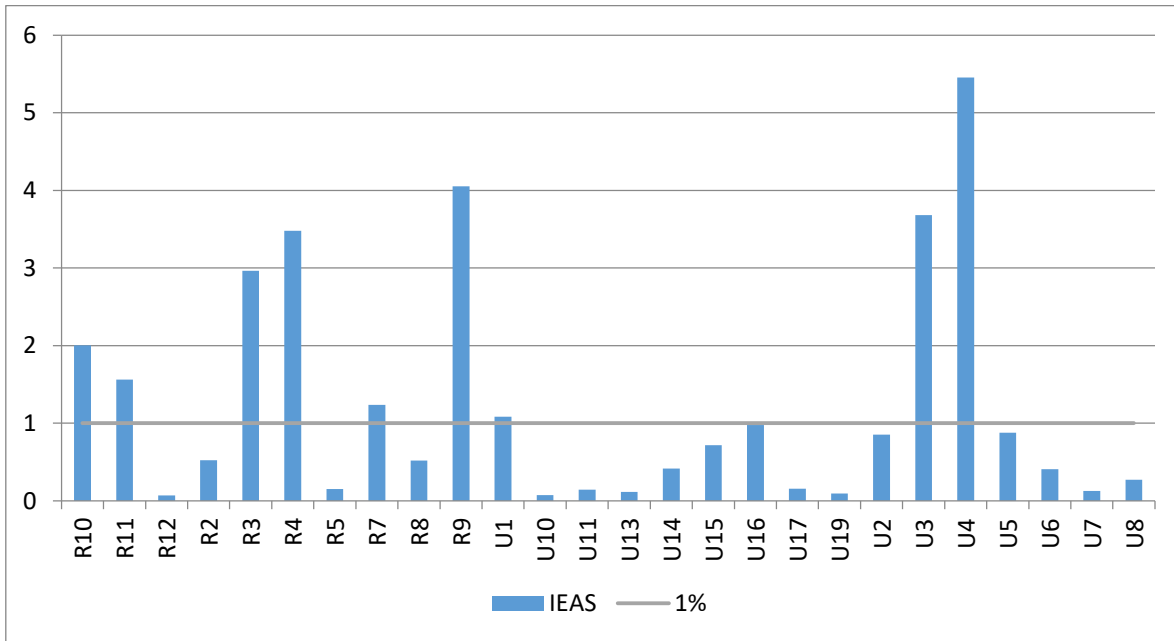


Figura 3. Resultados IEAS general

Si bien se trata del mismo escenario, este índice es directamente proporcional a la extracción de aguas subterránea, por lo tanto, encontrar valores de IEAS en UPI Rurales superiores a los encontrados en las UPI Urbanas, permite también indicar una mayor presión sobre los pozos de estas zonas rurales con respecto a las urbanas (ver Figura 4 y Figura 5).

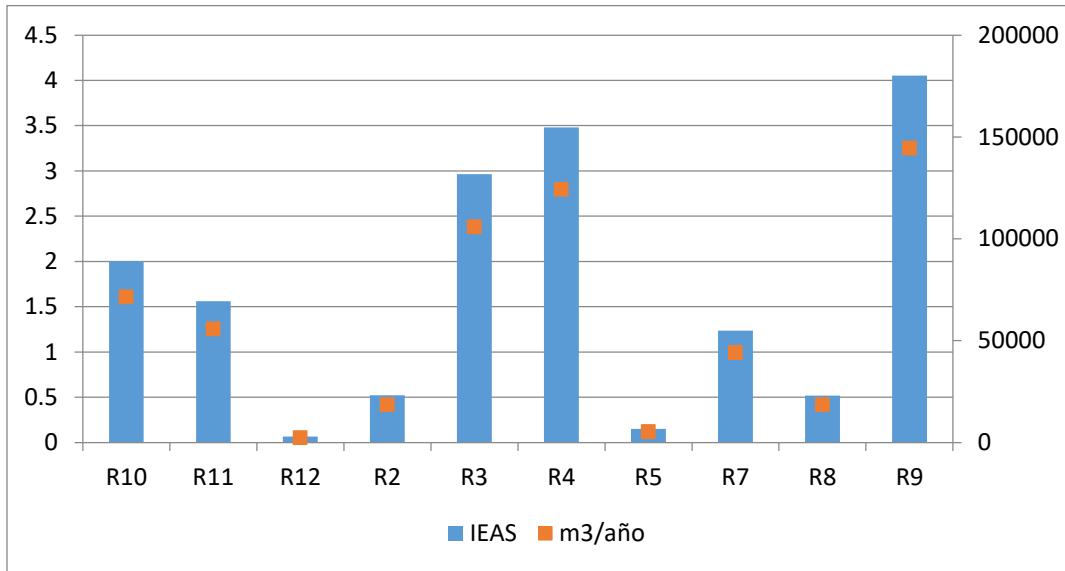


Figura 4. Resultados IEAS Vs. Extracción agua subterránea en UPI Rurales

En este sentido, aquellas UPI's donde el IEAS fue mayor corresponden a las UPI's donde la extracción fue también la más grande.

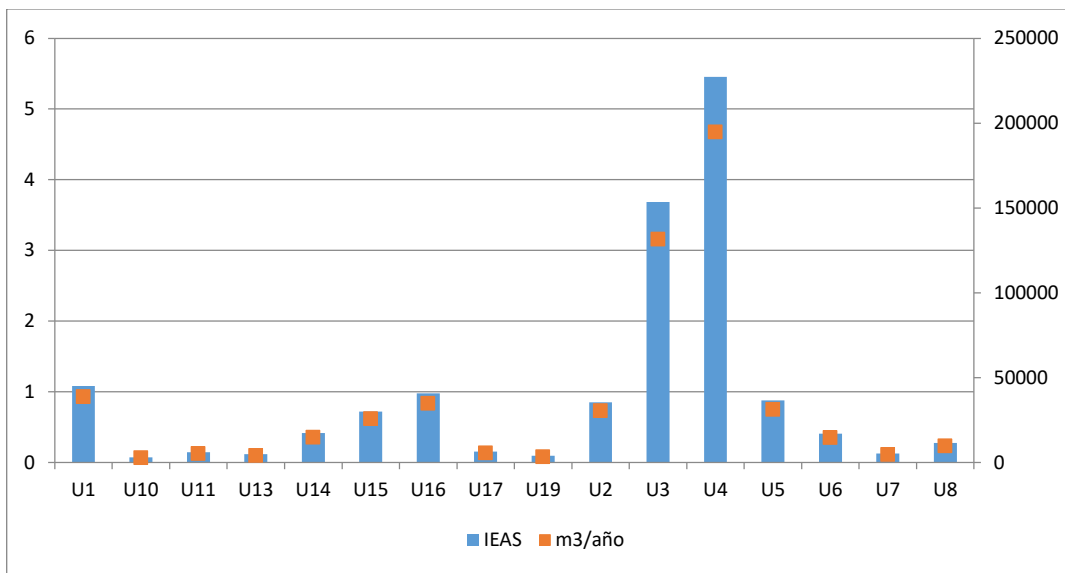


Figura 5. Resultados IEAS Vs. Extracción agua subterránea en UPI Urbanas

Aunque el índice nos muestra que la extracción del recurso hídrico se da sobre la base de la recarga que tiene la isla, es necesario comparar estos resultados con otros indicadores que permitan entender la relación que existe entre la extracción y por ejemplo la vulnerabilidad de las mismas zonas.

5.2. ÍNDICE DE RECARGA RESPECTO A LA EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA SUBTERRÁNEA (IREAS)

Este indicador permite reconocer a nivel anual la intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas (recarga) (UNESCO et al., 2007).



$$IREAS = \frac{Recarga}{Extracción\ total}$$

Con respecto a este indicador el IDEAM no describe los elementos de análisis e interpretación del mismo, salvo que se trata del inverso del anterior índice IEAS.

Los resultados así lo muestran, dado que las UPI urbanas registraron un IREAS mayor comparado con el de las UPI Rurales.

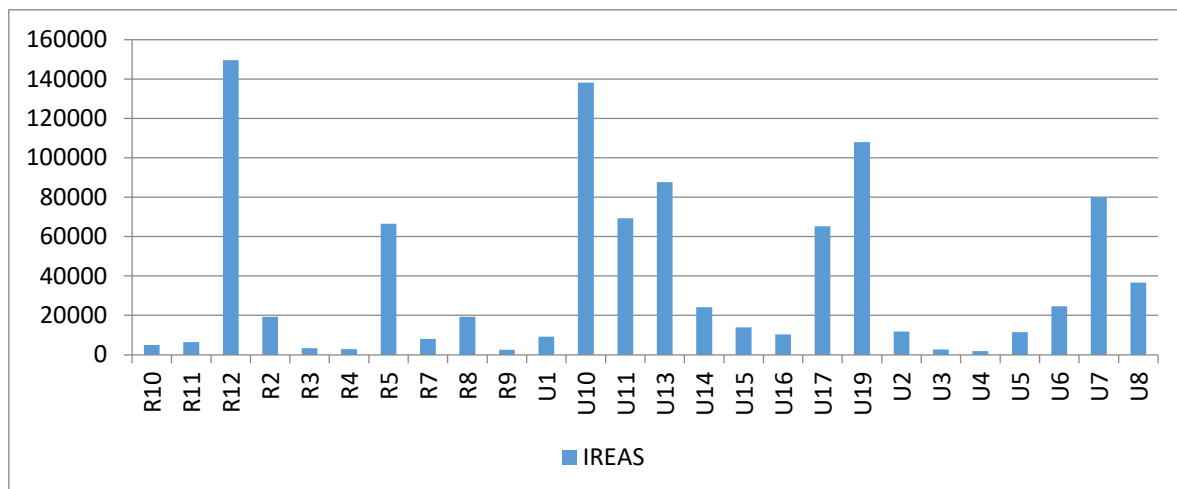


Figura 6. Resultados IREAS General





Esto tiene que ver, como se mencionó en el índice anterior, con que la extracción en las UPI Rurales fueron mayores comparadas con las registradas en las UPI Urbanas (ver Figura 4 y Figura 5).

5.3. ÍNDICE DE OFERTA RENOVABLE DE AGUA SUBTERRÁNEA CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES (IOASH)

Este índice brinda información sobre la disponibilidad de la oferta renovable de agua subterránea per cápita en una unidad de análisis (UNESCO et al., 2007).



$$IOASH = \frac{Recarga}{Núm. Habitantes}$$

Las variables demográficas que tienen implicaciones para los ecosistemas incluyen el tamaño de la población y la tasa de cambio en el tiempo (natalidad y mortalidad), la edad y el sexo, estructura de la población, la distribución de hogares según el tamaño y la composición, la distribución espacial (urbana o rural y por país y ecosistemas), los patrones de migración, y el nivel de logro educativo (IDEAM, 2011). En este sentido, para el cálculo de este indicador se tomó en cuenta la cantidad de personas o habitantes por UPI de acuerdo con el DANE (2013).

La variable de recarga es la que se ha reportado en el indicador IEAS, por lo que se tomará el valor bajo el mismo criterio.

En cada unidad de análisis el valor de la recarga varía por pozo, dado que unos pueden estar en la Formación San Luis o en la Formación San Andrés, aunque pertenezca a una misma UPI. Sin embargo, en todas las UPI, entre 50% y el 100% de los pozos se ubicaron en la Formación San Luis. En ese sentido, es posible



calcular el IOASH dos veces para una misma UPI, aunque para efectos del análisis de este documento se tendrá en cuenta el IOASH calculado con el valor de recarga de la formación donde se ubicaron la mayor parte de los puntos. Cabe mencionar en tanto para las UPI rurales como las UPI urbanas, la mayoría de los puntos estuvo ubicado en la formación San Luis (ver Tabla 4).

Tabla 4. Distribución de pozos por formación geológica en cada UPI

UPI	No. De Habitantes	Total pozos/UPI	% pozos FSL*	% pozos FSA*
UPI-R2	216	15	100	0
UPI-R3	3173	109	90,83	11,01
UPI-R4	3271	217	98,62	3,04
UPI-R5	4221	10	100	0
UPI-R6	283	4	50	4
UPI-R7	2375	50	96	2,08
UPI-R8	1503	60	98,33	1,02
UPI-R9	2398	137	99,27	1,01
UPI-R10	788	101	100,00	0
UPI-R11	831	58	100	0
UPI-R12	1125	9	77,78	2,57
UPI-U1	1375	103	100	0
UPI-U2	643	47	100	0,00
UPI-U3	1667	176	100	0,00
UPI-U4	7324	433	97,00	13,40
UPI-U5	1638	76	100	0
UPI-U6	393	47	100	0,00
UPI-U7	310	6	100	0,00
UPI-U8	2268	76	100	0
UPI-U9	282	4	100	0
UPI-U10	282	21	100	0
UPI-U11	228	5	100	0
UPI-U12	173	5	100	0,00
UPI-U13	1133	56	100	0,00
UPI-U14	1026	62	100	0,00
UPI-U15	2045	104	100	0,00
UPI-U16	934	67	100	0,00
UPI-U17	319	20	100	0,00
UPI-U18	123	8	100	0,00





UPI-U19	75	7	100	0,00
---------	----	---	-----	------

*FSL: Formación San Luis, FSA: Formación San Andrés

Fuente: Elaboración Propia

Lo que permite inferir, para efectos del cálculo de este indicador que entre el 50% y el 100% de los puntos analizados la recarga corresponde a 132,2 mm/año (ver Tabla 3. Valores de Recarga del Acuífero según bibliografía consultada Tabla 3).

Con base en lo anterior, el IOASH se calculó y arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultados de IOASH por UPI

UPI	IOASH en FSL	IOASH en FSA
UPI-R2	16525,00	NA
UPI-R3	1124,93	4356,76
UPI-R4	1091,23	4226,23
UPI-R5	845,63	NA
UPI-R6	12612,72	48848,06
UPI-R7	1502,91	5820,63
UPI-R8	2374,85	9197,60
UPI-R9	1488,49	5764,80
UPI-R10	4529,70	NA
UPI-R11	4295,31	NA
UPI-R12	3172,80	12288
UPI-U1	2595,93	NA
UPI-U2	5551,17	NA
UPI-U3	2141,21	NA
UPI-U4	487,36	1887,49
UPI-U5	2179,12	NA
UPI-U6	9082,44	NA
UPI-U7	11514,19	NA
UPI-U8	1573,81	NA
UPI-U9	12753,19	NA
UPI-U10	12657,45	NA
UPI-U11	15655,26	NA
UPI-U12	20632,37	NA
UPI-U13	3150,40	NA
UPI-U14	3478,95	NA





UPI-U15	1745,43	NA
UPI-U16	3821,63	NA
UPI-U17	11189,34	NA
UPI-U18	29019,51	NA
UPI-U19	47592,00	NA

El objetivo de este índice es estimar la cantidad anual de agua segura (m³ por año) para la bebida, la agricultura (principalmente irrigación), agua para la industria, y para los ecosistemas que existen en el área de estudio, lo anterior sin tener en cuenta la calidad del agua (UNESCO, 2007). De acuerdo con la UNESCO (2007), a valores altos de este indicador mejor es la posibilidad de usar la oferta renovable (recarga) de agua subterránea para fines de desarrollo. No existen estándares específicos desde los cuales recomendar un “buen” valor para este indicador.



Los valores más altos encontrados para el IOASH se registraron en las UPI Urbanas, comparadas con las UPI Rurales. Lo que permite inferir que la posibilidad de usar el agua producto de la recarga de las zonas relacionadas con las UPI urbanas es mayor con respecto a lo disponible en las zonas rurales. Es necesario tener en cuenta que esta posibilidad no considera la calidad del agua, solo se basa en la oferta renovable per cápita.

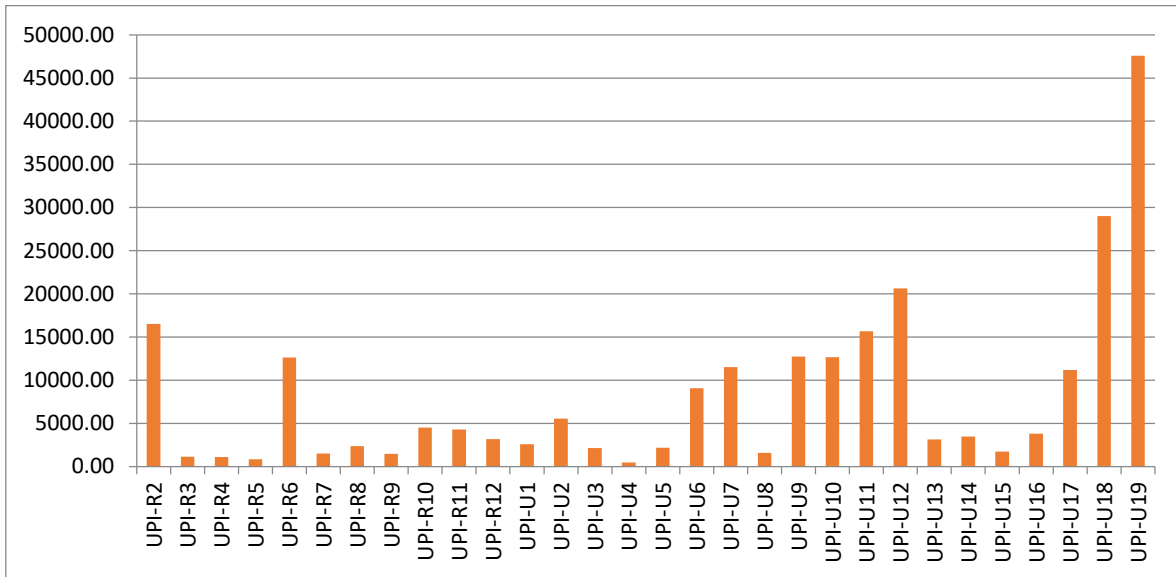


Figura 7. Resultados IOASH general

Mientras el IOASH de las UPI Rurales arrojó valores entre 845,63 y 16525 (m³/año per cápita), los resultados de las UPI Urbanas varían entre 487,36 y 47592 (m³/año per cápita). Donde el máximo valor en el grupo de las UPI urbanas triplicó el calculado para las Rurales.

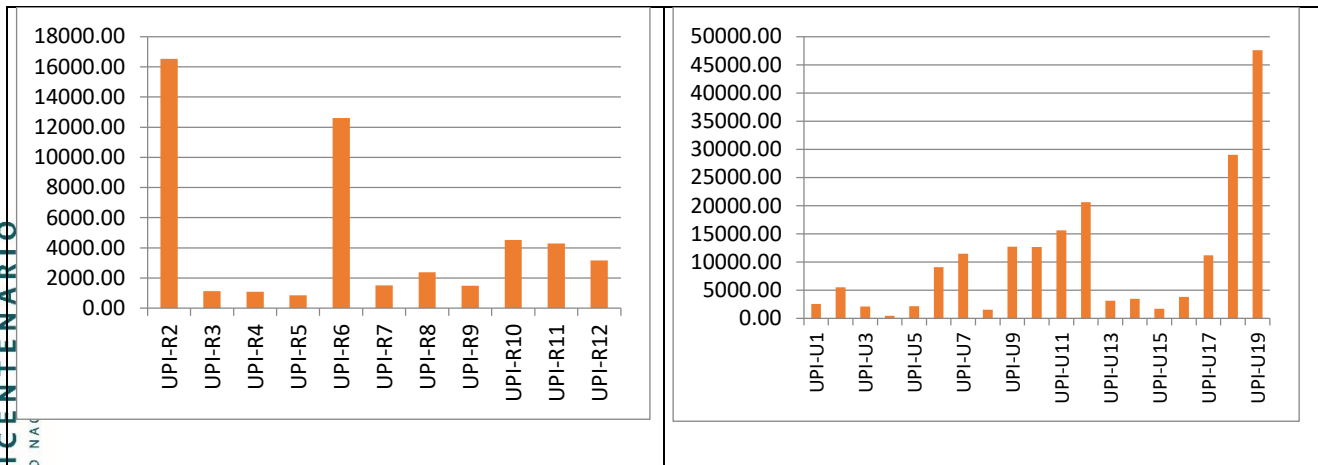


Figura 8. IOASH para UPI Rurales y UPI Urbanas

Los resultados más altos se registraron en las UPI Urbanas, principalmente las UPI U12, UPI U18, UPI U9 Y UPI U19, que son zonas en donde encontramos los



barrios de Swamp Ground, Cartagena Alegre y Bailey Boat. Sin embargo, se destacan la UPI R2 y UPI R6, con barrios como Las Gaviotas, Avenida 20 de Julio, Barrio Obrero, Simpson Well y Vía San Luis.



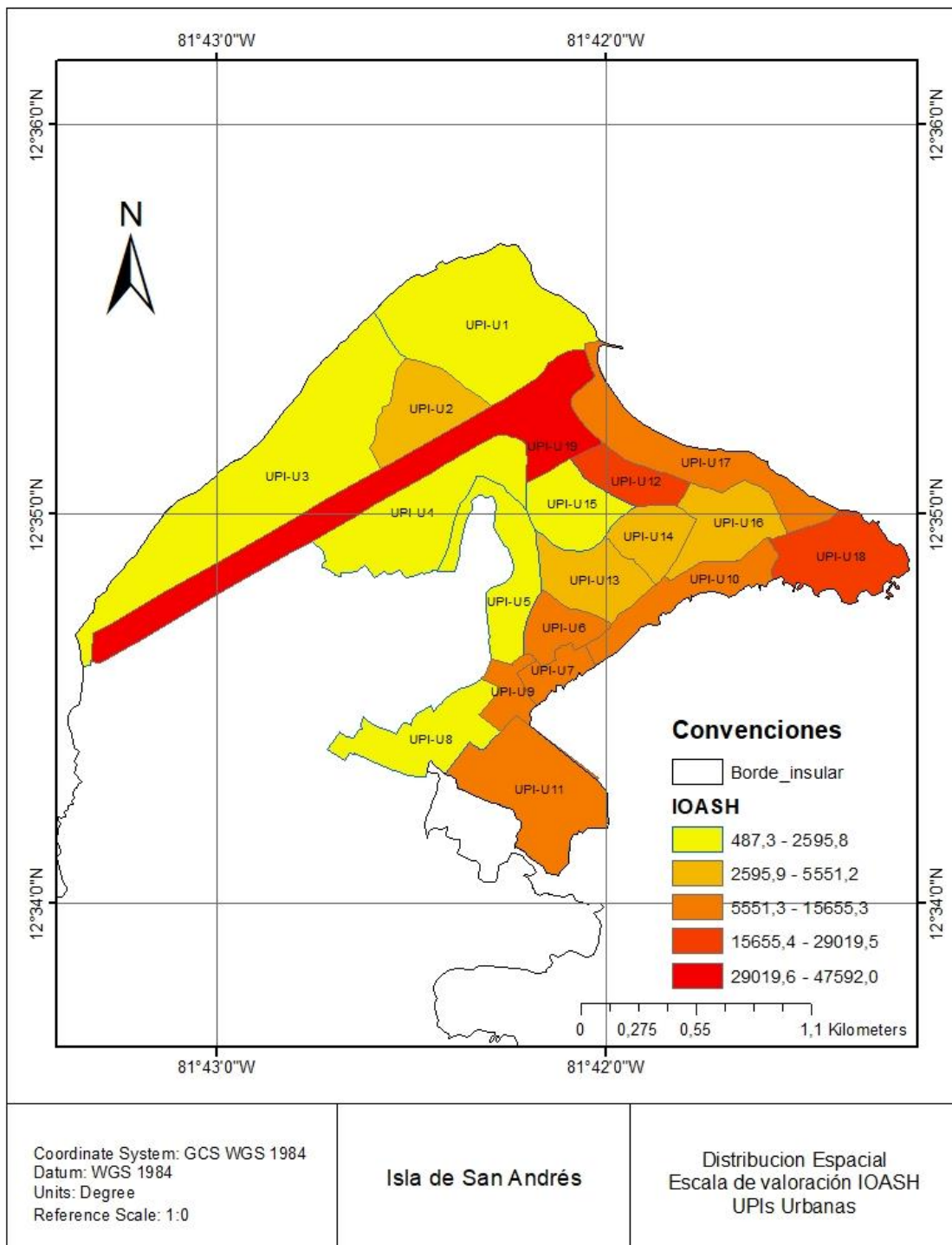


Figura 9. IOASH para UPIs Urbanas

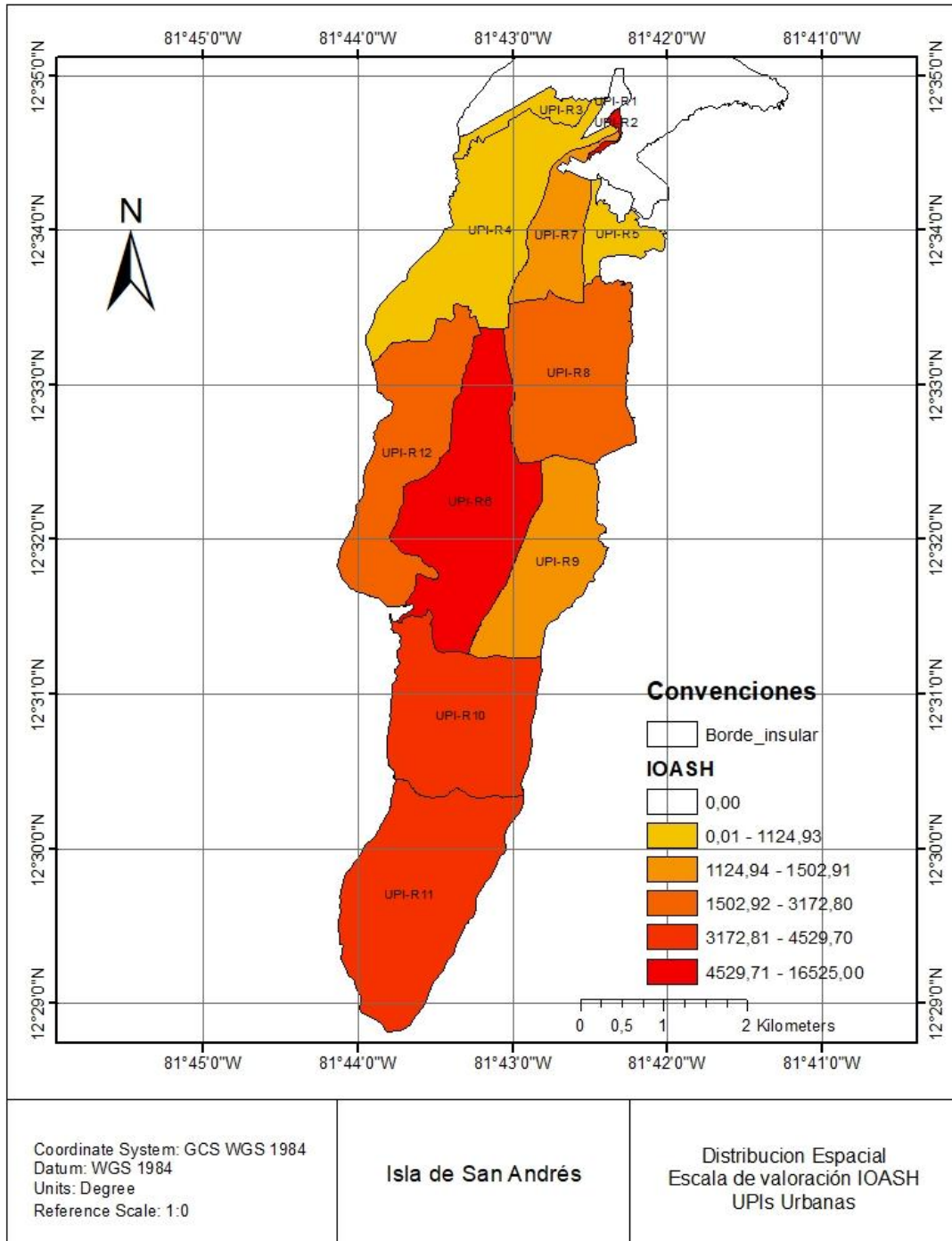


Figura 10. IOASH para UPIs Rurales.



5.4. ÍNDICE DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES (IASAP)

El indicador permite reconocer el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita (UNESCO et al., 2007 citado en IDEAM, 2013). Se calcula mediante la fórmula:

$$IASAP = \frac{\text{Agua subterránea para abastecimiento público}}{\text{No. Habitantes}}$$



Este indicador tiene que ver con la dependencia que existe del abastecimiento público sobre el agua subterránea (UNESCO, 2007). Las categorías para su interpretación corresponden a dependencia baja, intermedia y alta (ver Tabla 6). Estos escenarios resultan de multiplicar por 100 en la ecuación anterior.

Tabla 6. Categorías de IASAP

Categoría IASAP	Rango IASAP
Dependencia baja	< 25%
Dependencia intermedia	25 – 50%
Dependencia alta	> 50%

Fuente: (UNESCO, 2007)

El volumen de agua para abastecimiento público se calculó teniendo en cuenta el volumen de agua captado en los pozos concesionados por la Corporación CORALINA, ya que estos son utilizados para el abastecimiento público. Aunque la unidad de análisis propuesta para este proyecto es la UPI, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones para el cálculo del indicador.





- No todas las UPI cuentan con pozos de agua destinados al abastecimiento público.
- El volumen de agua explotada en dichos pozos no abastece exclusivamente a las personas de la UPI analizada. Por el contrario, se abastece a la isla completa independientemente de donde provenga el agua.
- Es pertinente calcular el indicador como un valor local para toda la isla y no por UPI.

La cantidad de agua reportada por CORALINA, por concepto de explotación de pozos concesionados para abastecimiento público en el año 2017, corresponde a 1.640.924,00 m³. Y de acuerdo con el DANE (2005) la población total de la isla para el año 2017 es de 72.585 habitantes.



Con los datos anteriores el valor del indicador IASAP para la isla de San Andrés, es de 2260,7%, que corresponde al escenario de alta dependencia del agua subterránea (ver Tabla 7). Por otro lado, este indicador también mide la cantidad de agua subterránea por habitante. Se expresa en unidades de volumen o caudal por habitante.

Tabla 7. Resultados IASAP General

ÍTEM	DATO
Total agua extraída (m3/año)	1.640.924,00
Total Hab. 2017 (DANE, 2005)	72585
IASAP (%)	2260,7
IASAP (m3/año-hab)	22,61

Una manera de interpretarlo es entendiendo que mientras más alto su valor calculado, mayor será la intensidad de uso del agua (ACUEDUCTO. Agua, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, 2013). En este sentido, un habitante en la isla de San Andrés, hace uso de 22,61 m³/año. Sin embargo, este indicador no incluye la cantidad de agua que las personas extraen de sus unidades (pozos) particulares y que son de uso doméstico. Por lo tanto, se puede decir que este indicador se



constituye en una aproximación al nivel de dependencia de las personas sino también del nivel de dependencia del sistema de abastecimiento público de la isla a la fuente de agua subterránea.

Con respecto a la ubicación de los pozos analizados en las UPI, se puede mencionar que el 79% de los pozos destinados al abastecimiento público pertenecen a UPI rurales. Y el 84% de estos pozos hacen parte de la Formación San Luis.

Por otro lado, Este indicador también puede ser comparado con el consumo básico por habitante calculado en 110 Litros/Hab-día ($40,15 \text{ m}^3/\text{Hab-año}$) definido por la Comisión Reguladora del Agua (CRA) en su Resolución 150 de 2001 (IDEAM, 2010). Respecto al consumo básico anual encontramos que en la isla, los habitantes solo acceden al 56,3% de dicho consumo. Este resultado es teniendo en cuenta solo el total de agua extraída destinada para el abastecimiento público.



Sin embargo, para efectos de análisis comparativo, dentro del cálculo del agua destinada al abastecimiento público se planteó otro escenario, en el que se sumaba el volumen proveniente de los pozos domiciliarios al volumen de agua extraído por concepto de las concesiones otorgadas por CORALINA y descritas al inicio de este indicador. Y se recalculó el IASAP, obteniendo los resultados de la Tabla 8:

Tabla 8. Resultados IASAP incluyendo extracción de UPI

ÍTEM	DATO
Total agua extraída (m ³ /año)	2781362,7
Total Hab. 2017 (DANE, 2005)	72585,0
IASAP (%)	3831,9
IASAP (m ³ /año-hab)	38,3



Este escenario, es más cercano a realidad teniendo en cuenta que una persona en la isla para el abastecimiento de agua propia no solo dependen del servicio de acueducto, compra de carro tanque y compra de agua embotellada sino que también hace uso de agua extraída de su propio pozo. Bajo estas condiciones, un habitante de la isla alcanza el 95,4% del consumo básico que se le debería poder garantizar para satisfacer sus necesidades.

5.5. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA (IVICA)

Este indicador permite medir la susceptibilidad de un acuífero o sistema acuífero a ser contaminado en función de sus características intrínsecas (Foster & Hirata, 1987; UNESCO *et al.*, 2007 citado en IDEAM, Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua, 2013).



La vulnerabilidad natural o intrínseca de las aguas subterráneas a la contaminación es adimensional. Los métodos de ponderación o calificación de parámetros suelen aplicarse para expresar las relaciones entre las variables y para reflejar su importancia relativa en la evaluación de vulnerabilidad del agua subterránea (IDEAM, 2013)

El documento técnico del IDEAM que describe los indicadores, plantea que para la estimación de la vulnerabilidad debe utilizarse el método más adecuado, por ejemplo el GOD, DRASTIC, entre otros. Lo anterior dependiendo de las características de cada región. Dentro de las variables que se tienen en cuenta para calcular la vulnerabilidad se puede citar la recarga, propiedades de la zona no saturada y suelo, nivel freático y conductividad hidráulica de la zona saturada.

Para el caso, se consultó la Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación, elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente en 2010. Sabiendo de los distintos estudios que se



han adelantado sobre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de San Andrés (Ver **Para un** mejor entendimiento de los patrones descritos para escalas de valoración “Drastic” y “Galdit”, se llevó a cabo un análisis geoestadístico que permite identificar a nivel espacial la vulnerabilidad del recurso hídrico en cada sector, así como las UPI’s que presentan los valores más críticos.

La interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio” (Bosque, 2000).

Los métodos de interpolación determinísticos calculan un valor para celda de la cuadrícula usando únicamente las propiedades de las variables muestreadas (Goovaerts, 1997).



La herramienta utilizada fue el “IDW” (Distancia Inversa Ponderada) la cual limita el rango de valores utilizados para la interpolación. Dado que la IDW es un promedio de distancia ponderado, el promedio no puede ser mayor que el valor máximo o mínimo registrado. Por lo tanto, no puede crear asociaciones en las áreas donde no existen pozos (Watson y Philip, 1985). La influencia de cada registro sobre un valor interpolado es isotrópica.

El geoestadístico IDW se encuentra disponible en la mayoría de los programas de sistemas de información geográfica SIG (Pérez y Mas, 2009) y su definición formal es (O’Sullivan y Unwin, 2003:228):

Donde \hat{e}_c es la elevación calculada para la celda c utilizando n muestras de la variable de interés; e_m es el valor de las muestras de cada variable; y p_{mc} es el peso (o influencia) entre 0 y 1 asignado a cada muestra, calculado como:





Donde d_{mc} es la distancia euclidiana entre la muestra de elevación m y el centro de la celda c de la malla. Opcionalmente, con el fin de mejorar resultados, es común utilizar un exponente a para disminuir la influencia de las muestras conforme se incrementa la distancia (Bosque, 2000):



Tabla 9), se identificó que de las metodologías descritas en la guía del Ministerio de Medio Ambiente, se calculará este indicador utilizando el método DRASTIC y GALDIT. De tal forma que se puedan comparar sus resultados con los anteriormente calculados con otras metodologías (GOD, EPIK, GOD con SIG). Es importante mencionar que para cada metodología se seguirá manteniendo la unidad de análisis UPI, dentro de las posibilidades que permitan las variables o atributos que contenga cada método.

Para un mejor entendimiento de los patrones descritos para escalas de valoración “Drastic” y “Galdit”, se llevó a cabo un análisis geoestadístico que permite identificar a nivel espacial la vulnerabilidad del recurso hídrico en cada sector, así como las UPI’s que presentan los valores más críticos.

La interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio” (Bosque, 2000).



Los métodos de interpolación determinísticos calculan un valor para celda de la cuadrícula usando únicamente las propiedades de las variables muestreadas (Goovaerts, 1997).

La herramienta utilizada fue el “IDW” (Distancia Inversa Ponderada) la cual limita el rango de valores utilizados para la interpolación. Dado que la IDW es un promedio de distancia ponderado, el promedio no puede ser mayor que el valor máximo o mínimo registrado. Por lo tanto, no puede crear asociaciones en las áreas donde no existen pozos (Watson y Philip, 1985). La influencia de cada registro sobre un valor interpolado es isotrópica.

El geoestadístico IDW se encuentra disponible en la mayoría de los programas de sistemas de información geográfica SIG (Pérez y Mas, 2009) y su definición formal es (O’Sullivan y Unwin, 2003:228):

$$\hat{e}_c = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n p_{mc} e_m$$

Donde \hat{e}_c es la elevación calculada para la celda c utilizando n muestras de la variable de interés; e_m es el valor de las muestras de cada variable; y p_{mc} es el peso (o influencia) entre 0 y 1 asignado a cada muestra, calculado como:

$$p_{mc} = \frac{1}{d_{mc}}$$

Donde d_{mc} es la distancia euclidiana entre la muestra de elevación m y el centro de la celda c de la malla. Opcionalmente, con el fin de mejorar resultados, es común utilizar un exponente a para disminuir la influencia de las muestras conforme se incrementa la distancia (Bosque, 2000):

$$p_{mc} = \frac{1}{d_{mc}^a}$$





Tabla 9. Resultados de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de San Andrés evaluados con otras metodologías

Nombre del Estudio	Área de estudio	Autores	Año	Método adoptado	Variables	Resultados	Uso de SIG
Caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Isla de San Andrés.	*Acuífero San Andrés *Acuífero San Luis	INGEOMINAS	1997	GOD (Foster Modificada)	(G): Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea. (O): Litología de la zona no saturada (D): Profundidad del agua subterránea o del acuífero.	Se determinó que hay Vulnerabilidad Extrema para el Acuífero San Luis y Vulnerabilidad Alta para el Acuífero San Andrés.	No
Determinación de los conceptos técnico operativos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés	*Acuífero San Andrés *Acuífero San Luis	JAIME ANDRÉS CARMONA RAMÍREZ	2011	EPIK COP	EPIK (E): Zona de intensa karstificación. (P): Cobertura de protección. (I): Condiciones de infiltración. (K): Red kárstica. COP	* Método EPIK: la zona más vulnerable a la contaminación se encuentra asociada a la formación San Andrés, dadas las características calcáreas, y en especial la zona de falla, donde existen algunos	Si



					<p>(C): Potencial del agua para superar la protección dada por las capas supra yacentes.</p> <p>(O): Protección del acuífero por las propiedades físicas y espesor de las capas supra yacentes de la zona saturada.</p> <p>(P): Precipitación teniendo en cuenta frecuencia, distribución temporal, duración e intensidad de tormentas.</p>	<p>rasgos de formación kárstica como dolinas.</p> <p>* <u>Método COP</u>: las zonas más vulnerables a la contaminación dadas por el método COP se encuentran igualmente en la formación San Andrés; sin embargo dada la textura arcillosa de los suelos el factor de protección para el método COP disminuye el grado de vulnerabilidad de Alta a Moderado.</p>	
SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los Acuíferos de la Isla de San Andrés.	*Acuífero San Andrés *Acuífero San Luis	LIANE GAMBOA	2013	GOD y SIG (superposición de capas)	<p>(G): Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.</p> <p>(O): Litología de la zona no</p>	Vulnerabilidad Extrema para la Formación San Luis y Vulnerabilidad Moderada para la Formación San Andrés.	Si



					saturada (D): Profundidad del agua subterránea o del acuífero.		
--	--	--	--	--	--	--	--

Fuente: (Palmer Cantillo, 2015)





5.5.1. DRASTIC

El método DRASTIC es un modelo empírico desarrollado por Aller et al (1987) para *Environmental Protection Agency*, EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés (Aguero-Valverde & Pujol Mesalles, 2000). Las variables son las siguientes:

Tabla 10. Descripción de variables del método DRASTIC

Variable	Descripción
D: Profundidad del agua subterránea	Indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.
R: Recarga neta	Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta primariamente de la fracción de precipitación que no se evapotranspiración y de la escorrentía superficial. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.
A: Litología del acuífero	Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.
S: Tipo de suelo	Representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza





	la superficie freática.
T: Topografía	Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial.
I: Impacto en el acuífero.	Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.
C: Naturaleza de la zona no saturada	Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.



Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Cada una de las variables se le asigna una valoración o peso que va desde 1 hasta 10, mínima y máxima vulnerabilidad, respectivamente. De la siguiente forma:

Tabla 11. Valoración para cada variable de DRASTIC

Variable	Valoración o peso	
D - Profundidad (m)	Dr	
0 – 1,5	10	
1,5 – 4,6	9	
4,6 – 9,1	7	
9,1 – 15,2	5	
15,2 – 22,9	3	
22,9 – 30,5	2	
> 30,5	1	
R - Recarga (mm/año)	Rr	
0 – 50	1	
50 – 103	3	
103 – 178	6	
178 – 254	8	
> 254	9	
A -Litología	Ar	Valor típico Ar



Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaciár	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10
S - Suelo		Sr
Delgado o ausente		10
Grava		10
Arena		9
Agregado arcilloso o compactado		7
Arenisca margosa		6
Marga		5
Limo margoso		4
Arcilla margosa		3
Estiércol - cieno		2
T - Topografía (%) Pendiente		Tr
0 - 2		10
2 - 06		9
6 - 12		5
12 - 2018		3
> 18		1
I - Naturaleza de la Zona No Saturada	Ir	Valor típico Ir
Capa confinante	1	1
Cieno - arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 - 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 - 8	6
Metamórfica/Ignea	2 - 8	4
Arena y grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9





Caliza Karstica	8 - 10	10
C - Conductividad Hidráulica (m/día)	Cr	
0.04 - 4.08	1	
4.08 - 12.22	2	
12.22 - 28.55	3	
28.52 - 40.75	6	
40.75 - 81.49	8	
> 81.49	10	

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

La vulnerabilidad es calculada con base en la siguiente ecuación:

$$iV \text{ DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$



Donde el subíndice “w” se refiere a un factor de ponderación propuesto por el método para cada variable, y varía entre 1 y 5. Para el método se puede calcular la vulnerabilidad con respecto a presencia de pesticidas o en ausencia de este contaminante. Entonces los factores de ponderación quedan asignados así:

Tabla 12. Factores de ponderación para DRASTIC

Tipo de contaminante	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Para la interpretación de cualitativa del *iV DRASTIC* no pesticida se tienen las siguientes categorías:

Tabla 13. Grados de vulnerabilidad DRASTIC

Rango Vulnerabilidad	Grado Vulnerabilidad
23 -64	Muy bajo





65 -105	Bajo
106 – 146	Moderado
147 – 187	Alto
188 - 230	Muy alto

A continuación se muestran los resultados aplicando el método DRASTIC no pesticida.

La variable profundidad (D) se obtuvo de las mediciones en campo durante el inventario de pozos y fue registrado con el Formulario FUNIAS. La recarga (R) se tomó de los datos reportados por INGEOMINAS (1997) para cada una de las formaciones geológicas.



La litología (A), Suelo (S) y Naturaleza de la zona no saturada (I), se consultaron fuentes bibliográficas y mapas cartográficos con información sobre tipo de suelo que predominan, tanto en la Formación San Luis como en la Formación San Andrés. Los dos autores consultados fueron (Vargas Cuervo, 2004) y (Carmona Ramírez, 2011). Así mismo, fueron útiles las superposiciones de mapas de suelo y geología en ArcGIS para establecer en cada punto los valores correspondientes.

La topografía (T) se refiere a la pendiente de cada punto de análisis, se calculó con base en el mapa de curvas de nivel y la herramienta ArcGIS.

La conductividad hidráulica (C) también fue reportada por INGEOMINAS para cada una de las formaciones geológicas y con base en esa información se establecieron los valores correspondientes a cada punto.





La vulnerabilidad se calculó teniendo en cuenta valores más críticos en variables como conductividad hidráulica, de acuerdo con la bibliografía consultada; que corresponde a datos para épocas secas en la isla de San Andrés.

El *iV DRASTIC* para el total de los pozos analizados osciló entre 143 y 180, lo que en términos cualitativos expresa la vulnerabilidad como Moderada y Alta, respectivamente, para la isla de San Andrés, predominando los puntos en categoría alta, con el 99,8% de los datos.

Tabla 14. Distribución de UPI de acuerdo a vulnerabilidad *iV DRASTIC*

VULNERABILIDAD	UPI RURALES	UPI URBANAS	Total	% UPI Rurales	% UPI Urbana	% Total
Alto	745	1102	1847	40	60	99,8
Moderado	3	1	4	75	25	0,2
Total	748	1103	1851	40	60	100



Teniendo en cuenta la unidad geográfica de análisis, UPI rurales y UPI urbana, se obtiene que el 40% de los puntos analizados que arrojaron una *iV DRASTIC* “Alto” se ubica en UPI Rurales, mientras que el 60% de los puntos están ubicados en UPI Urbanas (ver Figura 11)

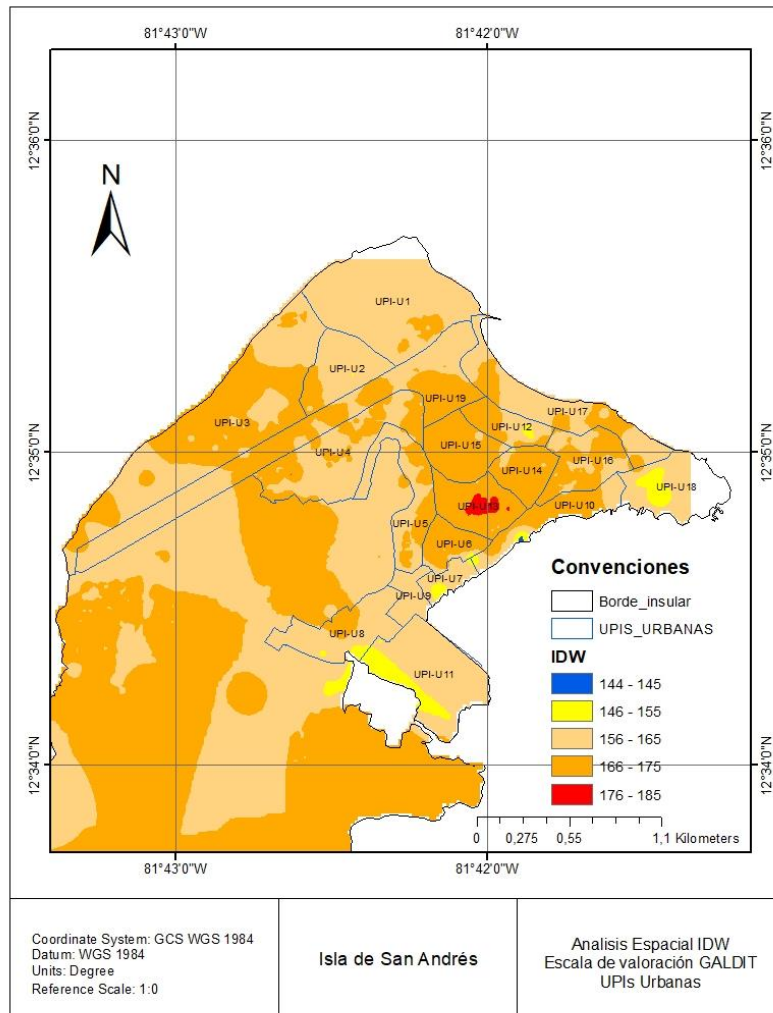


Figura 11. Mapa Vulnerabilidad iV DRASTIC en UPI Urbanas

De lo anterior se puede inferir, que las zonas urbanas de la isla presentan una vulnerabilidad intrínseca mayor con respecto a las zonas rurales. Incluso en aquellas UPI rurales, UPI-R4 y UPI-R3, que se ubican al norte de la isla, caracterizada por ser la zona urbanizada, reflejaron los *iV DRASTIC* significativamente más altos con respecto al resto de las UPI Rurales (ver Figura 12) ubicadas al sur de la isla.

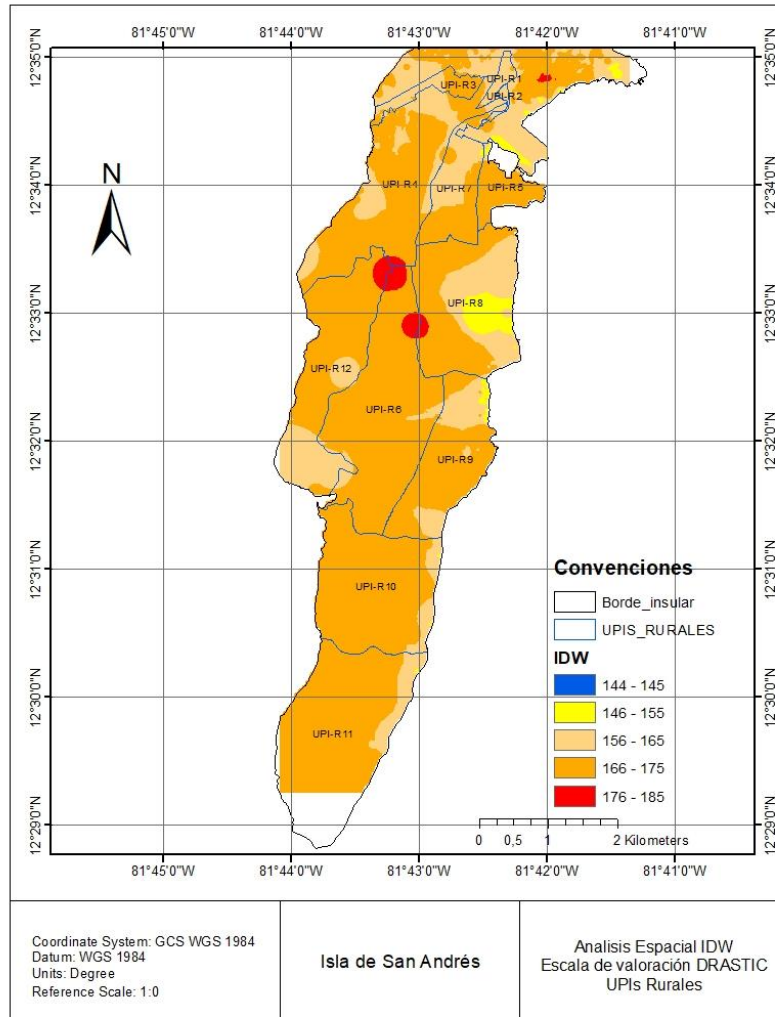


Figura 12. Mapa de vulnerabilidad iV DRASTIC en UPI Rurales

De los resultados ubicados en la categoría “Alta” de vulnerabilidad, se destacan las UPI-U4 y UPI-R4, con la mayor cantidad de pozos en dicha, lo que geográficamente es coherente ya que en estas unidades es donde se ubican barrios como Natania, Canteras, Barrio de los Profesores, Morris Landing, Massany Hill, entre otros; que por estar al norte de la isla, suelen ser las zonas más pobladas. Esto también debe ser considerado como una alerta, pues se puede inferir que las zonas donde se ubica la mayor cantidad de personas, se extrae agua subterránea del acuífero con una vulnerabilidad intrínseca alta. Esto





significa que sus características naturales (tipo de acuífero, litología, suelo, profundidad) lo hacen más propenso a ser afectado por acciones contaminantes.

Es importante mencionar que en la metodología DRASTIC, las variables que mayor peso tienen dentro de la ecuación de cálculo, son Profundidad (D) y Naturaleza de la Zona No Saturada (I); lo cual puede explicar en parte los resultados, dado que los pozos inventariados se caracterizan por presentar poca profundidad, en promedio 4,81 m (valor mínimo 1,3 y máximo 15 m).

Para visualizar los resultados obtenidos en los mapas de las Figura 11 y Figura 12 fue necesario establecer subdivisiones de 5 unidades dentro del rango de vulnerabilidad “alto”. De esta forma, no se vería un solo color en todo el mapa de la isla. Lo que observamos en estos mapas es como el rango de vulnerabilidad “Alto” va variando, desde su límite inferior hasta su límite superior, en toda la isla de San Andrés. Entonces podemos ver cuáles son las zonas de la isla cuyos resultados de IV DRASTIC fueron significativamente más altos.



5.5.2. GALDIT

El método GALDIT fue desarrollado por primera vez por Chachadi y Lobo-Ferreira en el 2001, como parte de Proyecto de la Costa Euro-India. Es un mapeo aproximado de un índice de uso simple que necesita pocos datos. La determinación del índice de vulnerabilidad para el agua subterránea con respecto a la intrusión salina está basada en la combinación de seis parámetros que pueden influenciar potencialmente la intrusión marina (Djoudar/Hallal, Zahouani, & Khaldi, 2017). Con lo anterior es posible identificar las regiones susceptibles de ser afectadas por el potencial de intrusión salina, teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$GALDIT = \sum_{i=1}^6 (Wi \times Ri) / \sum_{i=1}^6 Wi$$





Donde W_i es el peso de cada variable del indicador y R_i es el rango de importancia de cada variable.

Este método se basa en las siguientes variables:

G: Tipo de acuífero

El agua subterránea se encuentra generalmente en capas geológicas y estas capas pueden llegar a ser confinadas, libres (no confinadas), semiconfinadas o limitadas por una o más fronteras. La extensión de la intrusión del agua de mar es dependiente de esta naturaleza de las cuencas (Chachadi & Lobo Ferreira, 2005).

Para la isla de San Andrés, las formaciones San Andrés y San Luís, corresponden hidrogeológicamente a dos acuíferos o reservorios de agua de tipo libre, conformados en bolsones o lentes que flotan sobre agua de mayor salinidad. (CORALINA, 2014),



A: Conductividad hidráulica del acuífero

La conductividad hidráulica se utiliza para medir la tasa del flujo de agua en un acuífero y por lo tanto hacía el mar. Por definición se refiere a la capacidad del acuífero de transmitir el agua. La magnitud del movimiento de la cabeza de agua de mar es influenciada por la conductividad hidráulica del acuífero (Chachadi & Lobo Ferreira, 2005).

En el caso de la isla de San Andrés, la conductividad hidráulica de la formación San Andrés es de 1,9 – 30,5 m/día y para la formación San Luis es de 0,08 a 0,4 m/día (INGEOMINAS, 1997)

L: Nivel del agua subterránea sobre el mar

Se tuvo en cuenta la información de profundidad del nivel estático de los pozos inventariados en campo durante la aplicación del formulario FUNIAS. Y la Altura de cada pozo con respecto al nivel del mar.





D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa

Con la ubicación de cada punto y la herramienta ArcGIS, fue posible calcular la distancia perpendicular de cada pozo hasta la línea de costa más cercana.

I: Impacto existente de la intrusión marina

Se calculó con base en los resultados de análisis de laboratorio que se realizaron a una muestra de los pozos inventariados durante este proyecto. Y se refiere al cociente entre cloruros mg/L y la dureza mg/l HCO_3 .

T: Espesor del acuífero

La variable de espesor está reportada para cada una de las formaciones geológicas en el POMCA de la Cuenca El Cove. Para la Formación San Luis, se reporta un espesor de 8 y 15 m y para la formación San Andrés valores de 170 y 270 m (CORALINA, 2014). Se tomaron puntos medios para el espesor planteado en la bibliografía citada.



Tabla 15. Pesos para cada variable del Índice de Vulnerabilidad GALDIT

Variables	Pesos (W_i)
G: Tipo de acuífero	1
A: Conductividad hidráulica del acuífero	3
L: Nivel del agua subterránea sobre el mar	4
D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa	4
I: Impacto existente de la intrusión marina	1
T: Espesor del acuífero	2

(Chachadi & Lobo Ferreira, 2005)





Por cada variable se asigna un valor de importancia (Ri) de acuerdo a las características del sitio de estudio. En la Tabla 16 se pueden observar valores de importancia.

Tabla 16. Valores de importancia por variable en Método GALDIT

Variable	Peso	Descripción	Importancia (Ri)
G: Tipo de Acuífero	1	Acuífero Confinado	10
		Acuífero libre	7,5
		Acuífero semi-confinado	5
		Acuífero delimitado	2.5
A: Conductividad Hidráulica	3	Alto >40	10
		Medio 10-40	7.5
		Bajo 5-10	5
		Muy Bajo <5	2.5
L: Nivel del agua subterránea sobre el mar	4	Alto <1.0	10
		Medio 1.0 – 1.5	7.5
		Bajo 1.5 – 2.0	5
		Muy Bajo >2.0	2.5
D: Distancia (m) tierra adentro perpendicular a la línea de costa	4	Muy corta <500	10
		Corta 500 – 750	7.5





		Media 750 – 1000	5
		Larga >1000	2.5
I: Impacto existente de la intrusión marina $Cl^-/[HCO_3^{-1}+CO_3^{2-}]$	1	Alto >2	10
		Medio 1.5-2.0	7.5
		Bajo 1-1.5	5
		Muy Bajo <1	2.5
T: Espesor del acuífero (m)	2	Largo >10	10
		Medio 7.5 – 10	7.5
		Corto 5 – 7.5	5
		Muy corto <5	2.5



Una vez se haya calculado el indicador para el área de estudio, este variará entre un valor mínimo de 2.5 y un valor máximo de 10. El método de GALDIT permite hacer una interpretación cualitativa de dichos resultados basados en la siguiente tabla:

Tabla 17. Rangos de vulnerabilidad en GALDIT

Rangos de GALDIT	Clases de Vulnerabilidad
≥ 7.5	Vulnerabilidad Alta
5 – 7.5	Vulnerabilidad moderada
< 5	Vulnerabilidad baja

(Chachadi & Lobo Ferreira, 2005)





Para determinar la importancia de cada variable para los puntos de referencia (pozos) en cada una de las UPI, se cruzaron estos puntos con mapas de información geológica para determinar la formación geológica en la que se ubicaban. Para cada formación existe información bibliográfica del tipo de acuífero (G), Conductividad Hidráulica (A) y espesor (T). El resto de variables como Altura del agua subterránea con respecto al nivel del mar (L) y Distancia perpendicular de cada punto (pozo) a la línea de costa más cercana (D), se determinó a través de la herramienta ArcGis. El impacto por Intrusión Salina (I) se determinó para cada punto teniendo en cuenta las muestras de agua recolectadas en campo y analizadas en laboratorio.



Los resultados de calcular el iV GALDIT muestran que el 40,20% de los pozos analizados presentan vulnerabilidad “Moderada”, seguido de un 0,33% y un 59,48% de los pozos que se agrupan con vulnerabilidad intrínseca “Baja” y “Alta” respectivamente (ver Tabla 18).

Tabla 18. Resultados Generales de Vulnerabilidad GALDIT

VULNERABILIDAD GALDIT - iV GALDIT	Total pozos UPI	% pozos
Alta	182	59,48
Baja	1	0,33
Moderada	123	40,20
Total general	306	100

De lo anterior, las UPI Rurales (36,6%) solo mostraron dos categorías de vulnerabilidad GALDIT, “Alta” con el 76,8% y “Moderada” con el 23,21%, mientras que las UPI Urbanas (63,4%) presentaron vulnerabilidad en las tres categorías de la metodología GALDIT, “Baja” (0,52%), “Moderada” (50%) y “Alta” (50%).

En las UPI rurales donde se obtuvo vulnerabilidad “alta” se trata puntos ubicados en UPI R9, UPI R10, UPI R3, UPI R4, principalmente (ver Figura 13). Sur de la isla, costado suroeste y costado noroeste. Donde se pueden mencionar algunos barrios que destacan como San Luis, Tom Hooker, Elsy Bar, Sound Bay, Cueva

de Morgan, Simpson Well y El Bight al sur y suroeste. Y al costado noroeste, se identifican barrios como Morris Landing, Lox Bight, Canteras y Hill Well.

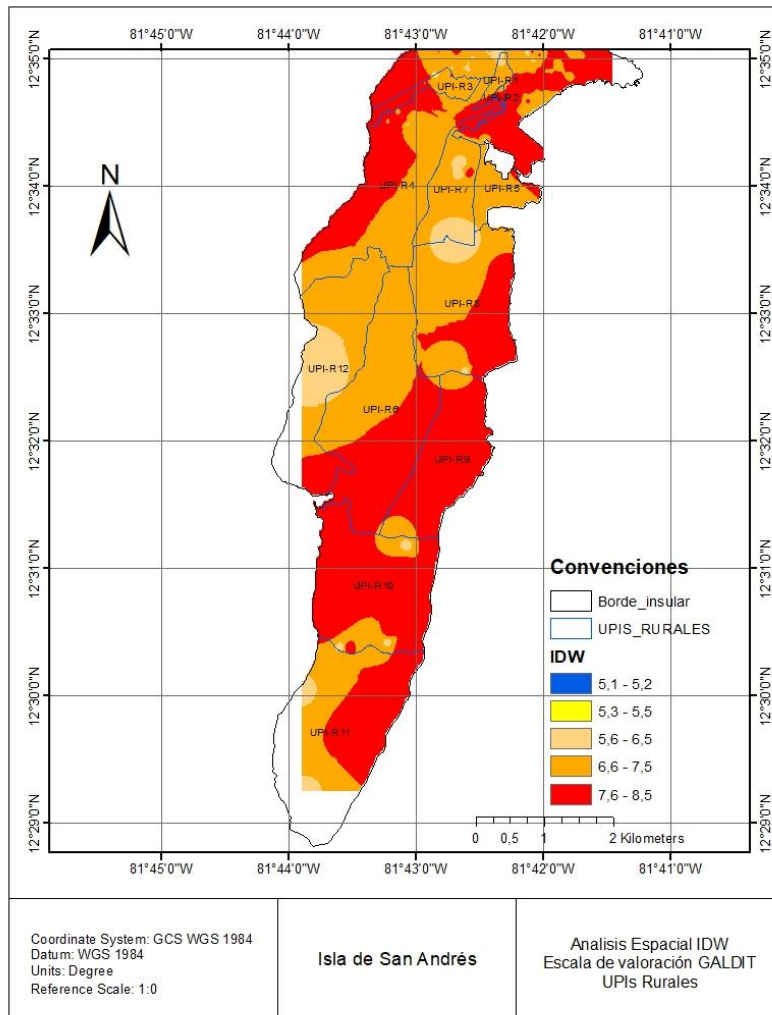


Figura 13. Mapa Vulnerabilidad GALDIT en UPI Rurales

En cuanto a las UPI Urbanas, los puntos donde el resultado fue una vulnerabilidad alta corresponden al 50% de los datos totales en UPI urbana. Y se encuentran dispersos en mayor cantidad de puntos al noroeste de la isla con barrios como Sarie Bay, Cabañas Altamar, Tablitas y la Rocosa. En la zona central



del norte de la isla con barrios como Natania, Barrio de los Profesores, Serranilla, Modelo 2da etapa, School House, Back Road parte baja, Avenida Juan XXIII. Y al este se destacan barrios o sectores como Avenida Newball, Los Almendros, Avenida Providencia, Las Gaviotas, Avenida 20 de Julio, Avenida Las Américas, Rock Hole, Swamp Ground, Cartagena Alegre, Santana y El Cocal (Ver Figura 14. Mapa Vulnerabilidad GALDIT en UPI Urbanas).

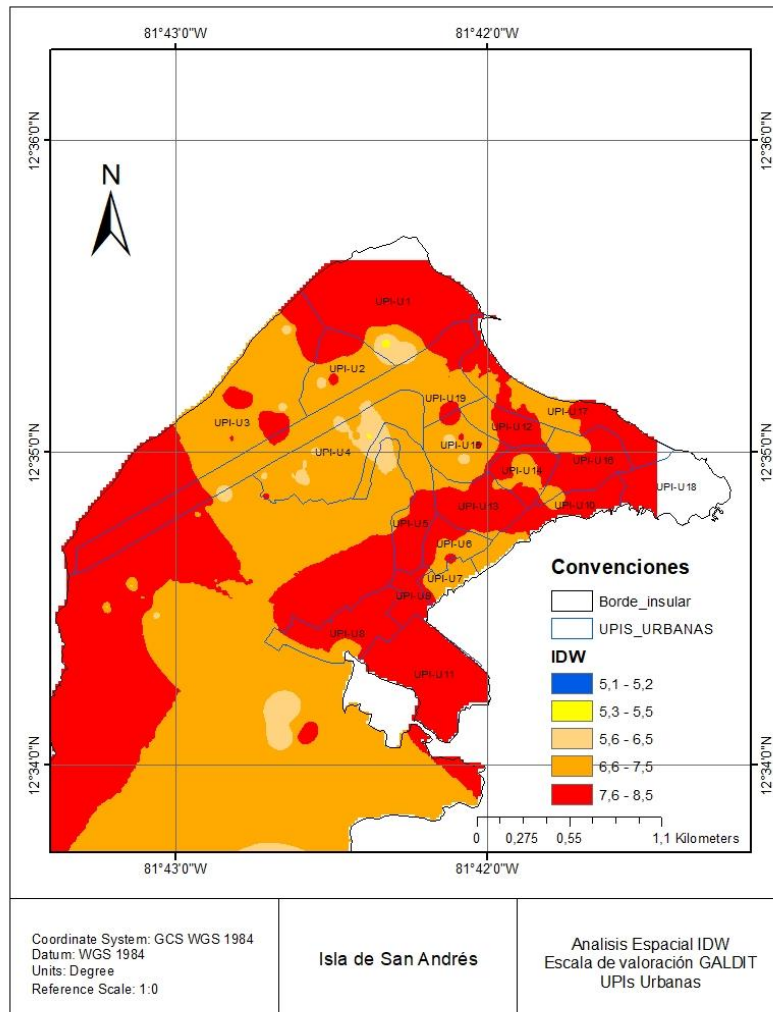


Figura 14. Mapa Vulnerabilidad GALDIT en UPI Urbanas





5.6. **ÍNDICE DE PRESIÓN DEMOGRÁFICA SOBRE EL AGUA (IPD)**

Integra cinco indicadores: Indicador de distribución de la población, Indicador de la población habitante en zonas secas, Indicador de consumo doméstico (de consumo en actividades antrópicas), Indicador de crecimiento de la población, Índice de presión o estrés hídrico. (CRI-UAEMéx, 2007 citado en (IDEAM, 2011)).

5.6.1. INDICADOR DE DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN

El cálculo del Indicador de Distribución de la Población, se realiza considerando la población de una subdivisión (en este caso UPI) de un territorio como un porcentaje de la población total de todo el territorio (IDEAM, 2011). Los datos de población de UPI utilizados fueron los reportados por el DANE en 2013. Por lo tanto, se calculó porcentaje de población en cada UPI con dichos datos.

5.6.2. INDICADOR DE LA POBLACIÓN HABITANTE EN ZONAS SECAS

El Cálculo del Indicador Población en Zonas Áridas, se realiza considerando la población de cada subdivisión de un territorio que habita en zonas áridas como un porcentaje de la población total de su respectiva subdivisión.

Para el caso de San Andrés, este indicador se consideró “0” dado que de acuerdo a la clasificación de las zonas de vida hecha por Holdridge (1978), la vegetación

del Archipiélago se puede definir como de bosque seco tropical ya que la temperatura promedio anual es mayor a 24 °C y la precipitación fluctúa entre los 1000 y 2000 mm/año (Holdridge, 1978).

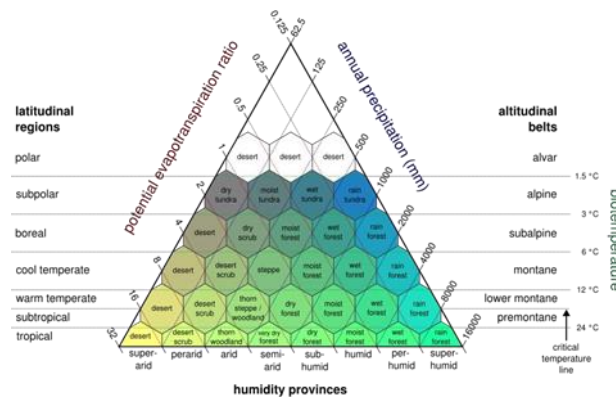


Figura 15. Zona de Vida de la isla de San Andrés Pirámide de Holdridge



5.6.3. INDICADOR DE CONSUMO DOMÉSTICO (DE CONSUMO EN ACTIVIDADES ANTRÓPICAS)

Como un indicador más para conocer factores de presión sobre el recurso hídrico por parte de la población, se puede emplear el Indicador de Consumo Doméstico Estimado de Agua (ICDEA), el cual expresa los consumos domésticos para cada territorio o subdivisión del mismo, de manera tal que se pueden hacer





comparativos entre las subdivisiones para distinguir dónde se dan los mayores y menores consumos y a la vez comparar los resultados con umbrales de consumo tras los cuales se puede hablar de exceso de consumo de agua (IDEAM, 2011).

Los consumos domésticos por cada unidad de análisis se obtuvieron de cálculo de la demanda de agua de los pozos inventariados por UPI. Cuyos resultados permitieron analizar el consumo de cada UPI.

5.6.4. INDICADOR DE CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN

El crecimiento de la población se considera como un posible factor de presión porque, aunque es normal que con éste crecimiento aumente la demanda de agua, cuando el crecimiento es drástico resulta en una gran demanda de agua. Generalmente el crecimiento de la población para un período de tiempo dado se conoce mediante el empleo de una tasa de crecimiento demográfico, y esta última es la que se considera aquí como el Indicador de Crecimiento de Población (ICP). Este expresa el porcentaje de crecimiento de la población entre un tiempo inicial y un tiempo final ((IDEAM, 2011)).

Para efectos de este documento se consultó al DANE y se considera a la isla como una unidad de análisis completa ya que el DANE no realiza cálculos de tasas de crecimiento por UPI.





5.6.5. ÍNDICE DE PRESIÓN O ESTRÉS HÍDRICO

La existencia y grado de estrés hídrico se puede conocer mediante el empleo del Índice de Estrés Hídrico que se define como el número de cientos de personas que tienen que compartir un millón de metros cúbicos de agua renovable disponible por año y fue propuesto por Ohlsson en 1999.

La idea del IEH es otorgar una visión uniforme sobre la cantidad de personas en cada territorio que tienen que compartir un volumen estandarizado de agua, con la idea de poder hacer comparativos entre distintos territorios, y cuanto mayor sea la cantidad de personas que tienen que compartir dicho volumen de agua en cada territorio, también es mayor la presión sobre el recurso hídrico, asunto que se puede traducir como situación de estrés hídrico. En la ecuación el dato básico es el volumen de agua disponible renovable per-cápita (IDEAM, 2011).



El dato al que hace referencia el volumen de agua disponible renovable per-cápita, fue calculado en el indicador IOASH para cada UPI. Por lo tanto, sirvió como insumo para el análisis de presente indicador; basándose en la siguiente ecuación:

$$D5i = \left(\frac{k}{u_i}\right) \left(\frac{1}{100}\right)$$



Donde k corresponde el agua anual renovable disponible por compartir según la definición del índice y equivale a $1'000.000 \text{ m}^3$, u es el volumen de agua disponible renovable en m^3/hab y, finalmente, i se refiere a la subdivisión del territorio del caso (UPI).

Finalmente, el IPD se calcula como la sumatoria del valor normalizado de los indicadores: de distribución de la Población; de la población habitante en zonas secas; de consumo doméstico (de consumo en actividades antrópicas); de crecimiento de la población y de presión o estrés hídrico.

Es importante mencionar que este indicador IPD fue propuesto en el 2011 por el IDEAM pero luego en el documento actualizado de las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) del mismo IDEAM, no se incluyó dentro de los índices a evaluar para el agua subterránea. En este sentido, el documento de 2011 no describe de manera detallada la metodología a seguir para el cálculo y la normalización de los cinco indicadores que integran al IPD. Para efectos de este documento se hizo el ejercicio de evaluarlo con base en la revisión bibliográfica de una evaluación realizada en el Ecuador por (Massa-Sanchez, Arteaga-Marín, Viñan-Merecá, & Martínez-Fernández, 2017).

En cuyo ejercicio La presión demográfica sobre el agua se expresa como un índice (IPDA), que resulta del análisis combinado de 5 variables: (i) indicador de





distribución de la población (IDP), (ii) indicador de población en zonas áridas (IPZA), (iii) indicador de consumo doméstico estimado de agua (ICDEA), (iv) indicador de crecimiento poblacional (ICP) y, (v) índice de estrés hídrico (IEH) (Chias et al., 2007; Quentin et al., 2007 citado en (Massa-Sanchez, Arteaga-Marín, Viñan-Merecí, & Martínez-Fernández, 2017)). Estas variables son las mismas descritas por el IDEAM en su documento del 2011, para el cálculo del IPD.

Massa-Sanchez *et al* (2017), indica que el IPD se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$IPD = \sum_{j=1}^j f_j g_{ji}$$

Donde f es un factor de peso específico asignado a cada indicador o índice, de acuerdo a la influencia que tiene cada variable en la presión sobre el recurso hídrico, i representa las unidades espaciales de análisis (en este caso las UPI), j el número de variable a evaluar (indicador o índice), y g es un índice normalizado demográfico que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$g_j = \frac{d_j - d_{jm}}{d_{jM} - d_{jm}}$$





Donde d es la variable indicador o índice de características de presión demográfica (D1i, D2i, D3i, D4i, D5i), m y M son los valores mínimo y máximo de la variable indicador o índice a evaluar.

Los pesos específicos de cada indicador que integra al IPD, de acuerdo a la influencia que tiene cada variable en la presión sobre el recurso hídrico, son las siguientes:





Tabla 19. Pesos específicos planteados en (Massa-Sanchez, Arteaga-Marín, Viñan-Merecí, & Martínez-Fernández, 2017)

Indicador de IPD	Peso específico (f)
Indicador Distribución de la población (%) D1i	0,25
Población en Zonas Áridas (%) D2i	0,40
Indicador consumo doméstico (solo residencial) (L/día) D3i	0,10
Indicador Tasa de Crecimiento Población 2018 (%) D4i	0,05
Indicador Estrés Hídrico D5i	0,20
Total	1,00



Después de aplicar la normalización de los datos para cada uno de los indicadores que integran el IPD, para el caso de San Andrés, los correspondientes a Población en Zonas Áridas (D2i) y Indicador Tasa de Crecimiento Población (D4i) se





encontró que el primero no haría parte de la suma dado que no tenemos población en dicha zona como se describió al inicio de este indicador. Y para el segundo, la tasa de crecimiento demográfico es la misma para toda la isla, por lo que no hay necesidad de normalizar el dato. En la suma normalizada para calcular el IPD, se multiplicó la tasa de crecimiento por el peso específico de manera directa. Para el caso del indicador de población en zonas áridas, se decidió repartir el peso específico que se asigna a este entre el resto de indicadores que integran al IPD de manera equitativa de tal forma que no se alterara la suma de los pesos específicos quedando así:





Tabla 20. Redistribución de pesos específicos entre los indicadores que integran el IPD para el Caso de San Andrés Isla.

Indicador de IPD	Peso específico (f)
Indicador Distribución de la población (%) D1i	0,35
Indicador consumo doméstico (solo residencial) (L/día) D3i	0,20
Indicador Tasa de Crecimiento Población 2018 (%) D4i	0,15
Indicador Estrés Hídrico D5i	0,30
Total	1,00



Una vez realizado lo anterior los resultados del IPD se describen en la figura..., donde podemos ver como las UPI rurales R4, R5, R6, R7, R8 y R9, siendo UPI R5 la unidad con el valor más alto de IPD comparado con el resto de UPI.; en esta encontramos la zona de la vía a San Luis entre Manglares de Bahía Honda y Bahía Hooker. Esta es la UPI donde se evidencia la segunda mayor cantidad de



personas de acuerdo con el IDEAM (la UPI U4 tiene la mayor cantidad de personas), sin embargo, es la UPI con el mayor consumo de agua calculado. Por lo que se explica que tenga el IPD más alto (ver Figura 16).

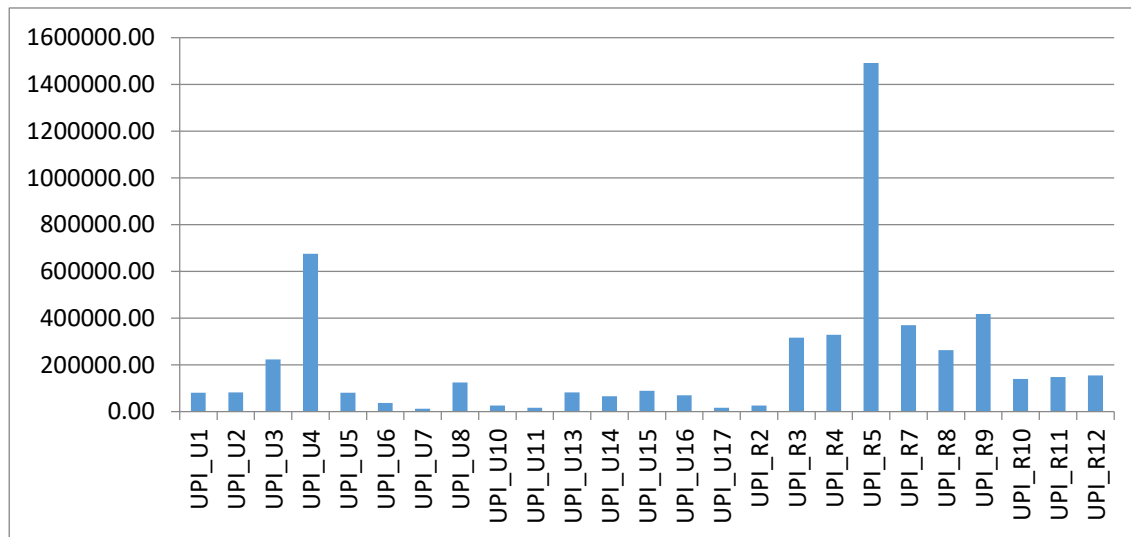


Figura 16. Resultados generales del IPD en San Andrés Islas

Con respecto a la UPI U4 que es la segunda con el valor más alto de IPD (ver Figura 17), podemos mencionar algunos de los barrios asociados a esta, como son Serranilla, School House, La Unión, Natania, Modelo 2da etapa, Canteras y Back Road parte baja.



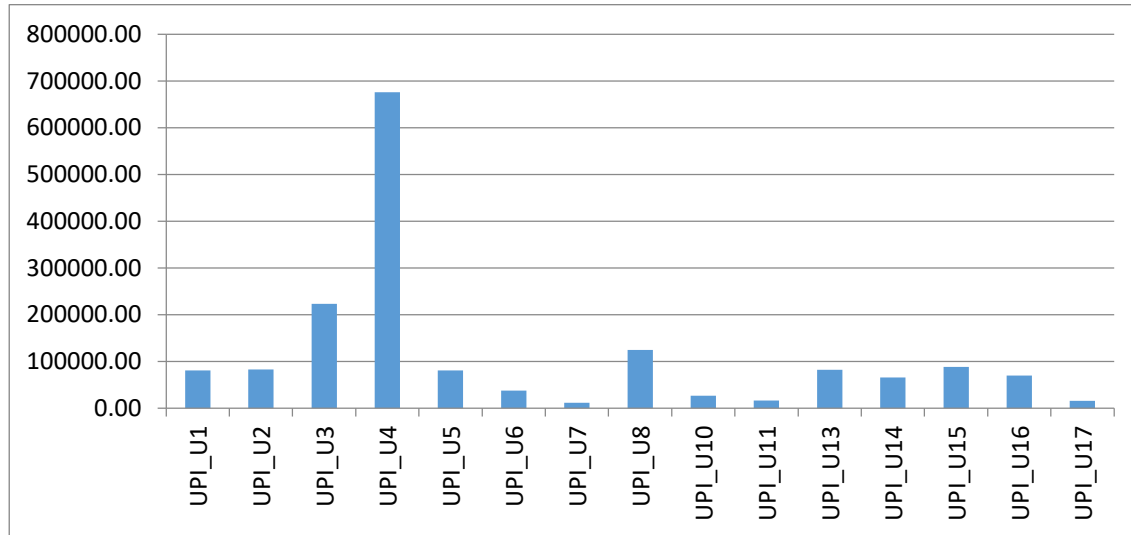


Figura 17. Resultados IPD en UPI Urbanas



En las UPI Rurales aunque muestran el mayor IPD con respecto a las UPI Urbanas, las que más se destacan se encuentran geográficamente hablando más al norte de la isla y en el costado oriental. Donde además de tener mayor población se puede asociar estos resultados con variables como la baja o nula cobertura de acueducto lo que puede ocasionar mayor dependencia de los pozos domésticos, que corresponden a los puntos sobre los cuales se calcula el indicador.

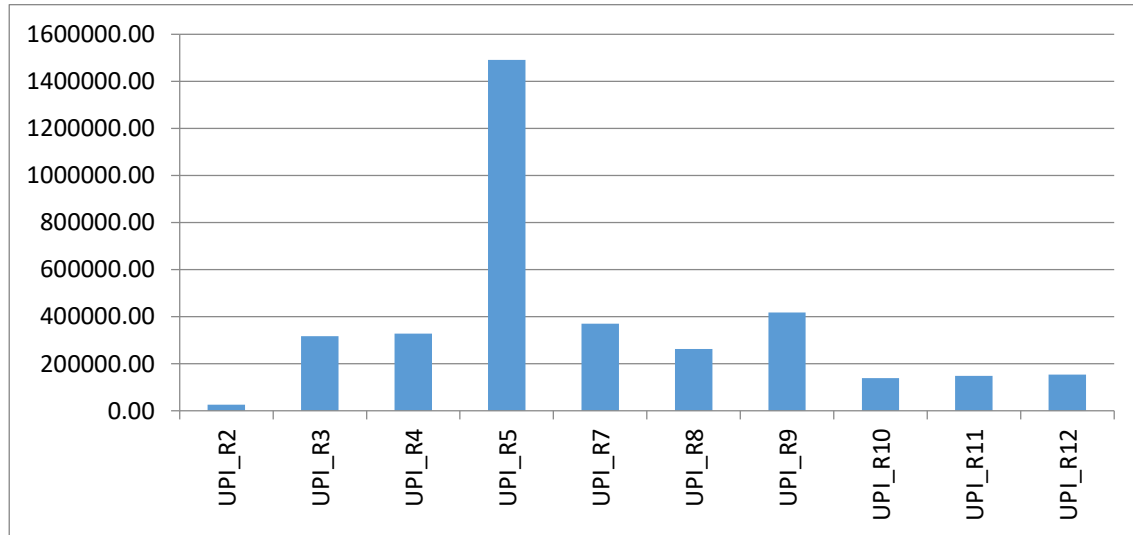


Figura 18. Resultados IPD en UPI Rurales



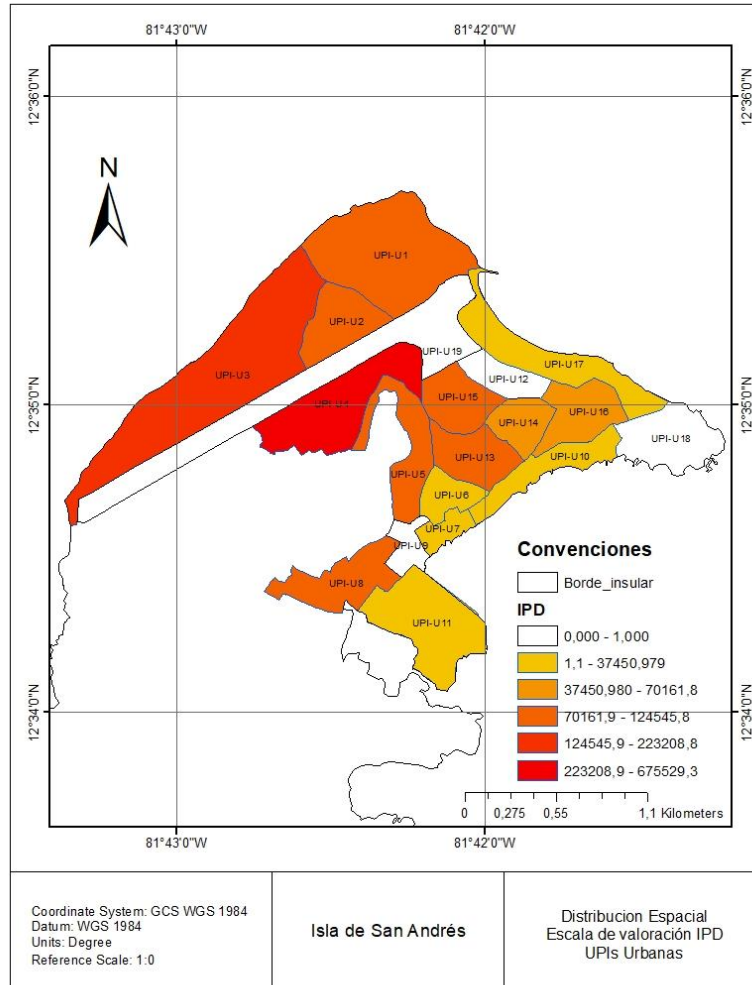


Figura 19. IPD para UPIs Urbanas.

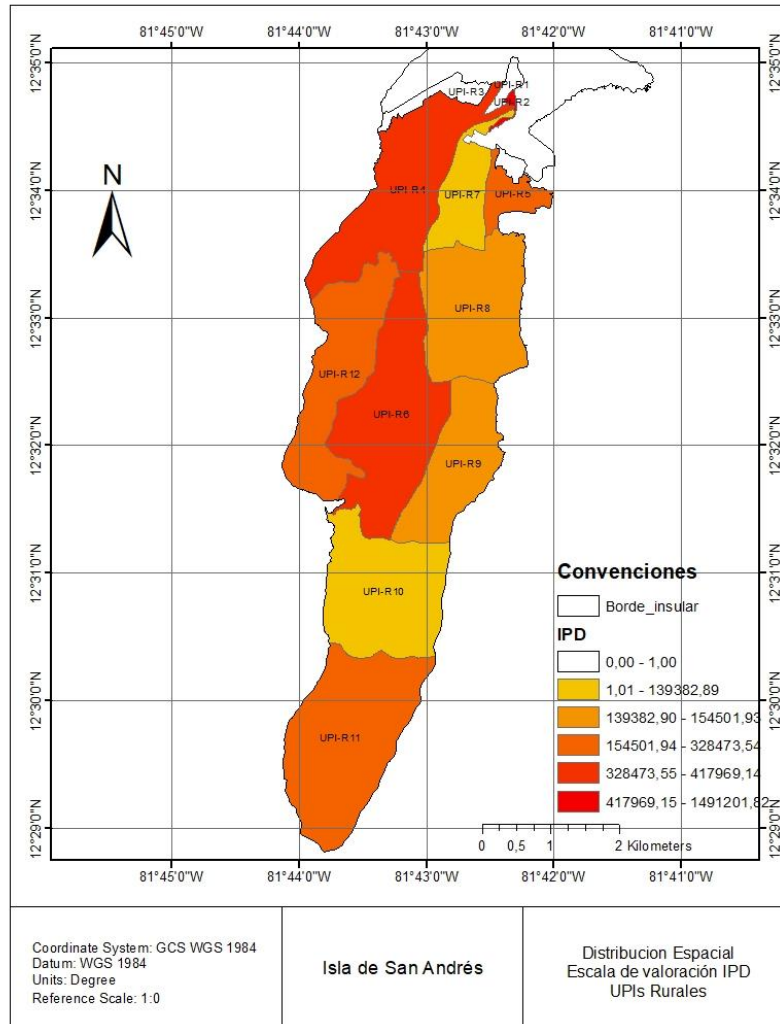


Figura 20. IPD para UPIs Rurales.





5.7. ÍNDICE INTEGRAL DE USO DE AGUA (IIUA)

Este índice permite determinar la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas (IDEAM, 2013). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$IIUA = \frac{D}{O_{rg} + O_d}$$

Dónde:

D: demanda total sectorial

Org: oferta renovable de aguas subterráneas (recarga)

Od: oferta agua superficial disponible

En este caso, en lo que respecta a la recarga (*Org*) se asumirán los mismos valores seleccionados en el cálculo del indicador IEAS bajo el criterio del escenario más crítico con menor recarga reportada para las dos distintas formaciones.

La variable de oferta de agua superficial disponible será cero (0), para la isla de San Andrés, donde no tenemos fuentes de agua superficial que permitan la conceptualización de sobre la oferta superficial.





Finalmente, la demanda total sectorial se debe calcular teniendo en cuenta la siguiente consideración; cantidad de agua reportada por CORALINA para los distintos sectores con datos de consumo por concepto de seguimiento a concesiones. Corresponde a la sumatoria de los volúmenes de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado (año 2017). De acuerdo con el Decreto 3930 de 2010 estos sectores pueden ser consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura y acuicultura y navegación y transporte acuático. Sin embargo, cada uno de los sectores, en cada región y en cada área de estudio tiene sus propias particularidades y dinámicas en cuanto al uso del agua, las cuales deben ser contextualizadas y justificadas por la Autoridad Ambiental para efectos del análisis a realizar y que sus resultados permitan mejor toma de decisiones (IDEAM, 2013).



Para el caso de la isla, el total de la demanda sectorial fue calculado teniendo en cuenta tres sectores definidos así:

- Domestico: correspondiente a la demanda calculada a partir de los datos recolectados en campo con el formulario FUNIAS.
- Comercial: correspondiente a la demanda calculada a partir de la extracción de agua subterránea registrada en las concesiones otorgadas por CORALINA,





otorgadas a empresas de venta de agua por carro tanque, empresas embotelladoras de agua, restaurantes y/o edificios de otros servicios.

- Hotelero: correspondiente a la demanda calculada a partir de la extracción de agua subterránea registrada en las concesiones otorgadas por CORALINA, otorgadas al sector hotelero.

- Acueducto: correspondiente a la demanda calculada a partir de la extracción de agua subterránea registrada en las concesiones otorgadas por CORALINA, otorgadas a la empresa de acueducto PROACTIVA.

Es importante mencionar que el agua extraída de dichos pozos aunque pertenecen a determinada UPI, no distribuye el volumen de agua únicamente en esa unidad de análisis. Por lo tanto, aunque el indicador se calcula por UPI, no se debe considerar como un valor que describa de manera específica dicha UPI. En términos de presión, que es lo que el indicador busca expresar, se entenderá que si una UPI arroja valores altos está reflejando la presión que se ejerce en ella por parte de todos los sectores de la isla que reciben agua desde los pozos de dichas UPI's.

Los resultados nos muestran como la mayoría de las UPI, entre rurales y urbanas arrojaron un IIUA por debajo de 5, con excepción de la UPI R3 para las rurales, que se explica, principalmente, porque dentro de esta UPI se encuentran los



pozos de extracción de la planta desalinizadora de la empresa de Acueducto de la isla (PROACTIVA) y el pozo de la embotelladora de agua Aquaworks, que incrementaron significativamente el datos de extracción que se utiliza para el cálculo del IIUA (ver Figura 21).

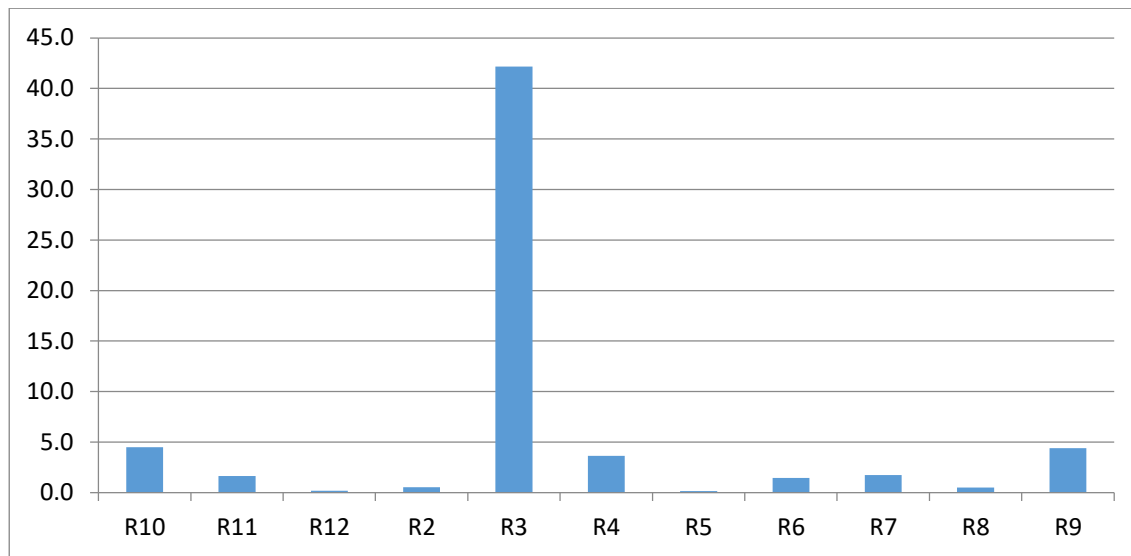


Figura 21. Resultados IIUA para las UPI Rurales

En el caso de las UPI Urbanas, encontramos también se identifica una UPI con el valor más alto del IIUA, y corresponde a la UPI U4, que es la zona donde se



ubican barrios como Natania, Serranilla, School House, Canteras, Modelo 2da etapa, entre otros (ver).

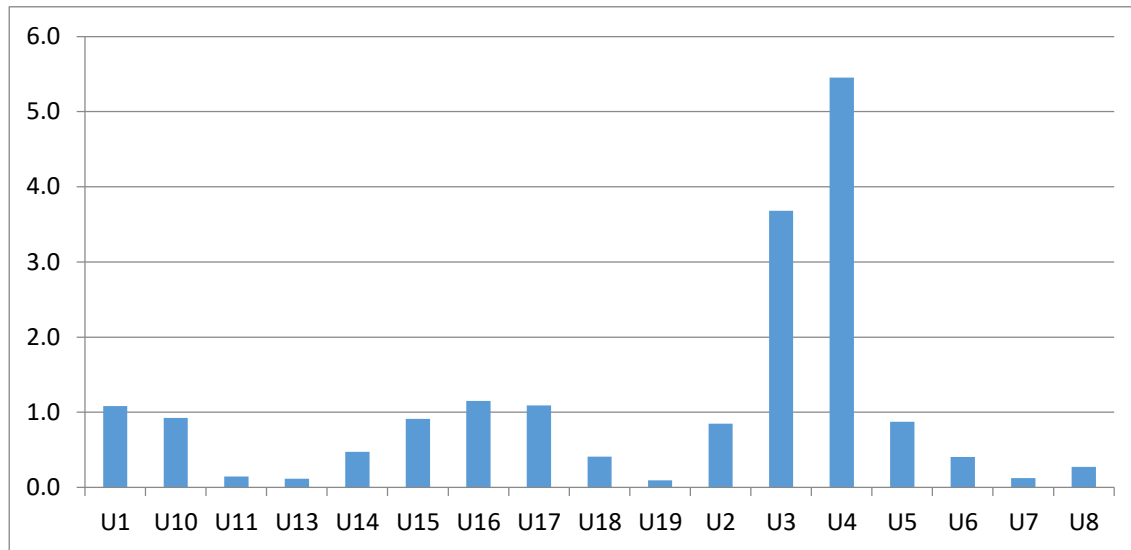


Figura 22. Resultados IIUA en UPI Urbanas

Sin embargo, geográficamente hablando, son estas dos UPI (R3 y U4) zonas contiguas y se encuentran al norte de la isla.

En términos de extracción de agua los tres valores más altos respectivamente fueron los de las UPI R3, UPI R6 y UPI U4. Aunque la UPI R6 (pozos de la planta de ablandamiento de la empresa de Acueducto PROACTIVA) tiene mayor extracción que la UPI U4, el cálculo del IIUA se ve disminuido porque los pozos de la R6 están ubicados en la formación San Andrés y la recarga en esta es mucho



mayor que la establecida para la formación San Luis, donde se ubican las R3 y U4.

5.8. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO HÍDRICO (IVH)

Este índice se define como el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua que, ante amenazas –como periodos largos de estiaje o eventos como el *Fenómeno cálido del Pacífico* (El Niño)–, podría generar riesgos de desabastecimiento. Y se determina, a través de una matriz de relación de rangos del índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso de agua (IUA). Las categorías de este índice se presentan en el del Estudio Nacional del Agua (2010, pag. 330) (IDEAM, 2013).



El IDEAM plantea en su documento de 2013 sobre Evaluaciones Regionales del Agua que para calcular el Índice de Uso de Agua (IUA) se remite al documento de 2010 sobre el Estudio Nacional del Agua (ENA) donde el IUA se define como la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales.





En sentido estricto el indicador debería considerar la oferta hídrica superficial y subterránea en forma unitaria. Sin embargo, mientras se tienen avances en la conceptualización sobre la oferta de agua subterránea, se debe seguir considerando solamente la oferta hídrica superficial (IDEAM, 2010). Teniendo en cuenta lo descrito en el ENA de 2010, para el caso de estudio de este documento no corresponde el cálculo de IUA, hasta tanto el IDEAM, no establezca el marco de conceptualización para la medición de la oferta hídrica subterránea. Esta última se relaciona con la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental y en el ENA de 2010, solo se establecen los parámetros para la oferta superficial. Incluso en el ENA de 2014 se sigue manteniendo el cálculo solo para aguas superficiales (IDEAM, 2015).



El Índice de Regulación Hídrica (IRH) corresponde a la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación” (IDEAM, 2013). Lo anterior con base en la ecuación:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$



Donde, IRH: índice de retención y regulación hídrica, Vp: volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios y Vt: volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Es un indicador dimensional que varía entre 0 y 1. Los valores se agrupan para tener una descripción cualitativa desde muy alta capacidad de retención y regulación de humedad hasta muy baja (ver Figura 23. Categorías IRH y sus características Figura 23).



Rango de valores IRH	Categoría	CARACTERÍSTICAS
> 0.85	Muy alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75 -0.85	Alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 – 0.75	Medio	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50 – 0.65	Bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
< 0.50	Muy bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Figura 23. Categorías IRH y sus características

Fuente: (IDEAM, 2010)

De acuerdo con las gráficas duración de caudales medios con los datos de Caudales calculados a partir de la información recolectada en campo a través del



formulario FUNIAS para las UPI rurales y las UPI Urbanas; los resultados mostraron que, tanto las UPI rurales como las UPI urbanas, el IRH es “muy bajo”, lo que se traduce en una muy baja capacidad de la cuenca para retener y regular el agua.

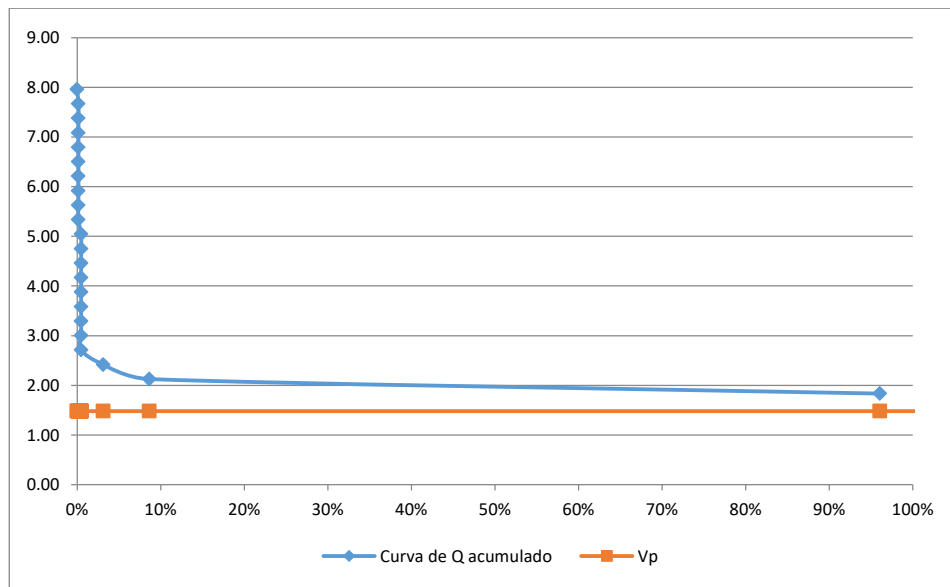


Figura 24. Curva de caudales acumulados UPI Rurales



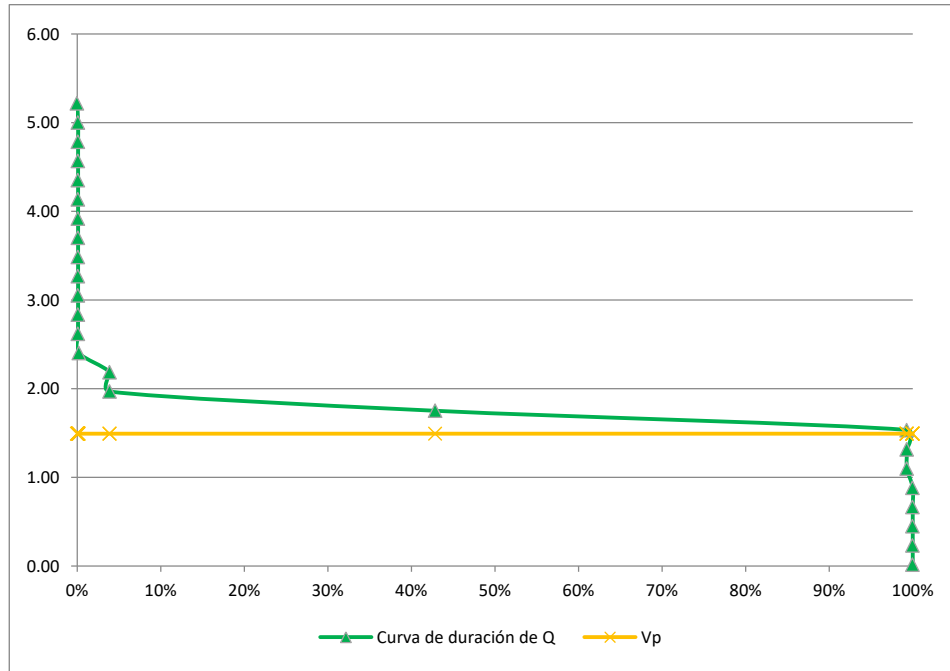


Figura 25. Curva de caudales acumulados UPI Urbanas



En las UPI Rurales, el IRH arrojó un valor de 0 y en el caso de las UPI Urbanas el IRH fue de 0,071. Lo que significa que para la isla en general, el Índice de Regulación Hídrica es “Muy Baja” (ver Figura 23).



6. CONCLUSIONES

ÍNDICE DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA - IEAS E ÍNDICE DE RECARGA RESPECTO A LA EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA SUBTERRÁNEA - IREAS

Este indicador es particularmente importante para la toma de decisiones de las autoridades competentes. Sin embargo, la UNESCO (2007) hace dos advertencias sobre su uso. La primera tiene que ver con la simplificación de su interpretación pues, por ejemplo, aunque el indicador se encuentre en el valor de 100% a nivel nacional, que explica el escenario 2, donde la extracción del agua es igual a la recarga, no necesariamente se debe interpretar como una señal de buena administración del agua subterránea, toda vez que puede esconder grandes variaciones en una escala regional o local. La segunda advertencia se hace desde el punto de vista social y económico, en relación a la forma en que se estimó la extracción del agua, si fue desde estimaciones o recolectada directamente de los usuarios del recurso. Se entiende que si se obtiene desde los usuarios, puede interpretarse como un buen indicador de auto gobernanza.

Para el caso de San Andrés Isla, los datos de extracción se estimaron con base en la información suministrada por los usuarios del recurso. Se trata de datos del





sector doméstico y, si bien son datos de primera mano, existe el riesgo de entrega de información incompleta o que no corresponda a la realidad si la persona que suministra no conoce sobre los temas de bombeo del sitio.

Los resultados obtenidos para este índice IEAS, indistintamente de la unidad de análisis (UPI), corresponden al escenario 1, de extracción del agua menor o igual a la recarga que se percibe por acción de la infiltración de la lluvia.

Pese a lo anterior, se pueden identificar zonas donde el índice obtuvo los valores más altos, tanto en UPI rurales como urbanas. Aunque las UPI Rurales fueron mostraron un comportamiento superior a los resultados de las UPI Urbanas, en términos generales. Lo anterior, puede estar relacionado con mayor extracción de agua subterránea en dichas zonas.

Las causas que pueden estar llevando a esta situación, pese a que las UPI Urbanas se encuentran donde se asienta la mayor parte de la población de la isla, podrían estar relacionadas con otras variables como la poca o nula cobertura de sistema de acueducto hacia estos sectores o que no tenga acceso a otras fuentes de abastecimiento, lo que resulta en mayor dependencia de usuario hacia su pozo.





Es necesario que la interpretación del índice IEAS se haga teniendo en cuenta las particularidades de cada zona o unidad de análisis para no simplificar la información puede arrojar.

Tanto el IEAS como el IREAS, aportarían mayor información si los datos de recarga para la unidad de análisis de este caso no dependiera exclusivamente de la formación geológica. Es decir, si se tuvieran datos de recarga que también considerara épocas de lluvia y época secas. O bien, establecer mecanismos para actualizar el dato con base en criterios o unidades de análisis específicas.



ÍNDICE DE OFERTA RENOVABLE DE AGUA SUBTERRÁNEA CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES - IOASH

De acuerdo con la UNESCO (2007) el índice IOASH busca estimar la cantidad anual de agua segura (m³ por año) para la bebida, la agricultura (principalmente irrigación), agua para la industria, y para los ecosistemas que existen en el área de estudio, lo anterior sin tener en cuenta la calidad del agua.

Está relacionado con los esfuerzos de las evaluaciones para identificar el estrés hídrico. Y aunque no existe un buen valor para este indicador, se considera que a valores altos del indicador mejor es la posibilidad de utilizar la oferta renovable del agua (recarga) de agua subterránea con fines de desarrollo (UNESCO, 2007).



Los resultados nos muestran un escenario en el que la mejor posibilidad para uso del agua producto de la recarga se presenta en las UPI Urbanas. Esto teniendo en cuenta la menor recarga posible establecida para la isla.

Vale la pena mencionar que los resultados se basan en la cantidad de personas residentes de la isla y no tiene en cuenta datos de población flotante por UPI; que de ser incluidos mostrarían otra dinámica en los resultados y reflejarían una situación más cercana a la real situación de uso del recurso en la isla.



ÍNDICE DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO CON RESPECTO AL NÚMERO DE HABITANTES - IASAP

Este indicador tiene que ver con la dependencia que existe del abastecimiento público sobre el agua subterránea (UNESCO, 2007).

Los resultados evidencian una alta dependencia de la isla al agua subterránea y la mayor parte de los pozos de extracción se encuentran en UPI Rurales.

Para darle mayor alcance al resultado del indicador, se propuso recalcular el indicador asumiendo que el volumen de agua para abastecimiento público era por un lado, los volúmenes reportados por CORALINA de las concesiones de



empresas embotelladoras, venta de agua por carro tanque y empresa de acueducto. Y, por otro lado, que el agua para abastecimiento público incluía además de lo anterior, el agua extraída en cada pozo domiciliario. Aunque en ambos casos el indicador revela alta dependencia de la isla sobre el agua subterránea; fue posible comparar estos dos resultados con valores de consumo básico establecidos por la CRA en Colombia.

De lo anterior se obtuvo que en el escenario donde el agua para abastecimiento público solo se refiere al volumen extraído por concepto de concesiones de empresas embotelladoras, venta de agua por carro tanque y empresa de acueducto, no es posible garantizarle a las personas el consumo básico. Y en el segundo escenario, donde se incluye en el abastecimiento público, la extracción que se hace de los pozos domiciliarios, se encontró que las personas alcanzan a tener por lo menos un 95% del consumo básico al que se supone debe acceder.

Sin embargo, es necesario entender que en el segundo escenario, el agua para abastecimiento público cuenta con condiciones de calidad dudosas, dado que los pozos domiciliarios son captaciones directas sin sistemas de tratamiento adecuados.

El indicador de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes IASAP se puede considerar para determinar situaciones de





desabastecimiento en una población específica, aunque sea solo de manera indirecta.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA - IVICA

La elección del método para evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación del Agua Subterránea, a la que se refiere la Evaluación Regional del Agua (ERA), es responsabilidad de la autoridad ambiental y podrá estar basada en diferentes criterios desde disponibilidad de información, recursos financieros para obtener datos de cada variable según el método escogido, recurso humano disponible, entre otros.



En el caso de este documento se hizo el análisis de la vulnerabilidad con base en dos metodologías, DRASTIC y GALDIT. En el primer caso, se trata de un método que utiliza siete (7) variables como Profundidad, litología, la recarga, el tipo de suelo, la topografía, la conductividad hidráulica y naturaleza de la zona no saturada. De las cuales se deriva su nombre. En el segundo caso, GALDIT que para la determinación del índice de vulnerabilidad para el agua subterránea con respecto a la intrusión salina está basada en la combinación de seis parámetros



(tipo de acuífero, conductividad hidráulica, nivel del agua sobre el nivel del mar, distancia perpendicular a la línea de costa, Impacto de la intrusión salina y espesor del acuífero) que pueden influenciar potencialmente la intrusión marina.

- **DRASTIC**

Con la metodología de DRASTIC resulta que existe una vulnerabilidad entre alta y moderada para toda la isla. Pero destacando las zonas de las UPI Urbanas con valores superiores a los arrojados en las UPI Rurales.

Gamboa (2013) reporta la vulnerabilidad intrínseca para la isla de San Andrés teniendo en cuenta como unidad de análisis las formaciones geológicas y con el método GOD; y aunque no es posible comparar esos resultados con los del presente estudio, si se puede realizar algunas inferencias. Sabiendo que entre el 50% y el 100% de los pozos inventariados se ubicaron en la formación San Luis, es posible ver como la vulnerabilidad Alta y Moderada arrojada en DRASTIC se corresponde con lo encontrado por Gamboa (2013) y el método GOD, donde la Formación San Luis tiene una vulnerabilidad Extrema, de acuerdo con la escala de clasificación de GOD.

La autoridad ambiental deberá evaluar la vulnerabilidad del acuífero de tal forma que sea posible hacer un seguimiento continuo a las variaciones de este índice





que ayuden a la adecuada administración del recurso hídrico y a la toma de decisiones.

Dadas las condiciones de la isla, el tipo de acuífero, la disponibilidad de datos actual sobre el acuífero resulta importante que, tal y como lo plantea la ERA, la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero se realice con mayor periodicidad a la que se ha estado realizando actualmente por parte de la autoridad ambiental.

Finalmente, es necesario que para la evaluación de la vulnerabilidad, la Autoridad Ambiental, determiné que metodología va seguir utilizando para la actualización constante de la vulnerabilidad, así como la frecuencia con la que lo realizará. De igual forma, establecer la unidad de análisis para tener un punto de comparación en el tiempo.

No sobra mencionar que estos resultados hacen referencia a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, por lo tanto, la validez y veracidad de estos deben ser corroboradas, por ejemplo, con resultados de análisis de contaminantes como nitratos y/o coliformes fecales.





- **GALDIT**

Es necesario tener en cuenta que la vulnerabilidad se entiende desde términos fundamentales como el riesgo, exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y recuperación. En ese sentido, la vulnerabilidad del agua subterránea se puede definir como *“la propiedad intrínseca del agua subterránea que depende de la sensibilidad de un sistema frente a los impactos de humanos y/o naturales”* (International Association of Hydrogeologists, Vrba y Zoporozec, 1994, citado en (Zaarour, 2017)).

Entendiendo lo anterior, GALDIT fue desarrollada específicamente para acuíferos costeros y busca evaluar la vulnerabilidad de estos acuíferos a la intrusión marina con base en las características intrínsecas del acuífero en estudio. El problema con la intrusión de agua de mar es que solo se vuelve evidente para la población cuando el agua marina ya se introduce como una cuña debajo del agua dulce menos densa (Zaarour, 2017).

Los resultados obtenidos con esta metodología nos muestra zonas de la isla clasificadas entre vulnerabilidad “moderada” y “alta” a la intrusión marina. Las UPI con vulnerabilidad “alta” están distribuidas al sur de la isla y se pueden mencionar zonas como San Luis, Tom Hooker, Elsy Bar, Sound Bay, Cueva de Morgan, Simpson Well y El Bight. En esta misma categoría encontramos algunas UPI en el





norte de la isla, donde en el oeste hay barrios destacados como Morris Landing, Lox Bight, Canteras, Sarie Bay, Cabañas Altamar, Tablitas, la Rocosa y ya en la zona central y este del norte encontramos a Natania, Serranilla, School House, Back Road parte baja, Avenida Juan XXIII, Avenida Newball, Los Almendros, Avenida Providencia, Las Gaviotas, Avenida 20 de Julio, Avenida Las Américas, Rock Hole, Swamp Ground, Cartagena Alegre, y Santana. Entonces esta zonas son las que mayor riesgo presentan a problemas de intrusión marina.

Durante la revisión bibliográfica también se encontró el trabajo de Ramirez Martinez y Vargas Mora, que utilizó esta misma metodología para evaluar la vulnerabilidad por cuña marina en los acuíferos de San Andrés en el 2016, y aunque no se tienen las mismas unidades de análisis de este trabajo entre sus resultados mencionan zonas con vulnerabilidad “alta” al Centro, Simpson Well, Loma Centro, Suroriente. Con las cuales se encuentran similitud en el presente estudio; aunque el artículo de divulgación de Ramirez Martinez y Vargas Mora, indica otras zonas de vulnerabilidad “muy alta” que de acuerdo con la metodología de GALDIT no existe, pues solo tiene tres categorías (alta, moderada y baja).

Los resultados de GALDIT pueden ser el soporte para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales pues ofrece una visión general de la





vulnerabilidad por intrusión marina en una isla como San Andrés, donde se depende principalmente de la oferta subterránea.

Algunos autores no recomiendan esta metodología para acuíferos kársticos debido a la complejidad y heterogeneidad de este tipo de acuíferos (Zaarour, 2017). Sin embargo, la metodología puede ser ajustada a las características de la zona de estudio para obtener mejores resultados. Por ejemplo, siempre verificar que los datos de las variables de la metodología se encuentran dentro de los rangos definidos por GALDIT.

Nuevamente el tema de la selección de la unidad de análisis es de gran importancia para permitir obtener resultados comparables en el tiempo y espacio. En este caso, San Andrés, se recomienda continuar con la unidad de análisis definida por las formaciones geológicas de la isla (San Luis y San Andrés), pues es el tipo de unidad de análisis que contienen la mayor información disponible. Aunque en este trabajo se hace referencia a la UPI, los valores de las variables fueron asignados teniendo en cuenta la formación geológica a la que pertenecían los puntos de cada UPI.

Las zonas con vulnerabilidad alta deberán ser de especial atención a la hora de asignación de concesiones (volumen o régimen de explotación). Pues los datos de





nivel de agua utilizados fueron estáticos y bajo condiciones de extracción el riesgo puede ser mayor.

Para un futuro análisis con esta misma metodología la variable de *Impacto existente de la intrusión marina* ($CI-[HCO_3-1+CO_32-]$) y *Nivel del agua subterránea sobre el mar* cobran gran importancia pues terminará siendo la variable que cambiará en el tiempo. Aunque a futuro también se puede considerar actualizar datos como Espesor del acuífero o conductividad hidráulica. También resulta imprescindible hacer monitoreo constante a la distancia de los pozos a la línea de costa, teniendo en cuenta que fenómenos como el aumento del nivel del mar pueden afectar esta variable.



ÍNDICE DE PRESIÓN DEMOGRÁFICA SOBRE EL AGUA - IPD

El Índice de Presión Demográfica busca presentar una visión general de la demanda de agua y la presión que la población ejerce sobre el recurso hídrico, caso específico de San Andrés Isla. Esta presión se ve influenciada tanto por la densidad poblacional del territorio como por la cantidad de agua disponible. Así como la relación con variables climáticas, representado con el indicador de población en zonas áridas. Sin embargo, para el caso de estudio de la isla de San



Andrés, dadas sus características y que el IPD solo contempla la población que se ubica en zonas áridas, no fue posible incluirlo en la suma final del IPD.

No obstante, los resultados muestran claramente como las zonas donde se ubica la mayor cantidad de personas y no necesariamente la mayor cantidad de pozos domésticos (UPI-R5 por ejemplo), que corresponde a las áreas de la isla donde se han asentado las personas principalmente, es donde se da la mayor presión demográfica sobre el recurso hídrico. Estos resultados pueden estar con situaciones como baja o nula cobertura del sistema de acueducto, que resulta en una mayor presión por motivo de mayor explotación de los pozos domésticos.



Resulta de especial atención aclarar que el IPD se calculó con base en datos de puntos de extracción domiciliario y a respecto a la población residente en San Andrés. Pero siendo esta isla un destino turístico con una tendencia al aumento del número de turistas en los últimos años, será importante establecer la metodología por medio de la cual se incluirá en el cálculo de la presión demográfica sobre el recurso hídrico por parte de la población flotante que visita las islas cada año.

Las variables de mayor peso, de acuerdo con la metodología son distribución de la población y estrés hídrico. Por lo que a futuro, es importante mantener datos actualizados sobre estas variables.

Dirección de Sede
Sede Caribe



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

20 *Sede*
años *Caribe*



ÍNDICE INTEGRAL DE USO DE AGUA IIUA

Para el cálculo de este indicador, que contempla la oferta superficial, solo se evaluó con la información de oferta de agua subterránea dadas las características de la isla. Y de acuerdo con los resultados fue posible identificar un área comprendida entre la UPI R3 y la UPI U4, que son contiguas geográficamente hablando, en donde el IIUA tiene el valor más alto. Esto se puede traducir en que se trata de las zonas en donde se da mayor presión por uso del recurso hídrico en relación a la oferta de agua subterránea de dicha área. Entendiendo la presión que surge de todos los sectores de la isla que se abastecen de los pozos allí ubicados y no únicamente de las personas o sectores que allí se encuentran.



Pese a que los pozos de la planta de ablandamiento de la empresa de acueducto PROACTIVA (ubicados en UPI R6), registran la segunda mayor extracción, el indicador IIUA permite observar la importancia de la recarga a la hora de calcular la presión por uso del agua; pues el IIUA es solo el noveno valor más alto de todas las UPI analizadas.

Este indicador puede ser de gran ayuda a la hora de la gestión del recurso hídrico porque permite tener un panorama más claro sobre la influencia de uso del



recurso hídrico que hacen todos los sectores de consumo de la isla sobre la oferta disponible (recarga).

Vale la pena mencionar que al incluir la extracción de pozos de acueducto, sector hotelero, venta de carro tanques y agua embotellada, en el cálculo del IIUA, se está hablando de la presión por uso que ejerce, no solo la población residente, sino también, la población flotante (turistas). En este sentido, se constituye en una herramienta de gran significado para entender la dinámica de uso del agua en la isla de San Andrés, siendo el turismo la principal actividad económica.



ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO HÍDRICO IVH

El Indicador de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH), expresa la fragilidad de un sistema hídrico para mantener la oferta para abastecimiento en escenarios de amenaza, por ejemplo, un evento de Fenómeno de El Niño. Y se establece a través de la relación de los indicadores IRH (índice de regulación hídrica) y el IUA (índice de uso de agua).

En este sentido, el IUA hace solo referencia a cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta





hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales. Por lo que no es posible calcular el IUA para la isla de San Andrés hasta tanto el IDEAM, no establezca el marco de conceptualización para la medición de la oferta hídrica subterránea.

No obstante, se procedió a la evaluación del IRH por grupo de UPI's, Rurales y Urbanas, ya que era necesario una serie de datos considerable para la construcción de las curvas de caudal acumulado. Los resultados nos muestran que la isla en general presenta una capacidad de regulación del agua y retención de humedad muy baja.



Aunque no fue posible determinar el IVH, el ejercicio de evaluación del IRH es de gran utilidad a la hora de estudiar la influencia de periodos largos de sequía en la isla por eventos como el Fenómeno de El Niño. Incluso puede ser de interés si se quiere evaluar el IRH en periodo seco y periodo de lluvia de la isla.

CONSIDERACIONES ADICIONALES

Para efectos de las evaluaciones regionales del Agua (ERA) el IDEAM en el 2013, solo planteó cinco (5) indicadores para aguas subterráneas de los ocho (8) evaluados en este documento. Estos corresponden a Índice de extracción de agua



subterránea (IEAS), Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP), Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas subterráneas (IVICA), Índice integral de uso de agua (IIUA) y Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH).

Es necesario que la Autoridad Ambiental defina los que considerará de mayor interés a futuro con base en los resultados aquí descritos.

En cuanto a la unidad de análisis utilizada en este análisis, es importante apuntar que se deberá establecer si seguirá siendo la misma para futuras evaluaciones de los indicadores, puesto que aun separando los pozos analizados por UPI, estos estuvieron supeditados a su ubicación en la dos formaciones geológicas de la isla (San Andrés y San Luis), que son las zonas de las que se tiene la mayor cantidad de datos disponibles requeridos para la evaluación de los indicadores.





BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO. Agua, Alcantarillado y Aseo de Bogotá. (2013). *METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA (ERA)*. Documento Síntesis. ORDEN DE SERVICIO No. 2-02-4300-908-2013, EPAM S.A. E.S.P., Bogotá, Bogota.

Agüero-Valverde, J., & Pujol Mesalles, R. (22 de Septiembre de 2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle. *Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía*, 1-37. Costa Rica.

Cabrera Santana, M. d., & Custodio Jimena, E. (2013). Hidrología y Terrenos Volcánicos. En J. C. Santamarta Cereza, *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias*. (pág. 92). Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes.

Cadavid Giraldo, N. (Mayo de 2008). Agua para consumo doméstico en Colombia costos y regulación tarifaria. *Gestión y Ambiente*, 11(1), 97-108.

Carmona Ramírez, J. A. (2011). *Determinación de los conceptos técnico operativos para el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés*. Medellín, Antioquia, Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Chachadi, A., & Lobo Ferreira, J. P. (11 de Julio de 2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 –GALDIT Indicators Description. *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resoruces*. Lisboa, Portugal.





Chacón, G., Lizcano, I., & Aspilla Lara, Y. (2012). Consumo básico de agua potable en Colombia. *Responsabilidad social y ambiental en los servicios públicos, VIII(1)*. Colombia.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. (23 de Enero de 2001). RESOLUCIÓN No. CRA 150. *Por la cual se establecen consumos básicos y máximos de conformidad con lo establecido en la Ley 373 de 1997*. Bogotá D.c., Colombia.

CORALINA. (2000). PMAS. *Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés, PMAS 2000-2009*, 1-121. San Andrés Isla, Colombia: CORALINA.

CORALINA. (2005). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca El Cove, POMCA 2005-2014*. San Andrés Isla, Colombia: CORALINA.

CORALINA. (18 de Noviembre de 2014). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de la Cuenca El Cove (Diagnóstico y Prospectiva). *Convenio de Asociación 016/2014 Fundación Halu*, 1-331. San Andrés Isla , Colombia.

CORALINA, & Universidad Nacional de Colombia, S. (2010). *Modelación del acuífero San Andrés Islas, Proyecto INAP Colombia, Informe Final*. San Andrés Isla.

CORALINA, INVEMAR. (2012). *Atlas de la Reserva de Biosfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Santa Marta, Colombia.

CORALINA, INVEMAR. (2012). *Contribución al conocimiento de la calidad del agua y sedimentos, y determinación de una metodología para tasas de sedimentos en la Cuenca de El Cove*. CORALINA-INVEMAR, Santa Marta.

Coronel, L. (2011). *Evaluar y Monitorear, el gran desafío. Metodología para el diseño e implementación de un sistema de evaluación y monitoreo*. FONAG.





CRA. (2010). *Por la cual se adoptan medidas para promover el uso eficiente y ahorro del agua potable y desincentivar su consumo excesivo*. Documento de trabajo, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, Bogotá D.C.

DANE. (2010). *Censo General 2005, Perfil Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística , Bogotá D.C.

Djoudar/Hallal, D., Zahouani, S., & Khaldi, A. (12 de Diciembre de 2017). *Google Books*. Recuperado el 01 de Agosto de 2018, de https://books.google.com.co/books?id=69pCDwAAQBAJ&pg=PA677&lpg=PA677&dq=ECUACION+PARA+GALDIT&source=bl&ots=n7tZt58h_r&sig=aiEU8JCKkvwDMcP6ZDc9xCwSuJw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiblcHcic3cAhWjrVkKHZ1iDogQ6AEwCXoEACAcQAQ#v=onepage&q=ECUACION%20PARA%20GALDIT&f



Donado Garzón, L. D. (s.f.). Riesgo de contaminación. En U. N. COLOMBIA. Bogotá D.C. , Colombia.

Foster, S., & Mirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Lima, Perú: CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS).

Foster, S., Tuinhof, A., & Kemper, K. (2002-2006). Gestión sustentable de agua subterránea, Conceptos clave e ideas erróneas frecuentes. *GW-MATE*, 1-6.

Gamboa Corrales, L. (2013). *SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la Isla de San Andrés*. Manizales, Caldas, Colombia: UNIVERSIDAD DE MANIZALES, FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA.



GIDAHATARI. (s.f.). *Métodos de Determinación de la Vulnerabilidad en Acuíferos*. Recuperado el 01 de Agosto de 2018, de <http://gidahatari.com/ih-es/metodos-determinacion-vulnerabilidad>

GOBERNACIÓN DEL DEPARTAMENTO ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA, PNUD, UNGRD. (2012). *Plan Departamental para la Gestión Integral del Riesgo, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. San Andrés Isla, Colombia.

GOBERNACIÓN DEL DEPARTAMENTO ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA, PNUD, UNGRD. (2012). *Plan Departamental para la Gestión Integral del Riesgo, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. San Andrés Isla, Colombia.



GWP, G. (2011). *Aguas Subterráneas y Agricultura de Regadío: Haciendo una relación beneficiosa mas sostenible*. Global Water Partnership.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Cuarta ed.). México, México: McGraw-Hill Interamericana.

Holdridge, L. (1978). *Ecología, Zonas de Vida*. IICA. Costa Rica.

IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá D.C.: IDEAM.

IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2011). *Marco Conceptual y Metodológico para las Evaluaciones Regionales del Agua*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.



IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para las Evaluación Regional del Agua (ERA)*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.

IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.

IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para las Evaluación Regional del Agua (ERA)*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.

IDEAM. (2013). *Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para las Evaluación Regional del Agua (ERA)*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Estudio , IDEAM, Bogotá.

INGEOMINAS. (1997). *Caracterización y Modelación del Régimen de las Aguas Subterráneas - Evaluación del Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Isla de San Andrés*. Convenio INGEOMINAS - Ministerio de Salud, INGEOMINAS, Bogotá.

INVEMAR. (2006). *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. REDCAM. Informe Técnico 2006*. Santa Marta: INVEMAR.

INVEMAR. (2 de 12 de 2013). Boletín informativo. *Cambio Climático en Colombia*, 4(2). Santa Marta, Colombia.

Kumar, K. S. (2014). Hydrogeochemistry and groundwater quality appraisal of part of south Chennai coastal aquifers, Tamil Nadu, India using WQI and fuzzy logic method. *Appl Water Sci* , 341–350.





Llamas, R., Hernandez-Mora, N., & Martínez Cortina, L. (s.f.). *El uso sostenible de las aguas subterráneas*. España: Fundación Marcelino Botín.

Massa-Sanchez, P., Arteaga-Marín, J., Viñan-Merecí, C., & Martínez-Fernández, V. A. (16 de Junio de 2017). *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*(47), 22-36.

MAVDT, M. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá D.C.: MAVDT.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2 de Agosto de 2012). DECRETO 1640 DE 2012. *Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de Cuencas Hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C., Colombia.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (18 de Mayo de 2006). Resolución 872 de 2006. *Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas*. Bogotá D.C. , Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Septiembre de 2010). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRINSECA DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN. 1-45. Bogotá, Colombia.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. (6 de Junio de 1997). Ley 373 de 1997. *Por el cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro de agua*. Bogotá D.C., Colombia.

Mogheir, Y., de Lima, M., & Singh, V. (Septiembre de 2009). Entropy and Multi-Objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Water Resour Manage*, 23, 1603-1620.





Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos, 1*. Lima, Lima, Perú: WGP y Sociedad Geográfica de Lima.

Palmer Cantillo, S. (2007). *Análisis Histórico (1997-2005) de la Calidad de las Aguas Costeras de la Isla de San Andrés*. San Andrés Isla: Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe.

Palmer Cantillo, S. (2015). Análisis de los Indicadores de Agua Subterránea Propuestos por el Sistema Nacional de Indicadores para las Evaluaciones Regionales del Recurso, Aplicados en San Andrés Isla, Colombia. 1-84. San Andrés Isla, Colombia.

Pierce, S., Sharp, J., & Guillaume, J. (2013). Aquifer-yield continuum as a guide and typology for science-based groundwater management. *Hydrogeology Journal*, 331-340.

POT, P. (2003). *Plan de Ordenamiento Territorial 2003-2020*. San Andrés Isla, Colombia.

Rascón Ramos, A. E. (2007). *Metodología para la elaboración de la línea base y para la implementación del monitoreo biofísico y socioambiental de la cogestión de cuencas en América Central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Ríos Rojas, L. (2006). *Análisis de metodologías para estimar la vulnerabilidad de acuífero a la contaminación, caso de estudio: Zona sur del Valle del Cauca*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Ruiz Cabarcas, A. (2012). *Análisis del impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola del departamento del Atlántico*. Bogotá D.C., Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Sahuquillo Herráiz, A. (2009). La Importancia de las Aguas Subterráneas. *Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 97-114.





Toro Calderón, J. J. (2009). *Análisis Constructivo del Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. Propuestas de mejora. Tesis Doctoral*. Granada: Universidad de Granada.

Tuinhof, A., & Foster, S. (2006). *Serie de Notas Informativas, Nota 9. Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua*. Washington, EEUU: Banco Mundial.

UNESCO. (2007). *Groundwater Resources Sustainability Indicators* (Vol. VI). (J. Vrba, & A. Lipponen, Edits.) Paris, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNESCO. (2007). *Groundwater Resources Sustainability Indicators* (14 ed., Vol. VI). Paris, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNESCO, IAEA, IAH. (2007). *Groundwater Resources Sustainability Indicators* (Vol. VI). Paris, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNESCO-WWAP. (2006). *El Agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe de la Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo*. ONU. UNESCO.

Vargas Cuervo, G. (Diciembre de 2004). Geología y Aspectos Geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. *Geología Colombiana*(29), 71-87.

Velasco Palacios, H. G. (2012). *Caracterización del agua subterránea mediante índices de calidad en el departamento El Paraíso, Honduras*. Zamorano, Honduras.

Vrba, J., Hirata, R., Girman, J., Hale, H., Lipponen, A., & Neupane, B. (s.f.). Groundwater resources sustainability indicator. International Symposium on Groundwater Sustainability.





WGP, G. (15 de Agosto de 2013). *Global Water Partnership*. Recuperado el 20 de Enero de 2014, de <http://www.gwp.org/es/TOOLBOX/HERRAMIENTAS/Instrumentos-de-Gestion-/Evaluacion-de-Recursos-Hidricos/Desarrollando-indicadores-para-la-gestion-de-los-recursos-hidricos/>

Zaarour, T. (2017). Application of GALDIT index in the Mediterranean region to assess vulnerability to sea water intrusion. *Lund University GEM thesis(21)*, 1-72. Malmö, Lund, Suecia.

