



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso
hídrico en la subcuenca del río Siquirres, Costa Rica**

por

William Jefferson Watler Reyes

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2008

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO INTEGRADO
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

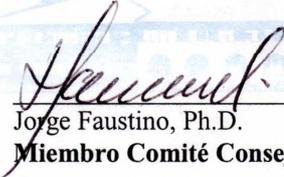
FIRMANTES:



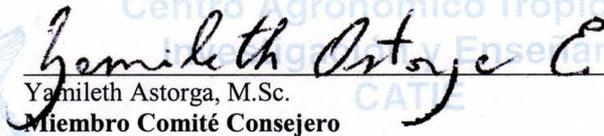
Sergio Velásquez, M.Sc.
Consejero Principal



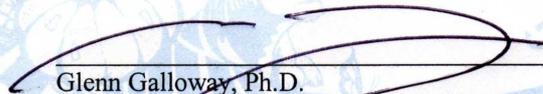
Francisco Jiménez, Dr.Sc.
Miembro Comité Consejero



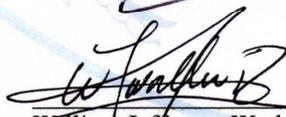
Jorge Faustino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Yamileth Astorga, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



William Jefferson Watler Reyes
Candidato

DEDICATORIA

*A mis padres William Watler Fagot e Hilda Isabel Reyes Chow
Por sus consejos incondicionales y el aliento de fortaleza y persistencia*

*A mis hermanos Marcia Adriana, Leyla Isidis y Erick Uriel
Por todo el apoyo y cariño brindado*

*A mis sobrinos Richard Román, Itzell Nayarit, Milton Erick, Iratxita, Hildita
Realmente son la alegría de la familia*

*A Diana Fuentes Molina
Por su ilimitado apoyo en todo momento*

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro señor, por brindarme la vivir.

A la Fundación FADCANIC, por confiar en mí persona y apostar al desarrollo de los Costa Caribe Nicaragüense.

A Don Albert St´Clair, por haberme dado la oportunidad de ir creciendo personal y profesionalmente en la vida.

A mi profesor consejero, M. Sc. Sergio Velásquez, por su paciencia, carisma y disponibilidad incondicional.

A los miembros de mi comité asesor de tesis, Dr. Francisco Jiménez, Dr. Jorge Faustino y M. Sc. Yamileth Astorga por sus aportes.

A Sr. Luis Gutiérrez Solano, M. Sc. Lorena San Román, Ing. Marcos Rojas Martínez, Dr. Darner Mora, Sr. José Francisco Araya Q, Lic. Karenth Oconnor, Lic. Johana y Flory Araya, Ing. Roger García de quienes tuve el apoyo incondicional en la recolección de la información para poder cumplir los objetivos propuesto. También, mi más sincero agradecimiento a Patricia Leandro, Laura Hernández Calvo, Arnoldo Mora, Mirna Zamora, por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de maestría y promoción, por haber compartido momentos inolvidables de mucho regocijo. Igualmente al grupo futbolero, por los momentos emocionantes compartidos.

Al CATIE por brindarme esa gran hospitalidad y comodidad.

BIOGRAFÍA

El autor nació en Waspam Rio Coco, Región Autónoma del Atlántico Norte, Nicaragua el 28 de diciembre de 1978. Se graduó en la Universidad Nacional Agraria (UNA) de Nicaragua en el año 2001 en la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente con el título de ingeniero Agrónomo con Orientación en Suelo y Agua. Desde el periodo 2002 - 2006 trabajó como docente investigador en la Universidad de la Región Autónoma de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN) y la Bluefields Indian And Caribbean University (BICU-CIUM). Ingresó a la Escuela de posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en la maestría de Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas en enero del 2007 - 2008.

William Jefferson Watler Reyes

CONTENIDO

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS.....	IV
BIOGRAFÍA	V
CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
ÍNDICE DE CUADROS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Caracterización del problema	1
1.2 Importancia y justificación de la investigación	3
1.3 Objetivos del estudio	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Preguntas orientadoras	6
2. MARCO CONCEPTUAL	8
2.1 Conceptualización de vulnerabilidad y riesgo	8
2.1.1 Vulnerabilidad	8
2.1.2 Vulnerabilidad global.....	8
2.1.3 Análisis de vulnerabilidad	9
2.1.4 Riesgo.....	10
2.2 Conceptos básicos de cuenca hidrográfica e hidrológica	10
2.2.1 Cuenca hidrográfica	10
2.2.2 Cuenca hidrológica.....	11
2.2.3 La cuenca como unidad de planificación, manejo, gestión y cogestión de los recursos naturales.....	11
2.2.4 Gestión y cogestión de cuencas	12
2.3 Vulnerabilidad de acuíferos	13
2.3.1 Conceptos y definiciones.....	13
2.3.2 Clasificación de los tipos de acuíferos	16
2.3.3 Vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero.....	21

2.3.4	Aguas subterráneas.....	22
2.4	Importancia de la calidad del agua	22
2.4.1	Calidad del agua.....	23
2.4.2	Índice de calidad del agua	24
2.4.3	Contaminantes de fuentes de aguas.....	29
2.4.4	Contaminación agrícola.....	31
2.5	Recarga hídrica	32
2.6	Recarga artificial.....	33
2.7	Método GOD	34
2.7.1	Mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuífero.....	36
2.7.2	Mapeo de líneas equipotenciales o isopiezas.....	37
2.7.3	Estudio de caso en la aplicación del método GOD para Costa Rica.....	38
2.7.4	Estudio en la aplicación del método GOD-S modificado.....	39
2.7.5	Otras metodologías que determinan la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero	41
2.8	Marco legal del recurso hídrico	43
2.9	Vulnerabilidad y medidas y/o manejo adaptativo.....	44
2.10	Uso del sistema de información geográfica (SIG) en la calidad del agua	45
3.	METODOLOGÍA	47
3.1	Descripción del área de estudio	47
3.1.1	Ubicación de la subcuenca del río Siquirres.....	47
3.2	Metodología del estudio.....	48
3.2.1	Caracterización biofísica, socioeconómica y legal	49
3.2.2	Delimitación, estimación y definición de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (zonas I y II).....	53
3.2.3	Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente (zona I y II)	68
3.2.4	Proponer medidas adaptativas a la vulnerabilidad a la contaminación, sobre la base de la normativa vigente del recurso hídrico, resultado del análisis biofísico y social	77
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
4.1	Caracterización biofísica, socioeconómica y legal de la subcuenca del río Siquirres..	80
4.1.1	Características físicas.....	80
4.1.2	Características biofísicas	84

4.1.3	Aspecto socioeconómico de la subcuenca.....	96
4.1.4	Aspecto legal concerniente a las áreas de protección del recurso hídrico	102
4.2	Delimitación, estimación y conceptualización de las zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, en la parte alta de la subcuenca	114
4.2.1	Delimitación, estimación y conceptualización de la zona I.....	114
4.2.2	Delimitación, estimación y conceptualización de la zona II.....	127
4.3	Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente (zonas I y II)	149
4.3.1	Caracterización del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA).....	149
4.3.2	Modelación del flujo subterráneo en la parte alta de la subcuenca a través del mapa de líneas equipotenciales (isopiezas).....	157
4.3.3	Análisis de relación entre el dinamismo antrópico actual con los parámetros ICA, considerando las direcciones de flujo subterráneo a través del mapa de líneas isopiezas	159
4.3.4	Consideraciones sociales	162
4.4	Proponer medidas adaptativas a la vulnerabilidad a la contaminación, sobre la base de la normativa vigente del recurso hídrico, resultado del análisis biofísico y social.....	170
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
	Conclusiones	174
	Recomendaciones	177
6.	LITERATURA CITADA	179
	ANEXOS.....	188

Watler Reyes, WJ. 2008. Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en la subcuenca del río Siquirres, Costa Rica. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 212 p.

RESUMEN

El estudio se realizó en la subcuenca del río Siquirres, perteneciente a la cuenca del río Pacuare en el Distrito Primero, del Cantón de Siquirres y Tercero de la provincia de Limón, Región IV Huetar Atlántico, Costa Rica. Con el objetivo de analizar la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico la cual integre el aspecto legal, el conocimiento técnico-científico y el local. El trabajo se desarrollo en cuatro etapas: la primera, corresponde a la caracterización biofísica, económica y legal vigente de las áreas de protección y contaminación; la segunda, enfatiza la delimitación, estimación y conceptualización de la zona I y II; la tercera, desarrolla el análisis de los resultados de vulnerabilidad a la contaminación de la zona I y II y las consideraciones y/o planteamiento sociales; y la cuarta etapa, propone las medidas adaptativas. En la investigación se manipuló las herramientas ArcView 3,3, ArcGIS 9,2, Infostat y las metodologías de vulnerabilidad global, RAS, GOD e ICA.

Como resultado se obtuvo, un área de estudio de 10,4 km² (18,8% del área total). La zona I (2,4 km²), con una caracterización de alta vulnerabilidad global a la contaminación superficial (60,76%) y la zona II (4,05 km²), con una lamina de recarga de agua subterránea > 2000 mm/año y una vulnerabilidad media a la contaminación del acuífero, con rangos de 0,34 - 0,49. Un índice de calidad de agua cruda del río Siquirres de regular (54,47), donde sobresalen los parámetros coliformes fecales, DBO₅, turbidez, por la falta de una planificación urbana, sistema de alcantarillados de aguas negras y/o servidas, educación ambiental, asimismo por el cambio en el uso del suelo, la existencia de ganadería en la ribera del río, pequeños establos de porquerizas y basureros ilegales, como los indicadores responsables de la contaminación actual. Finalmente, la medidas adaptativas definidas bajo un conjunto de acciones graduales que atacan las causas de los problemas de la contaminación actual en la zona I y II y los problemas de gestión del recurso hídrico en la parte alta de la subcuenca por periodos de corto, mediano y largo plazo.

Palabras claves: vulnerabilidad, índice de calidad de agua, zona I y II y medidas adaptativas.

SUMMARY

This study was done in the Rio Siquirres subwatershed located in the Siquirres district at the Limon Province in Costa Rica. The main objective of the research was to analyze the integrated vulnerability of water to pollution from several points of view: legal, technical and local. The research was developed in four steps: 1) legal, socioeconomic and biophysical characterization, 2) Delimitation of the apparent protection zones I and II and global vulnerability analysis, 3) superficial and groundwater pollution vulnerability analysis in zones I and II and social issues, 4) mitigation and adaptative actions.

The first outcome was a set of several maps which included climatic, landcover, soils, and geomorphologic, among others. Also a recompilation of all the laws regarding the water resource management in the zone was done. As a second outcome, the apparent protection zone I was delimited based on legal criteria and using a GIS program. The zone II was delimited using the RAS methodology, which uses the climatic balance to identify the groundwater recharge zones. After that, a set of indicators were chosen through a participative process to evaluate the global vulnerability (physical, political, institutional, economic, ecological and educational). This analysis allowed to conclude that the zone I has a high risk to water resources pollution, mainly due to an unplanned urban development expansion, inappropriate landuse and a lack of a solid and liquid waste disposal program. Also, it allowed to identify areas with more than 2000 mm of groundwater recharge which were named as Zone II. The third outcome, was the superficial and groundwater pollution vulnerability using the ICA methodology (superficial) and GOD methodology (groundwater). Results showed that superficial water has still a regular quality but the quantity of fecal coliforms, BOD₅, and turbidity are above the allowed levels and this fact makes the water not suitable for drinking, unless it is potabilized. Also, the GOD analysis showed the groundwater pollution risk is medium in most of the area. Finally, the fourth outcome presents a set of short, medium and large term measures to mitigate or avoid the water pollution on the watershed.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Norma de calidad del agua potable para Costa Rica.....	26
Cuadro 2. Norma de calidad de agua para consumo humano para Centroamérica.....	26
Cuadro 3. Formulas de agregación matemática para estimas ICA	28
Cuadro 4. Contaminantes comunes del agua y fuentes de contaminación asociadas	29
Cuadro 5. Factores hidrogeológicos que controlan la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero .	34
Cuadro 6. Clases de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.....	35
Cuadro 7. Variables e indicadores de la vulnerabilidad física (VF)	57
Cuadro 8. Variables e indicadores de la vulnerabilidad política-institucional (VP-I)	57
Cuadro 9. Variables e indicadores de la vulnerabilidad ecológica (VEC)	58
Cuadro 10. Variables e indicadores de la vulnerabilidad económica (VEN)	59
Cuadro 11. Variables e indicadores de la vulnerabilidad social (VS).....	59
Cuadro 12. Variables e indicadores de la vulnerabilidad educativa (VE).....	60
Cuadro 13. Caracterización y valoración de la vulnerabilidad	60
Cuadro 14. Escala de valoración de la vulnerabilidad	61
Cuadro 15. Valores kg y ciclo vegetativo de la subcuenca del río Siquirres.....	63
Cuadro 16. Valores kp de la subcuenca del río Siquirres.....	64
Cuadro 17. Valores kv de la subcuenca del río Siquirres.....	64
Cuadro 18. Valores kfc de la subcuenca del río Siquirres.....	65
Cuadro 19. Índice GOD-S que estimó la vulnerabilidad a la contaminación de agua subterránea en la subcuenca del río Siquirres.....	66
Cuadro 20. Pesos relativos para cada parámetros del ICA.....	72
Cuadro 21. Solubilidad del oxígeno en agua dulce.....	74
Cuadro 22. Clasificación del ICA propuesto por Brown y sus usos	75
Cuadro 23. Hoja de cálculo para la estimación del ICA	75
Cuadro 24. Precipitación media mensual y anual (mm) de 16 estaciones meteorológicas	85
Cuadro 25. Temperatura media mensual y anual (°C) de 16 estaciones meteorológicas	87
Cuadro 26. Evapotranspiración media y anual (Thornthwaite) de la subcuenca río Siquirres.....	87
Cuadro 27. Población del distrito primero de Siquirres	98
Cuadro 28. Centro educativos públicos en los sectores Central y Sur del distrito Primero de Siquirres	101
Cuadro 29. Resumen de la vulnerabilidad física (VF).....	118

Cuadro 30. Resumen de la vulnerabilidad política-institucional (VP-I)	119
Cuadro 31. Resumen de la vulnerabilidad ecológica (VEC).....	121
Cuadro 32. Resumen de la vulnerabilidad económica (VEN).....	122
Cuadro 33. Resumen de la vulnerabilidad social (VS)	123
Cuadro 34. Resumen de la vulnerabilidad educativa (VED).....	124
Cuadro 35. Primera estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I	125
Cuadro 36. Vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I	126
Cuadro 37. Rangos de la ETreal en la subcuenca del río Siquirres	129
Cuadro 38. Rangos del BC en la subcuenca del río Siquirres	130
Cuadro 39. Rangos de coeficientes de infiltración en la subcuenca del río Siquirres.....	132
Cuadro 40. Distribución de las áreas de recarga de agua subterránea anual en el área de estudio	133
Cuadro 41. Distribución de las áreas de recarga de agua subterránea anual en la subcuenca	133
Cuadro 42. Factor O de la subcuenca del río Siquirres	140
Cuadro 43. Información de los pozos seleccionados para la determinación del factor D.....	141
Cuadro 44. Factor D de la subcuenca del río Siquirres	141
Cuadro 45. Variantes texturales de la metodología (MAG 1995) con los rangos del Factor S.....	142
Cuadro 46. Variantes texturales y Factor S de la subcuenca de río Siquirres	143
Cuadro 47. Estimación del método GOD-S modificado de la subcuenca del río Siquirres	143
Cuadro 48. Estimación ICA para el mes de abril del 2008	150
Cuadro 49. Comparación de los parámetros ICA (abril) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE151	
Cuadro 50. Estimación ICA para el mes de mayo del 2008.....	151
Cuadro 51. Comparación de los parámetros ICA (mayo) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE	
.....	152
Cuadro 52. Estimación ICA para el mes de junio del 2008.....	152
Cuadro 53. Comparación de los parámetros ICA (junio) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE	
.....	152
Cuadro 54. Estimación ICA para el mes de julio del 2008	153
Cuadro 55. Comparación de los parámetros ICA (julio) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE153	
Cuadro 56. Caracterización ICA del agua cruda superficial del río Siquirres.....	154
Cuadro 57. Matriz de selección de los indicadores del dinamismo antrópico actual versus ICA	160
Cuadro 58. Prueba chi-cuadrado del sondeo poblacional	165
Cuadro 59. Problemas y soluciones en materia del recurso hídrico del Cantón de Siquirres.....	169
Cuadro 60. Propuestas de medidas adaptativas para la parte alta de la subcuenca del río Siquirres ...	171

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Divisoria de la cuenca hidrográfica y la cuenca hidrológica.. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2. Procesos comunes de contaminación de aguas subterráneas.. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 3. Contaminación por viviendas **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4. Contaminación física por fosa séptica..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5. Modelo GOD Foster (1987)..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 6. Esquema para general el mapa GOD **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 7. Trazos de la dirección de flujo subterráneo con respectos a las líneas isopiezas..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Marcador no definido.**
- Figura 8. Factor S agregado al índice del método GOD **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 9. Rueda de aprendizaje : el intercalo de accion y reflexion **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 10. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 11. Peso relativo por cada tipo de vulnerabilidad **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 12. Método GOD-S modificado para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 13. Proceso de espacialización y estimación (mapeo) del método GOD-S modificado **¡Error! Marcador no definido.**
- Marcador no definido.**
- Figura 14. Promedio mensual de caudales en el agua cruda del río Siquirres;**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 15. Ángulos de definición las medidas adaptativas de las zonas I y II;**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 16. Mapa de ubicación del área de estudio y área de evaluación **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 17. Curva hipsométrica de la subcuenca río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 18. Forma y calculo del índice de Gravelius de la subcuenca río Siquirres;**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 19. Perfil longitudinal de la subcuenca río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 20. Mapa de distribución espacial de la precipitación de la subcuenca del río Siquirres... **¡Error! Marcador no definido.**
- Marcador no definido.**
- Figura 21. Mapa de distribución espacial de la evapotranspiración de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 22. Mapa de porcentaje de pendiente de la subcuenca de río Siquirres;**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 23. Mapa geomorfológico de la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**

- Figura 24. Distribución porcentual del uso actual del suelo en la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 25. Mapa de uso del suelo en la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 26. Mapa de áreas silvestre protegidas dentro del territorio cantonal de Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 27. Proyección demográfica del distrito primero de Siquirres ... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 28. Ángulos de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 29. Zona I de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 30. Distribución de los indicadores validados de la VF **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 31. Distribución de los indicadores validados de la VP-I..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 32. Distribución de los indicadores validados de la VEC **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 33. Distribución de los indicadores validados de la VEN **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 34. Distribución de los indicadores validados de la VS **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 35. Distribución de los indicadores validados de la VED **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 36. Primera estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 37. ETreal de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 38. BC de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 39. Coeficiente de infiltración de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 40. Zona II delimitada en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres; **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 41. Acuífero libre característico de la subcuenca del río Siquirres desde el punto de vista de la presión hidrostática **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 42. Profundidad de los pozos y nivel estático de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 43. Selección del Factor S en la subcuenca del río Siquirres (variaciones texturas de superficie y subsuelo) **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 44. Mapa del factor O de la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 45. Mapa del factor D de la subcuenca del río Siquirres..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 46. Mapa del factor S de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 47. Mapa GOD-S de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 48. Regresión lineal entre el caudal y precipitación **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 49. Distribución de coliformes fecales en el agua cruda del río Siquirres; **Error! Marcador no definido.**

Figura 50. Promedio mensual de coliformes fecales del agua cruda del río Siquirres; **Error! Marcador no definido.**

Figura 51. Distribución de turbidez en el agua cruda superficial del río Siquirres; **Error! Marcador no definido.**

Figura 52. Promedio mensual de turbidez del agua cruda del río Siquirres; **Error! Marcador no definido.**

Figura 53. Mapa de isopiezas y direcciones de flujo en parte alta de la subcuenca del río Siquirres **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Pozo artesanal a presión atmosférica en la parte alta de la subcuenca.....	135
Foto 2. Nivel estático muy superficial a presión atmosférica.....	135
Foto 3. Medición de la profundidad del pozo.....	136
Foto 4. Fosas sépticas construidos con materiales inadecuados en Moravia.....	161
Foto 5. Basurero ubicado en la naciente del río Siquirres.....	161
Foto 6. Ganadería menor en la franja de los 100 m de distancia al río Siquirres	161
Foto 7. Áreas de potrero en la franja de los 100 m de distancia al río Siquirres	161

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASADA	: Asociaciones Administradoras de Acueductos y Alcantarillados
AyA	: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CAPRE	: Comité Coordinador Regional de Agua Potable y Saneamiento de : Centroamérica, Panamá y República Dominicana
CATIE	: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CEDARENA	: Centro de Derecho Ambiental y de los Recursos Naturales
CEDIATEC	: Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CNP	: Consejo Nacional de Producción
FORGAES	: Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador
GOD	: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table
GWP	: Global Water Partnership (Asociación Mundial para el Agua)
ICA	: Índice de Calidad del Agua
ICE	: Instituto Costarricense de Electricidad
IDA	: Instituto de Desarrollo Agrario
IDW	: Interpolación del Inverso de la Distancia Ponderada
INCOPESCA	: Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura
INEC	: Instituto Nacional de Estadística y Censo
JAPDEVA	: Junta Administradora Portuaria de la Vertiente Atlántica
NSF	: Sanidad Nacional de Estados Unidos
MAG	: Ministerio de Agricultura y Ganadería
MINAE	: Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones
RANAS	: Red Ambiental Nacional en Agua y Saneamiento
RAS	: Recarga de Agua Subterránea
SENARA	: Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
SETENA	: Secretaria Técnica Nacional Ambiental
SIG	: Sistema de Información Geográfica
TRAGSA	: Empresa de Transformación Agraria, S.A.
UNA	: Universidad Nacional - Costa Rica
WQI	: Water Quality Index

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Caracterización del problema

El agua es un recurso natural clave para el desarrollo social y económico de América Latina y del Caribe. El acceso al agua mejorada y el saneamiento constituyen factores de peso para promover una mayor inclusión social y contribución en la reducción a la pobreza. De hecho, en esta región del mundo en particular, el combate contra la pobreza pasa tanto por una mejoría sustancial en la distribución del ingreso, como por un acceso más equitativo a los servicios ecosistémicos, entre ellos la provisión de agua, la no contaminación biológica de aguas y la regulación de caudales (Guerrero et al. 2006).

Según el informe de la CEPAL (2005), la mayor parte de los países de la región muestran algún progreso en el acceso de la población al agua potable, pero en cambio un débil avance en el tema del saneamiento. Es evidente que, en cualquier caso, se requerirán esfuerzos e inversiones sostenidas para alcanzar las metas del milenio. Esto pasa por el reconocimiento de que el agua es un bien público y que el acceso es un derecho de los pueblos.

The Worlds Water en su informe The Biennial Report on Freshwater Resources del 2002 – 2003, citado en el resumen ejecutivo (2004), coloca a Costa Rica como el tercer país, más rico en oferta hídrica de la región centroamericana, con 112,4 kilómetros cúbicos. A septiembre del 2002 el 98,2% del agua total utilizada en las diferentes actividades humanas es proveniente de aguas superficiales. Estadísticas del Ministerio de Salud demuestran que en los últimos años se ha visto un aumento en la incidencia de enfermedades relacionadas con el agua. El 24% de la población costarricense consume agua de calidad no potable que llega a sus hogares, debido a la ausencia de sistemas de acueductos de saneamiento ambiental.

De acuerdo a Foster et al. (2002), la vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas deberían ser concebidas interactivamente con la carga contaminante que es (será o podrá ser) aplicada en el ambiente superficial como resultado de una actividad humana, causando consecuentemente un peligro de contaminación. Afirma que la planificación del uso territorial depende en gran medida de los mapas de vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que constituyen una herramienta básica de reducción del

riesgo y para evitar en el futuro peligros de contaminación; igualmente, porque permite identificar las áreas vulnerables y prohibir actividades potencialmente peligrosas.

A nivel local, el problema general al cual hace referencia la investigación, es la ausencia de una gestión integral del recurso hídrico en el Cantón de Siquirres, en relación con la gobernabilidad socio-institucional del agua, al escaso conocimiento de la vulnerabilidad existente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, una vez dado el cambio en el uso del suelo y a la falta de instrumentos metodológicos que permitan establecer zonas de protección a las fuentes de captación de agua destinadas al consumo humano, como una condición previa e indispensable para mantener la calidad natural del agua y con el fin de proteger la salud de las generaciones presentes y venideras.

Lo anterior tiene que ver con el hecho de que las políticas de agua, a nivel nacional y cantonal, carecen de innovaciones sistémicas referentes a la utilización productiva y humana y de protección ambiental, indicando una indispensable reorientación hacia una gestión basada en el apoderamiento social de este recurso clave. Para abordar integralmente tales vacíos y amenazas y proponer medidas adaptativas de carácter correctivo y sobre todo, preventivo, se requiere entonces un replanteamiento analítico, técnico-científico y propositivo para el problema esbozado que se levanta sobre una visión multidimensional referente al quehacer local del manejo hídrico. Entonces, el propósito al que aspira el presente estudio es indagar sobre la institucionalidad y gobernabilidad del agua para que estas sean más coherentes con la meta de una gestión integrada del recurso hídrico en el Cantón de Siquirres, específicamente en el área de estudio.

Definitivamente es de mucha importancia que los actores locales de la subcuenca del río Siquirres estén conscientes sobre el peligro potencial pasivo de contaminación a la que está expuesta la fuente de abastecimiento de agua cruda destinado para consumo humano, debido a que solo de esta manera podrán actuar y tomar prontamente medidas de protección y de mitigación ante posibles actividades contaminantes. En ese sentido, el estudio propone medidas adaptativas al ambiente actual a través de zonas delimitadas y estimadas, debido a su nivel de vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, justificada bajo tres elementos de intervención (normativa legal vigente, análisis biofísico del grado de

vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas y las consideraciones y/o planteamientos sociales), con el único propósito de formar el escudo (zonas de protección) contra las contaminación puntual o difusa de la parte alta del río Siquirres.

1.2 Importancia y justificación de la investigación

El agua destinada para consumo humano debe satisfacer algunos requerimientos de calidad, y esto está íntimamente ligado al saneamiento global del medio. Por lo tanto, la conservación de la calidad del agua debe constituirse en una preocupación trascendental de las autoridades como las responsables primarias. Por ello, todas las fuentes de agua utilizadas para el abastecimiento público deben estar protegidas contra la contaminación microbiológica y química, a través de una delimitación territorial de zonas geográficas denominadas *zonas de protección aparente a la contaminación*, que eviten el vertido de sustancias contaminantes; el cambio de uso del suelo, así mismo controlar el desarrollo de cualquier actividad incompatible con el potencial biofísico que presentan las zonas a la contaminación.

Actualmente la presión demográfica sobre las fuentes de aguas superficiales y subterráneas de mayor importancia en Costa Rica, está causando una contaminación más rápida de lo normal, pues vasta revisar los informes publicados vía internet¹ por parte del Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), donde manifiestan que el nitrato encontrado en las aguas subterráneas del Valle Central se derivan de dos fuentes: 1) de los desechos humanos; y 2) de las áreas cultivadas de café con fertilizantes nitrogenados. También el estudio de Agüero et al. (2000), realizado en el Área Metropolitana del Valle Central, demostró la alta vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, debido a las condiciones actuales, principalmente el crecimiento urbano.

En el Cantón de Siquirres, las instituciones como el MAG, AyA y la organización de la sociedad civil, con el apoyo de la asesoría ambiental de la municipalidad de Siquirres, elaboraron una propuesta llamada *Proyecto subcuenca del río Siquirres*, donde manifiestan la necesidad de definir los instrumentos legales, técnicos y sociales para constituir el ordenamiento territorial de la subcuenca, debido a que esta, suministra el agua para consumo

¹ Disponible en: <http://www.una.ac.cr/hidrologia/proyectos.htm>

humano a aproximadamente el 63.8%² (21131 abonados, informe de AyA de Siquirres) de la población del distrito de Siquirres y un 100 % a los poblados de las comunidades de Guayacán, Moravia y el Coco. Entre los problemas que hacen mención las instituciones, que asumen en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres, sobresalen: 1) el fuerte impacto que sufren las nacientes y áreas de recarga por la expansión urbana; 2) la falta de un control en el uso del suelo (ordenamiento territorial); 3) evidencia fuerte de contaminación por vertidos de aguas negras y/o servidas; 4) contaminación de agroquímicos provenientes de las actividades agropecuaria; y 5) falta de coordinación interinstitucional entre la sociedad civil, instituciones del estado y gobierno municipal en abordar temas ambientales.

Entre las razones que justifican el análisis y establecimiento de las zonas de protección a la contaminación de las zonas I y II, sobresalen:

- ⇒ Obtener una estimación del grado de vulnerabilidad a la contaminación de las zonas I y II, respecto al ambiente existente.
- ⇒ Definir y/o delimitar zonas o perímetros de protección en zonas altamente vulnerables.
- ⇒ Conocer las amenazas de contaminación actual del río con respecto a su entorno, es decir ¿quiénes están provocando las mayores amenazas? ¿a qué se debe el grado de vulnerabilidad actual? ¿cuáles medidas y acciones actuales están conduciendo a una mayor vulnerabilidad? entre otros.
- ⇒ Tener una interpretación objetiva de relaciones causales que estiman la vulnerabilidad de aguas superficiales y subterráneas a la contaminación y de esa manera, establecer las acciones de mitigación (medidas adaptativas) más ajustadas a la protección y conservación del recurso hídrico de la parte alta de la subcuenca.

² El 63,8% corresponde a tres fuentes de información: 1) Dirección de Compras de Servicio de Salud (2006), que establecen una población total de 34789 del Distrito de Siquirres; 2) al Informe Técnico de AyA 2008 con 21131 abonados de la ciudad de Siquirres mas 701 en Madre de Dios, correspondiente a un total de 21832 abonadas por AyA; y 3) a fuentes de campo y registro de la ASADA Coco-Moravia con una población aproximada de 365. Población total del distrito (34789) y beneficiarios del agua del río Siquirres (21131 + 701 + 365 = 22197), correspondiente a un 63,8% de la población beneficiada de agua de consumo humano proveniente de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres.

- ⇒ Crear zonas o perímetros de protección a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, con el propósito de restringir todas las acciones y actividades que vayan a afectar en cantidad y calidad las aguas y a reducir cualquier posibilidad de contaminación por condiciones de uso y manejo de prácticas antrópicas no adecuadas a las condiciones biofísicas de la zona ubicada en la parte alta de la subcuenca.

- ⇒ Constituir medidas adaptativas a corto, mediano y largo plazo, con un concepto que aglutina los tres elementos de análisis (normativa vigente, análisis biofísico de vulnerabilidad a la contaminación y consideraciones y/o planteamientos sociales). Las que se convertirán en propuestas de mitigación para diseñar, planificar y ejecutar programas y proyectos de reducción al distanciamiento entre la vulnerabilidad nula y la actual.

Otras razones señaladas por Jiménez et al. (2004) son: 1) para fortalecer la capacidad de los gobiernos y organizaciones locales en abordar problemas de uso de la tierra y del manejo de las cuencas hidrográficas; 2) para servir de apoyo a la protección de cuencas hidrográficas críticas como a la restauración de sistemas ecológicos con el fin de mitigar los efectos de futuros desastres; 3) para la planificación, como una actividad fundamental en la reducción de desastres; 4) para promover procesos en el que todos los actores consideren la participación de las comunidades como sujetos activos de la gestión del riesgo, y así fortalecer el empoderamiento real y la autogestión comunitaria como una alternativa eficaz y eficiente en la reducción de la vulnerabilidad.

El resultado del presente estudio es un análisis de vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas resumido en las medidas adaptativas como las estrategias y acciones de mitigación a los problemas de contaminación actual de la zona I y II, valoradas en la parte alta del río Siquirres. Estas medidas adaptativas permitirán a los organismos reguladores del ambiente contar con elementos base para establecer programas y proyectos de protección a las zonas definidas, adaptables, en el tiempo y en el espacio; en segundo lugar será un instrumento de justificación para establecer procesos de gestión de recursos técnicos y económicos.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas destinadas al consumo humano, establecer zonas de protección aparente³ y proponer medidas adaptativas a corto, mediano y largo plazo para reducir el riesgo potencial de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres, provincia de Limón, Costa Rica.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la subcuenca del río Siquirres en sus aspectos biofísicos, socioeconómicos y legales, con énfasis en el recurso hídrico.
2. Delimitar, estimar y conceptualizar zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, en la parte alta de la subcuenca, con base a las características del recurso hídrico.
3. Analizar la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente.
4. Proponer medidas adaptativas a la vulnerabilidad a la contaminación, en la parte alta de la subcuenca, con fines de protección, administración y manejo adecuado del recurso hídrico.

1.4 Preguntas orientadoras

El estudio se ha guiado en función de las siguientes preguntas orientadoras

Objetivo 1:

- ⇒ ¿Cuál es la importancia de la caracterización física, biofísica y socioeconómica de la subcuenca del río Siquirres?

³ Aparente; el término se utiliza debido a que no existen estudios de casos que comprueben el éxito o fracaso de la eficiencia de crear las zonas bajo las metodologías empleadas.

- ⇒ ¿Cuál es la normativa vigente que establecen las áreas de protección y que regula la contaminación del recurso hídrico?
- ⇒ ¿Existe en el marco legal una institución rectora que establece las estrategias y directrices para constituir las áreas de protección?

Objetivo 2:

- ⇒ El establecimiento de zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas ¿De qué modo legitimará la no contaminación?
- ⇒ ¿Qué implica las zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas?
- ⇒ ¿Será crucial construir zonas de protección a la contaminación del recurso hídrico superficial y subterráneo para garantizar en un futuro la calidad de la misma?

Objetivo 3:

- ⇒ ¿Cuál es la relación entre los indicadores de la vulnerabilidad global a la contaminación actual (dinamismo antrópico actual) con los parámetros del índice de calidad del agua (ICA) en la parte alta de la subcuenca?
- ⇒ ¿En qué condiciones estará el gobierno municipal, las instituciones, comunitarios y la población urbana de Siquirres, en establecer acciones de protección al riesgo potencial de vulnerabilidad a la contaminación presente en la subcuenca?

Objetivo 4.

- ⇒ ¿Cuáles serían los elementos importantes a considerar para proponer medidas adaptativas en las zonas I y II?
- ⇒ ¿Será necesario proponer medidas adaptativas básicas (diligencias) y complementarias (planes y estrategias) a corto, mediano y largo plazo a las zonas I y II, para constituir un mecanismo de protección a la contaminación?
- ⇒ ¿Quiénes deberían promover la protección a la contaminación de las zonas I y II?
- ⇒ ¿Se podrá crear iniciativas de gestión y cogestión a partir del análisis de vulnerabilidad a la contaminación en las zonas establecidas?

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Conceptualización de vulnerabilidad y riesgo

2.1.1 Vulnerabilidad

Grado de daño o pérdida susceptible de experimentar por un elemento de bajo riesgo (personas, edificaciones, entre otros) resultados de la probable ocurrencia de un evento de una magnitud e intensidad dada (Jiménez 2002). Además, puede entenderse como aquel conjunto de condiciones a partir de las cuales una comunidad está o queda expuesta al peligro de resultar afectada por una amenaza, sea de tipo natural, antrópica o socio-natural. La vulnerabilidad entendida como debilidad frente a las amenazas y como la incapacidad de recuperación después de que ha ocurrido un desastre (Gomáriz 1999).

Vulnerabilidad como la incapacidad o debilidad de una comunidad de absorber mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse a ese cambio (Wilches-Chaux 1998). La OPS (1987) la define como la medida de la debilidad de un componente para resistir el impacto de las amenazas.

2.1.2 Vulnerabilidad global

Únicamente para efectos de estudios se divide la vulnerabilidad global en distintas *vulnerabilidades*. Sin embargo, es indispensable señalar que cada una de ellas constituye apenas un ángulo particular para analizar el fenómeno global y las diferentes *vulnerabilidades*, debido a que están estrechamente interconectadas entre sí. Es decir, difícilmente podríamos entender, por ejemplo, la vulnerabilidad física sin considerar una función de la vulnerabilidad económica y de la política, o esta última sin tomar en cuenta la vulnerabilidad social, cultural, etc. (Wilches-Chaux 1993). En definitiva la vulnerabilidad comprende una serie de ángulos desde los cuales puede ser vista, analizada y trabajada para fomentar un bienestar en las comunidades; a estos ángulos de análisis puede llamarseles factores o tipos de vulnerabilidades, los cuales no son más que actores responsables de conformar un nivel de vulnerabilidad para una comunidad (Wilches-Chaux 1993, 1998). Al conjunto de estos factores se les denomina vulnerabilidad global (Reyes 2003).

2.1.3 Análisis de vulnerabilidad

Proceso para determinar los componentes críticos, débiles o susceptibles de daños o interrupciones de edificaciones, instalaciones y las medidas de emergencia y mitigación a tomarse ante una amenaza específica o un grupo de ellas (Jiménez 2002). Es útil para evaluar el riesgo de contaminación asociada a las prácticas agrícolas que se realizan en una determinada región, desarrollar estrategias de protección de los recursos naturales (suelo y agua) y elaborar planes de monitoreo y control (Arumí et al. 2001).

Los estudios de vulnerabilidad estiman el grado de pérdida o daño que pueda causar la ocurrencia de un evento o fenómeno natural de determinada severidad. Los elementos analizados incluyen poblaciones, instalaciones y recursos físicos tales como centros de producción, lugares de reunión pública, patrimonio cultural, actividades económicas, entre otro (Auge 2004). De acuerdo a Jiménez (2007), existe una pregunta frecuente ¿por qué analizar la vulnerabilidad a nivel de la cuenca y no de otras unidades de gestión territorial? La respuesta es, porque la cuenca es un sistema o un todo, funcionalmente indivisible e interdependiente, conformada por las interrelaciones dinámicas en el tiempo y en el espacio de diferentes subsistemas, tanto social, económico, legal, cultural, institucional, productivo, biológico, físico y ambiental, en donde el agua actúa como el componente integrador desde la parte alta hasta la parte baja y costera marina de la cuenca.

En efecto, la cuenca como unidad hidrológica constituye un ámbito biofísico y socioeconómico para caracterizar, diagnosticar, planificar, y evaluar el uso de los recursos naturales, el análisis ambiental y el impacto global de las prácticas de manejo; en tanto la integración de todas las unidades bien manejadas, permitirá lograr el manejo integral de la cuenca, reduciendo su vulnerabilidad y su impacto. De lo contrario, una cuenca bajo actividades de deforestación, sobrepastoreo, quemas continuas, agricultura intensiva sin prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas, vertidos de contaminantes a las aguas de los ríos y riachuelos, aperturas de vías de comunicación, construcciones de viviendas en zonas vulnerables, entre otras, producen gran cantidad de efectos negativos como: erosión, deslizamientos, disminución de la capacidad hidráulica del drenaje natural, caudales picos que causan desbordamiento de los ríos e inundaciones severas, con posibles pérdidas de vidas

humanas. Además, deterioro de la calidad del agua, sequías en la parte baja, afectaciones en las zonas marinas costeras, alteración del ciclo hidrológico, entre otros problemas. Por lo tanto, resulta evidente que las cuencas constituyen las unidades naturales idóneas para analizar los tipos de vulnerabilidades y riesgos a desastres, principalmente cuando se trata de cuencas de importancia social como las que predominan en el país.

2.1.4 Riesgo

Medida de la probabilidad de impacto de una amenaza (OPS 2000). Puede ser definido como la posibilidad de que ocurra un evento indeseado, en este caso, que un contaminante de origen agropecuario filtre hasta un cuerpo de agua (Arumí et al. 2001). También es definido como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad (Jiménez 2002). El riesgo puede entenderse como el resultado de relacionar la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Jiménez 2007).

2.2 Conceptos básicos de cuenca hidrográfica e hidrológica

2.2.1 Cuenca hidrográfica

Desde el punto de vista geofísico, la cuenca hidrográfica se define como una unidad natural, cuyos límites físicos son definidos por la divisoria superficial de las aguas, también conocida como *parte aguas o línea divisoria*, que ante la ocurrencia de precipitaciones y la existencia de flujos o caudales base, permite configurar una red de drenaje superficial que canaliza las aguas hacia otro río, al mar, o a otros cuerpos de agua, como los lagos y embalses artificiales y naturales, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión en la zona de menor altitud. Sin embargo, el concepto integral (biofísico y socioeconómico) es mucho más complejo y se refiere a la unidad de gestión territorial definida fundamentalmente por la red de drenaje superficial, en la cual interacciona biofísica y socioeconómicamente el ser humano, los recursos naturales, los ecosistemas y el ambiente, con el agua como recurso que une e integra sistémicamente la cuenca (Jiménez 2007).

Según Ramakrishna (1997), una cuenca hidrográfica es un área natural donde el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. Es la unidad fisiográfica

conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o *divisoria de aguas* se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

La cuenca hidrográfica como sistema la conforman los componentes biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora, fauna) y antropocéntrico (socioeconómicos, culturales, institucionales), que están todos interrelacionados y en equilibrio entre sí, de tal manera que al afectar uno de ellos se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema.

2.2.2 Cuenca hidrológica

La definición de cuenca hidrológica es más integral que la de cuenca hidrográfica. Ya que son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuencas hidrográficas, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrológica subterránea del acuífero como un todo (Faustino 2007). Cuando la división de la cuenca hidrográfica es diferente de la división de la cuenca hidrológica, los flujos subsuperficiales y el movimiento del agua en el suelo se presenta de la siguiente manera (Figura 1).

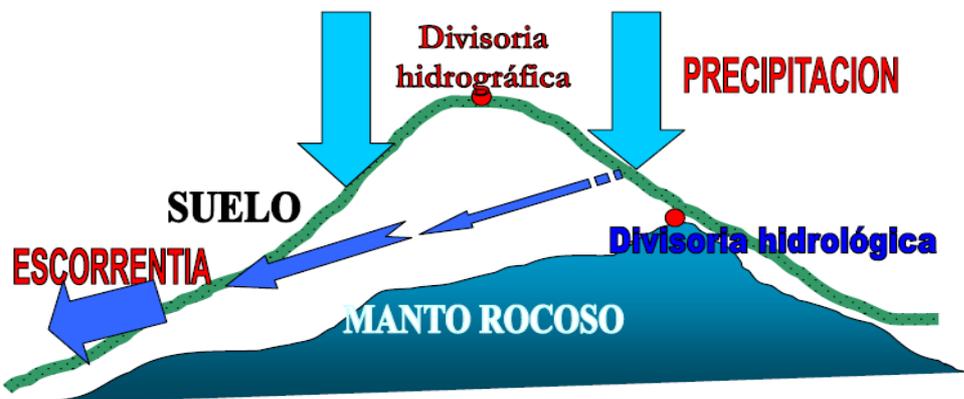


Figura 1. Divisoria de la cuenca hidrográfica y la cuenca hidrológica

Fuente: Faustino (2007)

2.2.3 La cuenca como unidad de planificación, manejo, gestión y cogestión de los recursos naturales

Jiménez (2007) plantea que el manejo de cuencas hidrográficas, es una unidad hidrológica como el escenario biofísico y socioeconómico natural y lógico para la

caracterización, diagnóstico, planificación, implementación, ejecución, seguimiento y evaluación del uso de los recursos naturales, así como para el análisis ambiental. Bajo este enfoque, las unidades de producción, por ejemplo la finca, son ámbito adecuado para implementar el manejo de los recursos, según la vocación de la cuenca, su capacidad de carga y la dinámica de su entorno ecológico y socioeconómico. Donde la integración de todas las unidades bien manejadas permitirá lograr articular el manejo adecuado de la cuenca.

Una pregunta frecuente es ¿por qué usar la cuenca como una unidad de planificación, manejo, gestión y cogestión de los recursos naturales y el ambiente, y no los límites políticos o administrativos ya establecidos? En principio, la respuesta es simplemente porque las cuencas son las formas geomorfológicamente superficiales y naturales de la tierra que captan y concentran la oferta hídrica que proviene de las precipitaciones y la cual se distribuye luego en diferentes flujos hídricos.

2.2.4 Gestión y cogestión de cuencas

Para Dourojeanni (1994), la *gestión* es un proceso donde el ser humano realiza un conjunto de acciones planificadas, coordinadas, organizadas y consensuadas, para administrar y manejar adecuadamente la unidad hidrológica, considerando su efecto y que la dinámica de dicho sistema, tienen diferentes connotaciones. En general el proceso en el cual se efectúa este conjunto de acciones ha sido catalogado como *acciones de gestión a nivel de cuencas* o simplemente *de gestión de cuencas*. Estas actividades de gestión tienen objetivos por lo cual reciben diferentes nombres. Entre los más conocidos son: 1) desarrollo de cuencas, desarrollo integrado de cuencas; 2) manejo de cuencas, ordenamiento de cuencas; 3) desarrollo de recursos hídricos, administración del agua; 4) protección y recuperación de cuencas.

Cogestión: es la gestión conjunta, compartida y colaborativa, mediante la cual, diferentes actores locales como productores, grupos organizados, gobiernos locales, empresa privada, organizaciones no gubernamentales, instituciones nacionales, organismos donantes y cooperantes integran esfuerzos, recursos, experiencias y conocimientos para desarrollar procesos dirigidos a lograr impactos favorables y de sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales y del ambiente en las cuencas hidrográficas, a corto, mediano y largo plazo (Jiménez 2007).

2.3 Vulnerabilidad de acuíferos

2.3.1 Conceptos y definiciones

En hidrogeología, el término *vulnerabilidad del acuífero* comenzó a utilizarse intuitivamente a partir de la década de los 70 en Francia y más ampliamente en los 80 (Foster e Hirata 1991). Inicialmente el término fue usado sin definición formal, aunque hacía referencia a la susceptibilidad del acuífero a ser afectado por la contaminación antrópica. Una definición generalizada y consistente es considerar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectada por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster et al. 2002).

Hasta la fecha, no existe consenso sobre el alcance del término; y en ese sentido existen dos corrientes: 1) la representada por aquellos investigadores que consideran a la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, entre otros), sin tener en cuenta la incidencia de las sustancias contaminantes; y en la otra orientación, 2) se agrupan los que si le otorgan, además del comportamiento del medio, trascendencia al tipo y carga del contaminante (Auge 2004).

El concepto de vulnerabilidad adoptado en la investigación, se maneja en el sentido de estimar la posibilidad de que un contaminante arrojado en la superficie del terreno producto de las actividades antropogénicas puede alcanzar el sistema acuífero y modificar su calidad. De acuerdo al planteamiento de Orozco et al. (2003), en la pregunta *¿qué es un acuífero?* lo describe como una formación geológica subterránea compuesta de grava, arena o piedra porosa, capaz de almacenar y rendir agua. Las condiciones geológicas e hidrológicas determinan su tipo y funcionamiento, por ejemplo, se espera que mientras mayor sea la porosidad de las rocas (variante entre 5 y 20%), según el tipo de roca, más agua produce el acuífero.

Custodio y Llamas (2001) define un *acuífero* o embalse subterráneo, como aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus

necesidades. Según Huguet (2005) esta definición, muy arraigada en la comunidad científico-técnica hidrogeológica, introduce un componente económico que confiere un carácter relativo al significado de acuífero. Pongamos por caso, aguas subterráneas de unos pocos litros por segundo, sería clasificada de una manera muy diferente en una región densamente poblada, que en una pequeña población de una región árida, haciéndose que la definición de acuífero trascienda los límites puramente geológicos e hidráulicos para adentrarse en el campo de lo político. Este carácter relativo del concepto de acuífero, puede plantear problemas (y de hecho los plantea) a la hora de planificar y gestionar los recursos hídricos debido a que por, ejemplo en el caso de un país como España, se dan circunstancias geológicas, climáticas, demográficas y económicas muy diversas entre sus regiones que hacen que una única definición política de acuífero pueda no ser válida u operativa para todo el territorio.

De igual manera, Faustino (2007) presenta una definición similar a Custodio y Llamas (2001), considerando a los acuíferos desde la perspectiva del aprovechamiento del agua por el hombre en cantidades económicamente viables a su extracción. Definiéndolo como: *los estratos de terrenos porosos que se encuentran llenos de agua, de tal forma que permiten extraer cantidades grandes de agua, de una forma que es rentable económicamente, normalmente los acuíferos se van recargando de forma natural con la precipitación que se infiltra en el suelo y en las rocas*⁴. Finalmente para Huguet (2005), se conoce como acuíferos a aquellas formaciones geológicas que, estando completamente saturadas de agua, son capaces de almacenar y transmitir cantidades importante de agua. Por lo tanto, los acuíferos se caracterizan por poseer una permeabilidad significativa así como por una extensión y espesor considerable.

Orozco et al. (2003) establecen algunos conceptos y definiciones tales como:

Zona de un acuífero: se pueden puntualizar tres zonas: 1) zona de alimentación o recarga (es aquella donde el agua de precipitación se infiltra); 2) zona de circulación (parte comprendida

⁴ *Roca*: agregado natural de partículas minerales (más bien cristales) unidas por fuerzas cohesivas potentes y permanentes. Se suele considerar roca si su resistencia a la compresión simple, sin drenaje, es mayor de 5 kg/cm². Las rocas se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias y metamórficas. Ígneas (granitos, pórfidos, sienita, diorita, gabro, diabasa, ofita, basalto, pumicita, entre otras); Sedimentarias (silíceas, areniscas, sedimentarias arcillosas, arcillitas, margas, cálcicas, calizas, dolomitas, entre otras); Metamórficas (ígneas, micacitas, pizarras, esquistos, cuarcitas, serpentinas, mármoles, entre otros).

entre la zona de alimentación y la zona de descarga); y 3) zona de descarga (zona donde el agua sale del acuífero).

En función de las características de las rocas un acuífero, se pueden clasificar en: 1) *acuífugo* del latín *fugere* = huir (no posee capacidad de circulación ni de retención del agua por presentar rocas con porosidad nula); 2) *acuicludo* del latín *claudere* = cerrar (consiste en aquellos estratos o formaciones porosas e impermeables que pueden almacenar agua, pero que no la transmiten); 3) *acuitardo* del latín *tardare* = retardar (son aquellas formaciones semipermeables que, conteniendo agua incluso en grandes cantidades, la transmite muy lentamente); y 4) *acuífero* del latín *aqua* = agua y *fero* = llevar (son aquellas formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua).

Nivel freático: cota o nivel de saturación del agua de un acuífero libre medido desde la superficie del suelo. Es el límite superior del agua subterránea. De igual forma, se define como el lugar geométrico de los niveles que alcanzan la superficie del agua en pozos de observación en libre comunicación con los vacíos del suelo *in situ*, donde la tensión del agua es nula respecto a la atmosférica. Se le conoce también, como superficie saturada, nivel de saturación, superficie piezométrica o superficie potenciométrica.

Nivel piezométrico: altura de la columna de agua que equilibra la presión del agua del acuífero en un punto determinado, está referido a una altitud determinada. En el caso de acuíferos libres coincide con el nivel freático y en los acuíferos confinados corresponde al nivel al que se eleva el agua al interior de una captación por efecto de la presión en el interior del acuífero.

Zona no saturada y saturada: la primera, corresponde al suelo ubicado sobre el nivel freático, en el cual existe aire en los poros y el agua se encuentra retenida por capilaridad; la segunda, al suelo ubicado bajo el nivel freático, donde sus poros están llenos de agua.

Condición artésiana: estado del agua subterránea confinada bajo condiciones de presión hidrostática, en el cual el nivel piezométrico sobresale de la superficie del terreno. Si una captación se encuentra bajo presión artésiana, esta descargará directamente sobre la superficie.

De acuerdo a Molinero (2005) los acuíferos: pueden ser analizados de acuerdo a; la presión hidrostática o hidráulica (clasificada en acuífero libre, confinado y semiconfinado); las características litológicas (detríticos y carbonatados); y el tipo de huecos⁵ (poroso, kárstico y fisurado).

2.3.2 Clasificación de los tipos de acuíferos

2.3.2.1 Tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico

Acuífero libre o no confinado: son aquellos en donde el nivel superior de saturación del agua se encuentra a presión atmosférica. A la superficie piezométrica de un acuífero libre se le denomina *superficie o nivel freático* (Huguet 2005). El acuífero libre, es también llamado freático y en ellos existe una superficie libre y real del agua encerrada, que está en contacto con el aire y a presión atmosférica. El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija, varían en función de las épocas secas o lluviosas y en el caso de una perforación, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real: superficie freática o piezométrica que coinciden (Sánchez et al. 2002). Según Faustino (2007) los valores de k' (conductividad hidráulica)⁶ de la zona no saturada son potencialmente iguales a los valores de k de la zona saturada.

Acuífero confinado: llamados cautivos, a presión o en carga. El agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupan totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente, por lo tanto, no existe zona no saturada. En el caso de una perforación (pozos), el nivel de agua asciende hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga (Huguet 2005). Para Villota (2002) es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límites superiores e inferiores son capas impermeables, en donde la presión del agua es mayor de la atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran tales acuíferos se le denomina confinada o artesisiana. Faustino (2007) el valor k' es casi nulo en relación con el valor de k .

⁵ Huecos: porosos, se desarrollan en rocas sedimentarias; los fracturados, se encuentran en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias cementadas y Kárstico, son aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas cuyos poros y fisuras han sido ensanchadas por acción disolvente del agua subterránea. Los kársticos acumulan agua en cavernas generadas por disolución de calcáreos.

⁶ *Coefficiente de permeabilidad (k)*: también llamado coeficiente de conductividad hidráulica, representa la velocidad promedio del flujo subterráneo a través del medio poroso saturado que compone al acuífero y sobre la cual influyen las propiedades del fluido, el tamaño de poros y granos del suelo, textura y su estructura o empaquetamiento.

Acuífero semiconfinado: es una formación permeable saturada de agua, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable, en la capa superior se encuentra la tabla de agua, cuya altura difiere de la carga piezométrica. El flujo vertical solo es posible si existe una diferencia de potencial entre ambos niveles (Villota 2002). Los valores k' de la capa semipermeable, son pequeños en relación al valor k del acuífero mismo (Faustino 2007).

Por último, se habla de *acuíferos colgados* (*perched aquifers*), para hacer referencia a la acumulación de agua subterránea de escasa continuidad lateral situado por encima del nivel freático principal. Conocido como *bolsas de agua*, que corresponden a alguno de los tres tipos de acuíferos citados anteriormente. Sin embargo, debido a sus pequeñas dimensiones es habitual clasificarlos por separados. Son frecuentes en formaciones geológicas detríticas (especialmente de origen aluvial y fluvial) en las que podemos encontrarnos con depósitos (lentejones) de materiales poco permeables (limos y arcillas) inmerso en un material granular de mayor permeabilidad.

2.3.2.2 Tipos de acuíferos desde el punto de vista geológico

De acuerdo a Huguet (2005) el flujo de las aguas subterráneas sucede, inevitablemente a través de formaciones geológicas. Por lo tanto, el conocimiento detallado de los materiales que conforman la corteza terrestre, no solo es importante, sino vital para el estudio hidrogeológico. El funcionamiento hidrogeológico puede llegar a ser muy diferente de unos sistemas geológicos a otros y, cada tipo de sistema o ambiente geológico presenta una serie de particularidades y características. Estas particularidades vienen determinados por aspectos litológicos, estructurales, geomorfológicos y estratificados complejos y difícil de explicar.

Desde el punto de vista más amplio se distinguen dos tipos de formaciones geológicas bien diferenciadas por sus características hidrogeológicas: 1) las formaciones de sedimentos no consolidados (*formations meubles*); y 2) las formaciones rocosas o consolidadas. Esta clasificación de los acuíferos desde el punto de vista geológicos no es incompatible (ni siquiera independiente) de la clasificación de los acuíferos desde el punto de vista hidráulico. Seguidamente, se describe brevemente las unidades pertenecientes a la subcuenca del río Siquirres desde la óptica geológica:

Unidad de lutitas⁷ carbonosas y areniscas⁸ (formación río Banano): de acuerdo a Cervantes (1989) la unidad está definida por una secuencia de lutitas carbonosas, intercaladas con escasos niveles de lumaquelas⁹ y areniscas de grano medio. Las lutitas carbonosas predominan en la base y poseen estratificación milimétrica a centimétrica. Las areniscas son de color gris y crema, con estratificación cruzada y laminación paralela, abundantes hacia el techo y se alternan con conglomerado¹⁰ fino, incluyen fragmentos de materia vegetal fosilizada en forma de carbón o sustituido por calcita¹¹. Afloran en la Quebrada Espavel y parte superior del río Pacuarito, y en el margen derecho del río Pacuare.

En las zonas donde aflora existe un cambio litológico que define dos facies sedimentarias¹²: 1) las lutitas carbonatadas se intercalan con niveles fosilíferos que contienen especímenes correspondientes a los gasterópodos y bivalvos del Plioceno al Reciente¹³, hacia el techo se intercalan areniscas líticas de color gris azulado, granos medios, lutitas muy restringidas y esporádicos de fragmentos de troncos fosilizados, siendo la estratificación centimétrica y decimétrica, con una exposición bien clara de la secuencia en la quebrada del río Pacuare; 2) donde las lutitas no son comunes predominan las areniscas de grano medio a grueso intercalado con conglomerados fino, de color gris verdoso en algunos casos crema, los cuales poseen estratificación cruzada hacia el piso y unos pocos niveles enriquecidos de material vegetal, siendo el contacto inferior discordante (non-conforme) con la unidad de lava alcalina y el superior transicional con unidad de conglomerado.

Los perfiles estratificados de esta unidad señalan un ambiente de sedimentación somero, con interdigitación de facies, posiblemente *Fans Deltas* (abanicos deltaicos¹⁴), con facies distales¹⁵

⁷ Lutitas: roca de carácter detrítico, la cual está integrada por partículas de tamaño, como mínimo de arena. Los detríticos no consolidados, son depósitos sedimentarios dominados por arenas, gravas, arcosas, areniscas, conglomerados, etc. La permeabilidad o, mejor dicho, las conductividades hidráulicas están entre son las más altas.

⁸ Lumaquelas (coquinas): acumulación de restos de conchas cementadas.

⁹ Arenisca: es una roca sedimentaria de tipo detrítico, de color variable, que contiene clastos de tamaño de arena. Después de la lutitas, es la roca sedimentaria más abundante y constituye cerca del 20% de ellas. Las areniscas figuran entre las rocas consolidadas más porosas, aunque ciertas cuarcitas sedimentarias pueden tener menos de 1% de espacios vacíos. Las rocas sedimentarias detríticas, están formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte, constituidas por conglomerados (tamaño grande) y areniscas (tamaño intermedio) y los limos y arcillas (tamaño pequeño).

¹⁰ Lumaquelas (coquinas): acumulación de restos de conchas cementadas.

¹¹ Conglomerados: rocas sedimentarias clásicas formadas por detritos (material de meteorización y fragmento rocosos de cualquier tipo) grandes o medianos, redondeados, de rocas unidos por cementos de calizas, silicios u otros y consolidados diagenéticamente.

¹² La calcita es un mineral del grupo de los Carbonatos, grupo V/B de la clasificación de Strunz. A veces se usa como sinónimo caliza, aunque es incorrecto pues ésta es una roca más que un mineral. Su nombre viene del latín *Calx*, que significa *cal viva*. Es el mineral más estable que existe de carbonato de calcio, frente a los otros dos polimorfos con la misma fórmula química aunque distinta estructura cristalina: el aragonito y la vaterita, más inestables y solubles.

¹³ Facies sedimentarias: conjunto de sedimentos que pueden ser definidos y separados por otros por su geometría, litología y estructura sedimentaria y fósiles asociados.

¹⁴ El Plio-Pleistoceno: es un término que se vuelve cada vez más de uso, para describir un largo y continuo correr de fechas de capas sedimentarias. Data del período de la frontera entre el Plioceno y Pleistoceno.

¹⁵ Los deltas son estructuras geológicas muy recientes, que finalizó hace unos 15000 años. Los sedimentos tienen una potencia relativamente importante, dada su edad, son depósitos generalmente poco compactos, en los que a menudo se combinan una baja capacidad de portante y una significada deformabilidad.

(lutitas carbonosas y areniscas que afloran al NE) y facies proximales (areniscas y conglomerados que afloran al SE del río Pacuare).

Unidad de conglomerado (formación Suretka): la unidad está constituida por una secuencia de conglomerados de gran espesor, intercalados con lentes de lutitas y areniscas poco consolidadas que sumando a la alteración hidrotermal y el fracturamiento producen caída de bloques y desprendimientos superficiales de las rocas. El conglomerado está conformado por clastos casi exclusivamente ígneos con un 80% de andesita¹⁶ y un 20% de basaltos¹⁷, pedernal¹⁸ y rocas intrusivas¹⁹. El diámetro de los clastos es variable, existiendo graduaciones tanto verticales como laterales con tres grupos de conglomerados: 1) conglomerados finos con diámetro máximo de 15 cm, mínimo 2 cm y promedio de 5 cm; 2) conglomerado medio con diámetro máximo de 40 cm, mínimo 3 cm y promedio de 15 cm; y 3) conglomerado grueso con diámetro máximo de 80 cm, mínimo de 8 cm y promedio de 30 cm, predominando el conglomerado medio en todo el nivel de la sección. La redondez de los clastos²⁰ es de buena a muy buena, la esfericidad de regular a buena y el soporte es por matriz de arena gruesa (Cervantes 1989; Cervantes et al. 1988).

El conglomerado de la unidad es de ambiente continental, depositado a través de la actividad aluvional, posiblemente de ríos entrelazados. La redondez de los clastos manifiesta un largo transporte y erosión de arco o promontorio de naturaleza volcánica. En esta unidad de conglomerado, se observan diferentes eventos producto de una variedad de actividades volcánicas, representada por depositación de vulcaneritas con varios flujos laháricos²¹ y colada de lavas, que se observa en la litoestratigrafía del área Siquirres (Anexo 1, 2). Los flujos laháricos están constituidos por bloques angulares que en su mayoría corresponden con andesitas²² de textura vesicular, con tamaño de bloques que oscilan entre 2 - 30 cm de

¹⁵ Distales: lugar alejado de la fuente de origen.

¹⁶ Andesita; rocas volcánicas oscuras, de grano fino; es el equivalente extrusivo de la diorita.

¹⁷ Basalto; es la variedad más común de roca volcánica. Se compone casi en su totalidad de silicatos oscuros de granos finos, sobre todo de feldespato, piroxeno, plagioclasas y magnetita.

¹⁸ Pedernal; variedad común criptocristalina masiva de cuarzo, de color mate y en general oscuro.

¹⁹ Rocas intrusivas; también, llamadas rocas plutónicas, se forman en las profundidades de la superficie de la tierra cuando el magma, o roca derretida asciende a través de una grieta o a una reamara subterránea dentro de la tierra.

²⁰ Clastos; rocas sedimentarias detrítica constituido por fragmento de rocas que sobrepasan los 2 mm, unidos por un segmento casi siempre calcáreos o silicio y entre los que se intercalan una matriz generalmente arenosa. Según el grado de redondez de los clastos se pueden clasificar en gravas (redondeados) y en guijarros (angulares).

²¹ Los laháres son flujos densos de sedimentos bastantes móviles y se generan al fluidizar el agua con los materiales volcánicos, especialmente piroclastos (cualquier fragmento sólido de material volcánico arrojado al aire durante una erupción). Los laháres son flujos de barro que se movilizan gran parte de material desde las laderas de los estratovolcanes y pueden generarse por la presencia de lagos cratéricos, pero también pueden desencadenarse por lluvias intensas e inclusive a partir de una erupción pequeña (Ortiz 1996).

²² Andesita: lava de acidez intermedia que contiene entre 52 y 60% de sílice.

diámetro, aflorando en los ríos Siquirres, Pacuare, Pacuarito y Cimarrones. Referente al río Siquirres aflora una colada de lava que se intercala claramente con el conglomerado, caracterizada como una andesita de textura Hemicristalina - Porfidica²³, fenocristales y de fábrica compacta, su espesor se estima que no supera los 15 m. Esta lava con características de un vulcanismo calcoalcalino, no han sido observadas en otras zonas, demostrando así una actividad volcánica no muy lejana.

Unidades de depósitos recientes: son rocas sedimentarias del cuaternario (aluviones y fluviolacustres recientes), constituido por arcillas densas color café, arcillas limos arenosos, arena arcillosas y ocasionalmente con lechos de guijarros o grava fina (Castillo 1993). Dentro de esta categoría se destacan los depósitos aluvionales, coluvio, depositado por disolución y deslizamientos. Abarca gran parte de la zona de estudio (subcuenca del río Siquirres), siendo los más característicos los depósitos aluvionales.

2.3.2.3 Tipos de acuíferos en formaciones rocosas (tipo de huecos)

La principal característica de este tipo de acuífero es que su permeabilidad es debida a porosidad secundaria, ya sea por fracturación, por disolución o por ambos motivos. Por lo tanto, estos acuíferos estarán constituidos por aquellas formaciones geológicas consolidadas, que en ausencia de fracturación significativa se clasifican como acuífugos. Sin embargo, cuando estas formaciones rocosas presentan un grado de fracturación y/o disolución importante constituyen acuíferos que pueden llegar a presentar permeabilidad altas a muy altas. Algunos ejemplos típicos de formaciones geológicas rocosas susceptibles de constituir acuíferos, son las formadas por calizas, dolomías, areniscas, granitos, basaltos, entre otras.

Dentro de los acuíferos en formaciones rocosas podemos distinguir dos tipos principales:

1. Acuíferos fisurados o fracturados: se constituyen en formaciones rocosas consolidadas cuya permeabilidad es debida al desarrollo de un sistema de fisuras o fracturas. Dentro de las formaciones geológicas susceptibles de formar acuíferos fisurados o fracturados se encuentran aquellas formaciones de rocas ígneas (ya sean plutónicas o volcánicas), metamórficas y

²³ Término texturales para aquellas rocas ígneas en las cuales los cristales más grandes (fenocristales) se distribuyen en una matriz cristalina o vídriosa, o ambas.

sedimentarias consolidadas (es decir, muy cementadas). Los acuíferos formados en este tipo de formaciones, son conocidos como acuíferos en rocas duras (*hard rock aquifers*).

2. *Acuíferos kárstico*: se forma en macizos rocosos que presentan un sistema kárstico bien desarrollado. Desde el punto de vista hidrogeológico, se conocen como acuíferos kárstico a aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas cuyos poros y fisuras han sido ensanchadas por la acción disolvente del agua subterránea. Las rocas susceptibles de sufrir procesos kárstico son principalmente las calizas, las dolomías, los yesos y en general las rocas evaporíticas (Custodio y Llamas 1983). Cabe señalar el hecho de que cuando se realizan explotaciones intensivas de aguas subterráneas en acuíferos kárstico se pueden inducir colapsos en la superficie del terreno, que pueden llegar a provocar daños en las estructuras existentes en superficie (obras de ingeniería civil y viviendas) (Huguet 2005).

2.3.3 Vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero

Se refiere a la susceptibilidad natural que presenta a la contaminación, y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero (Sánchez 2008). Para Custodio (1998) la vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición específica en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

Según Foster e Hirata (1988), la vulnerabilidad es primeramente una función de: 1) la inaccesibilidad de la zona saturada, en sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes y 2) a la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero, como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes.

Específicamente la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, es usada para representar las características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos, que estén fuera de las normas de utilización del agua. Dicha vulnerabilidad está en función de: 1) la inaccesibilidad de la zona saturada, sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes y 2) la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero, como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes. Donde la exactitud

de la evaluación de vulnerabilidad depende, de la cantidad y calidad de los datos (Foster y Hirata 1988).

El término **vulnerabilidad** es usada para identificar un conjunto de factores del complejo hidrogeológico que marcan la susceptibilidad de recibir y difundir un contaminante soluble o transportarlo en el agua; estos factores están relacionados a diferentes procesos naturales que pueden afectar el ciclo del contaminante, resultando en un patrón irregular de distribución.

2.3.4 Aguas subterráneas

De acuerdo a Faustino (2007), el agua subterránea es parte de la precipitación que se infiltra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua. El agua subterránea se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y eventualmente llegan a los arroyos, lagos, ríos y océanos.

El agua subterránea es importante por muchas razones: a) se usa para las industrias, los hogares y la agricultura; b) si se usa racionalmente, puede obtenerse de los acuíferos a través de pozos artesianos durante todo el año, y por tanto es una fuente de agua confiable; c) el agua subterránea casi siempre es más pura que las aguas superficiales porque las impurezas que tiene se destilan durante el proceso de infiltración; y d) puesto que puede accederse localmente al agua subterránea, es más barata que el agua que se importa de otros lugares. Finalmente las aguas constituyen una de las principales fuentes hídricas para el consumo humano, debido a que los reservorios subterráneos contienen un volumen de agua muy superior al disponible como agua dulce superficial.

2.4 Importancia de la calidad del agua

Cada vez la disponibilidad de agua para consumo humano es menor, debido al crecimiento poblacional, incrementos en consumo *per cápita*, la contaminación de fuentes de agua y en general, al manejo inadecuado de las cuencas hidrográficas (Radulovich 1997). Faustino (2007), refiere que aunque la cantidad de agua es constante, la calidad de la misma va disminuyendo rápidamente como consecuencia de la contaminación de las fuentes de agua, lo cual generaría estrés hídrico a nivel general en la mayoría de los países centroamericanos,

siendo más notorio en las ciudades capitales. La magnitud del problema de la contaminación es tal, que en muchos países es ya imposible solucionar el problema mediante dilución y que a largo plazo se prevé un descenso de los recursos alimentarios sostenibles (Ongley 1997).

Con el aumento de la población va implícito la cantidad de desechos generados, en el que los vertederos de basuras son focos posibles de contaminantes, al arrastrar la lluvia en forma superficial o filtrándose a través del suelo, ciertos elementos solubles que se incorporan a los recursos de agua existentes, y aún en mayor grado si entran directamente en contacto con aguas superficiales o subterráneas (Anónimo s.f). Lo establecido anteriormente posee relación con la escorrentía superficial, una forma de contaminación difusa o no localizada. La contaminación por fuentes no localizadas constituye significativamente con niveles altos de agentes patógenos en las masas de aguas superficiales, especialmente coliformes termotolerantes (Ongley 1997). En ese sentido, un suministro de agua para usos domésticos en cantidad y calidad suficiente contribuirá a reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por la vía fecal-oral (OMS 1998).

2.4.1 Calidad del agua

En el Decreto No. 32327 *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*, de Costa Rica publicado en la Gaceta No. 84, del 03 de mayo del 2005, Capítulo I, art. 2 establece definiciones concernientes a los rangos de valores en agua potable, tales como:

Valor máximo admisible (VMA) y valor recomendado (VR): el VMA, corresponde a aquella concentración de sustancia o densidad de bacterias a partir de la cual existe rechazo del agua por parte de los consumidores o surge un riesgo inaceptable para la salud. El sobrepasar estos valores implica la toma de acciones correctivas inmediatas. El VR es aquella concentración de sustancia o densidad de bacterias que implica un riesgo mínimo o aceptable para la salud de los consumidores del agua potable.

En el Capítulo I *De las disposiciones generales y definiciones*, art. 4 donde se establecen los requisitos básicos que debe contener el agua potable que suministran los entes operadores y en el Capítulo II *Del ámbito de aplicación*, art. 6 establece los cuatro niveles de control de calidad del agua:

Nivel primero (N1): es el programa de control básico junto con la inspección sanitaria, para evaluar la operación y mantenimiento en la fuente, el almacenamiento y la distribución del agua potable. Los parámetros en este nivel son: coliformes termotolerantes (fecales), *Escherichia coli*, color aparente, turbiedad, olor, sabor, temperatura, pH, conductividad, y cloro residual libre o combinado. Si la inspección sanitaria establece otros riesgos de contaminación, deberán adicionarse al programa de control básico, los parámetros necesarios.

Nivel segundo (N2): corresponde al programa de control básico ampliado (N1), el análisis de tendencias temporales de variaciones de calidad en las fuentes de abastecimiento, a ser aplicados en muestras de agua potable en la fuente, su almacenamiento y distribución. Los parámetros en esta etapa de control son todos los establecidos en el N1, ampliado con: dureza total, cloruro, fluoruro, nitrato, sulfato, aluminio, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, manganeso, zinc, cobre y plomo.

Nivel tercero (N3): corresponde al programa de control avanzado del agua potable. Comprende la ejecución de los parámetros del nivel N2 ampliados: nitrito, amonio, arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, antimonio, selenio y residuos de plaguicidas.

Nivel cuarto (N4): corresponde a programas ocasionales ejecutados por situaciones especiales, de emergencia o porque la inspección sanitaria identifica un riesgo inminente de contaminación del agua. Los parámetros a analizar según sea la situación identificada pueden ser: sólidos totales disueltos, sulfuro de hidrógeno, cianuros, sustancias orgánicas de significado para la salud, desinfectantes y subproductos de la desinfección.

2.4.2 Índice de calidad del agua

El índice de calidad del agua propuesto por Brown es una versión modificada del Water Quality Index (WQI) desarrollada por la fundación de *Sanidad Nacional de Estados Unidos (NSF)*, como un esfuerzo por idear un sistema que permita comparar la calidad del agua de ríos en varios lugares del país, se creó y diseño un índice estándar llamado WQI que en español se conoce como: *Índice de Calidad del Agua (ICA)*. Este índice fue establecido en 1970 y es ampliamente utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos

del mismo ríos con diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo es saludable o no, debido a que el ICA especifica la aptitud del cuerpo de agua respecto a los usos prioritarios que este pueda tener (SNET 2002).

Para desarrollar el ICA, la *NSF* seleccionó a 142 personas que participaron en el proceso, quienes representaron un amplio rango a nivel local, estatal y nacional en los estados Unidos. A continuación se describe el proceso llevado a cabo para el desarrollo del ICA:

a) La identificación de factores claves (parámetros biológicos, químicos o físicos) que pueden utilizarse como indicadores de la calidad del agua; fueron basados en el criterio profesional colectivo de personas con conocimientos relativos al medio acuático o al foco de contaminación. Mediante una serie de cuestionarios, a cada panelista se le preguntó que consideraran 35 parámetros de calidad del agua para una posible inclusión en dicho índice. Este número finalmente se redujo a 9 parámetros.

b) Asignación de los pesos relativos del parámetro (w_i) correspondientes a los factores de contaminación: en esta fase se corre el riesgo de introducir cierto grado de subjetividad en la evaluación, pero por otro lado sugiere que es importante una asignación racional y unificada de dichos pesos de acuerdo al uso del agua y de la importancia de los parámetros en relación al riesgo que implique el aumento o disminución de su concentración. En el caso de asignaciones de los pesos relativos se identifican cuatro fases: 1) el panel de expertos procede a la generación de las ideas que determinan los pesos relativos, escribiéndolas en un papel; 2) recolección de las ideas generadas por los participantes en un gráfico, mediante una discusión en serie; 3) discusión de cada idea recogida por el grupo con el fin de proceder a su clarificación y evaluación; finalmente 4) una votación independiente sobre la prioridad de las ideas, es decir los pesos relativos, donde la decisión del grupo se determina mediante orientación matemática, con índices como lo son las curvas funcionales.

Los Cuadro 1 y 2 presentan las normas de los parámetros físicos y químicos de la calidad del agua para Costa Rica y Centroamérica.

Cuadro 1. Norma de calidad del agua potable para Costa Rica

Parámetros	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Coliformes fecales	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
pH	Valor pH	6.5	8.5
DBO ₅	mg/L	Sd	Sd
Nitrato	NO ₃ mg/L	25	50
Fosfato	PO ₄ mg/L	Sd	Sd
Temperatura	°C	18	30
Turbidez	UNT	<1	5b
Sólidos disueltos totales	mg/L	Sd	1000
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	Sd	Sd
Sd = sin dato			

Fuente: Decreto No. 32327, Reglamento para la calidad del agua potable

Cuadro 2. Norma de calidad de agua para consumo humano para Centroamérica

Parámetros	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Coliformes fecales	NMP/100 mL o UFC/100 mL	Ausente	Ausente
pH	Valor pH	6.5 – 8.5	≤ 8.5
DBO ₅	mg/L	≤ 2	2.5 - 4
Nitrato	NO ₃ mg/L	≤ 5	≤ 10
Fosfato	PO ₄ mg/L	≤ 0.01	≤ 5
Temperatura	°C	18 - 30	≤ 30
Turbidez	UNT	≤ 1	≤ 3
Sólidos disueltos totales	mg/L	≤ 300	≤ 1000
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	≥ 5	≤ 4

Fuente: CAPRE 1994

Mitchell et al. (1991) argumentan que es necesario realizar pruebas de los nueve parámetros antes mencionados para determinar la presencia de sustancias en las aguas, de igual forma describe los nueve parámetros antes mencionados.

Coliformes fecales o termotolerantes: son los microorganismos coliformes capaces de fermentar la lactosa a 45 °C (OMS 1998). Comprende todos los bacilos Gram-negativos, aeróbicos o anaeróbicos facultativos no esporulados que en la técnica de filtración por membrana, producen colonias de color azul dentro de un periodo de 22 a 26 horas cuando se incuban en un medio de cultivos específicos para coliformes fecales de $44.5 \pm 0,2$ °C dentro de 24 ± 2 horas (OPS, 1999). Respecto a los *coliformes totales*; son bacterias Gram-negativas, bastante heterogéneas. Incluye bacterias fermentadoras de la lactosa como *Enterobacter cloacae* y *Citrobacter freundii*, que pueden estar en heces como en el ambiente (aguas ricas en nutrientes, suelo, material vegetativo en descomposición) (OMS 1998).

pH: es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución, indica la concentración de hidrogeniones de una disolución o la concentración de iones o cationes hidrógeno $[H^+]$ presentes en una determinada sustancia. Típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones menores a 7, y básicas las que tienen pH mayores a 7, y $pH = 7$ indica la neutralidad de la disolución (siendo el disolvente agua). Mitchell et al. (1991) la medida del pH constituye un parámetro de importancia para la descripción de los sistemas biológicos y químicos de las aguas naturales.

DBO₅: representa la materia orgánica biodegradable. Es la más usada para determinar la eficiencia de los tratamientos que se aplican a los líquidos residuales. Se da cuando ciertas sustancias presentes en las aguas residuales, al verterse a un curso de agua, captan el oxígeno existente debido a la presencia de sustancias químicas reductoras. Es una medida de la estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral como el hierro, nitrito, amoníaco, cloruro, y otros (Mitchell et al. 1991).

Nitrógeno: está en forma de nitrato y nitrito, son los compuestos que llegan al agua mediante precipitación, escorrentía y por afluentes de industrias alimenticias, aguas residuales domésticas y agrícolas. Las fuentes de nitratos se obtienen de aguas de desechos con un mal tratamiento de drenaje y sistemas sépticos en mal funcionamiento (Mitchell et al. 1991).

Fosfato: el fosfato orgánico es parte de las plantas y los animales que se adhieren a la materia orgánica, siendo los responsables de la presencia de algas y plantas acuáticas grandes. El exceso de fosfato ocasiona el proceso de eutrofización (enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema). El arrastre de tierras cultivadas con compuesto a base de fósforo, y los vertidos de aguas servidas domésticas son la base del fosfato en los ríos (Mitchell et al. 1991).

Temperatura: considerado un requisito para el pH y la conductividad. Es una medición importante para interpretar los rangos de solubilidad de los parámetros químicos, debido a que influye con las tasas de actividad química y biológica. Afecta la tasa de transferencia de oxígeno y por consiguiente el valor del oxígeno saturado, ya que al incrementar la temperatura la solubilidad del oxígeno disuelto disminuye. El aumento de la temperatura puede producir malos olores debido a un aumento en la transferencia de gases, aumentando así la

reproducción de ciertas especies vegetales y animales y acelerando los procesos metabólicos que pueden llegar a cambiar las especies de un río, debido a la intolerancia que muestran ciertas especies a la variación de la temperatura. (Mitchell et al. 1991).

Turbidez: es un estimador de los sólidos en suspensión. Se aplica a aguas que contienen materia en suspensión tal que interfiere con el paso de la luz a través del agua. A mayor penetración de la luz solar en la columna de agua, menor será la cantidad de sólidos o partículas en suspensión y viceversa. Tiene una relación con el uso actual del suelo, tipos de suelos predominante, cobertura vegetal, entre otros (Mitchell et al. 1991).

Sólidos disueltos totales: es un indicador de las sales disueltas en una muestra de agua después de la remoción de sólidos suspendidos; se define como la cantidad de residuos remanentes después que la evaporación del agua ocurre. Es común observarlos en terrenos agrícolas que han sufrido procesos fuertes de escorrentía (Mitchell et al. 1991).

Oxígeno disuelto: es uno de los parámetros más relevantes a la hora de evaluar la calidad del agua debido a que se asocia a la contaminación orgánica. Tiene una relación directa con las concentraciones de temperatura y salinidad debido a que aumenta su concentración al disminuir estos dos parámetros. Además posee una relación directa con la pendiente y la aireación del cauce. En condiciones aeróbicas se produce una mineralización que consume oxígeno y produce gas carbónico, nitrato y fosfato. Una vez consumido todo el oxígeno presente se inicia la descomposición anaeróbica que produce metano, amonio, sulfuro de hidrógeno, entre otros gases (Mitchell et al. 1991).

De manera general, el Cuadro 3 expone las ecuaciones de agregación matemática que comúnmente corresponden a una función promedio para estimar índices de calidad de agua.

Cuadro 3. Formulas de agregación matemática para estimas ICA

Método	Fórmula
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio aritmético ponderado	$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n q_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$
Promedio geométrico no ponderado	$ICA = (\prod_{i=1}^n q_i)^{1/n}$
Promedio geométrico ponderado	$ICA = (\prod_{i=1}^n q_i^{w_i})^{1/\sum w_i}$
Subíndice mínimo	$ICA = \min (q_1, q_2, \dots, q_n)$

Subíndice máximo	ICA = máx. (q ₁ , q ₂ , ... q _n)
Promedio no ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2$
Promedio ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$

2.4.3 Contaminantes de fuentes de aguas

La contaminación, es la generación de residuos en un medio, que se introducen por encima de la capacidad, de este. La proliferación de estos residuos supone un desequilibrio grave en el biosistema, hasta el punto de llegar a imposibilitar la vida de las especies existentes. El agua, el aire y el suelo, son los principales medios contaminados. De igual manera, el agua es considerada como contaminada cuando sus características naturales están alteradas de tal modo que la hace total o inadecuada para el uso al que es destinada. El Cuadro 4 expone fuentes contaminantes y de contaminación asociadas (Foster et al. 2002).

Cuadro 4. Contaminantes comunes del agua y fuentes de contaminación asociadas

FUENTES DE CONTAMINANTES	TIPOS DE CONTAMINANTES
Actividades agrícolas	Nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales
Gasolinera y garajes	Hidrocarburos, bencenos, fenoles, hidrocarburos halogenados
Disposición de residuos sólidos	Amonio, salinidad, hidrocarburos halogenados, metales pesados
Industrias metalúrgicas	Tricloroetileno, tetracloroetileno, hidrocarburos halogenados, feNo.les, metales pesados, cianuros
Pinturas y esmaltes	Alcalobenceno, hidrocarburos halogenados, metales, hidrocarburos aromáticos, tetracloroetileno.
Industria maderera	Pentaclorofenol, hidrocarburos aromáticos y halogenados.
Tintorerías	Tricloroetileno, tetracloroetileno
Manufactura de pesticidas	Hidrocarburos halogenados, fenoles, arsénicos
Disposición de lodos residuales domésticos	Nitrato, Hidrocarburos halogenados, plomo, cinc
Curtidurías	Cromo, Hidrocarburos halogenados, fenoles
Explosión/extracción de gas y petróleo	Salinidad (cloruro de sodio), Hidrocarburos aromáticos
Minas de carbón y de metales	Acidez, metales pesados, hierro, sulfatos

En el Cuadro 4 se presenta un resumen de los tipos más comunes de actividades capaces de ocasionar contaminación de las fuentes de aguas subterráneas y los componentes contaminantes encontrados con mayor frecuencia. Es importante reconocer que estos difieren poco de los que generalmente contaminan las aguas superficiales, consecuencia de los diferentes controles que gobiernan la movilidad y persistencia de los contaminantes en los respectivos sistemas hídricos.

Seguidamente se muestra las fuentes de contaminantes para agua subterránea. Las Figuras 2, 3 y 4 ilustran los agentes de vulnerabilidad de un acuífero, que dependen de factores físicos, sociales, organizativos, entre otros, se hace alusión a la vulnerabilidad física para comprender mejor la contaminación de los acuíferos (Faustino 2007).

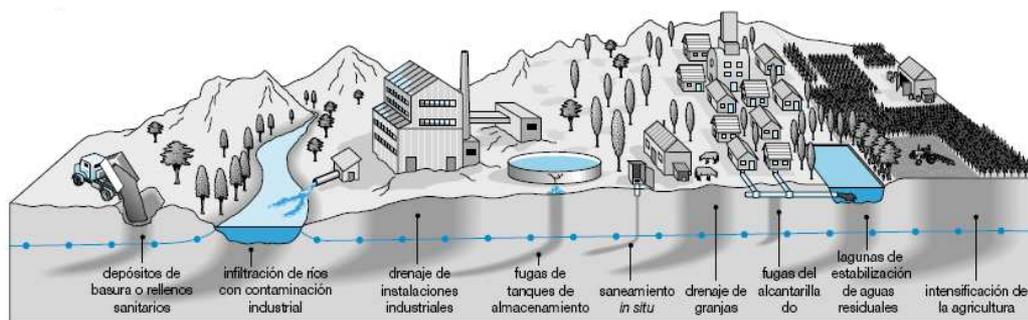


Figura 2. Procesos comunes de contaminación de aguas subterráneas

Fuente: Foster (2002)



Figura 3. Contaminación por viviendas

Fuente: capacitación gestión de recursos hídricos Proyecto FORGAES

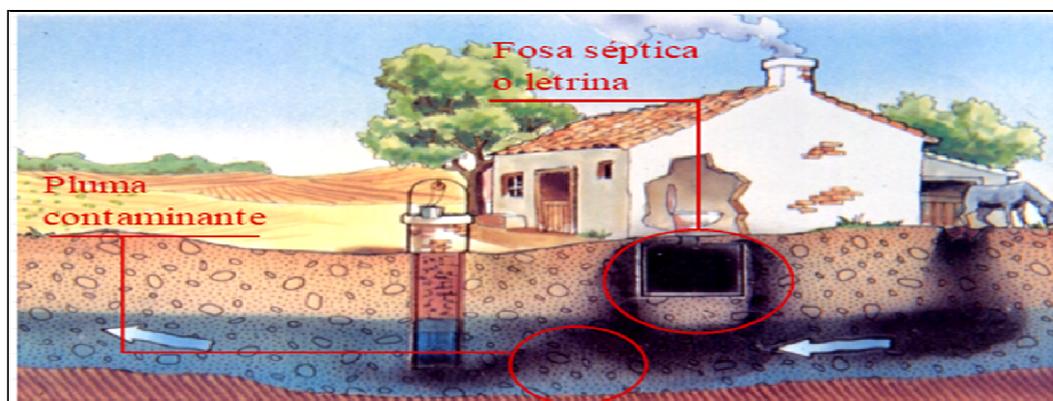


Figura 4. Contaminación física por fosa séptica

Fuente: capacitación gestión de recursos hídricos Proyecto FORGAES

Par

a la gestión de riesgo es esencial lograr reducir la vulnerabilidad y para ello es necesario, entre otras acciones, planificar y gestionar el uso del suelo, alcanzar un manejo integrado de los recursos naturales dentro de las cuencas hidrográficas, la educación ambiental, la participación comunitaria, todo lo anterior unido a un marco institucional bien estructurado, no solo bajo una planificación de políticas, programas y proyectos de desarrollo coherentes al ámbito local, sino también bajo la posibilidad de poner en práctica medidas de reducción de la vulnerabilidad (Buch 2001).

2.4.4 Contaminación agrícola

Las prácticas agrícolas siempre ejercen una gran influencia sobre la calidad del agua superficial y subterránea y pueden causar problemas serios bajo ciertas circunstancias. Su influencia es grande porque normalmente se realiza sobre áreas de recarga de acuíferos (Faustino 2007).

La diferencia esencial entre otras fuentes de contaminantes y la de prácticas agrícolas es que estas son fuentes no puntuales. Los contaminantes potenciales son: los residuos y líquidos y toda la gama de diferentes compuestos químicos, aplicados a las cosechas. Entre estos se encuentran los pesticidas y los compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, de nitrógeno, fósforo y potasio, todos ellos presentes en fertilizantes comerciales (FAO 1981).

La FAO (1981) distingue dos tipos de procesos contaminantes de aguas superficiales y subterráneas: los puntuales que afectan a zonas muy localizadas; y los difusos que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal. Entre las actividades que suelen provocar contaminación puntual, se mencionan: 1) lixiviado de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno; 2) lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolinera con fugas; y 3) los pozos sépticos y acumulación de purines procedentes de granjas. La contaminación difusa suele ser provocada por: 1) uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales; 2) explotación excesiva de los acuíferos que facilitan que las aguas salinas invadan las zonas de agua dulce, por desplazamiento de la interface entre los dos tipos de aguas.

2.5 Recarga hídrica

Es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. Es equivalente a la infiltración eficaz (Custodio y Llamas 2001). De acuerdo a Faustino (2006), se define como la superficie de una cuenca hidrográfica apta para recibir, almacenar y conducir el flujo de agua proveniente de las precipitaciones pluviales hasta los horizontes acuíferos subterráneos. El valor estratégico de estas, se identifica por el agua de saturación que es extraída eventualmente por el hombre, para sus diferentes actividades productivas

Según Faustino (2006), de acuerdo al movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en:

a) Zonas de recarga hídrica superficial: prácticamente es toda la cuenca hidrográfica, excluyendo las zonas totalmente impermeables, está es la que se humedece después de cada lluvia, originando escorrentía superficial, según las condiciones de drenaje (relieve del suelo y su saturación). La medición de este caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.

b) Zonas de recarga hídrica subsuperficial: corresponde a las zonas de la cuenca con suelos con capacidad de retención de agua o almacenamiento superficial sobre una capa impermeable que permite que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, también dependen de la cantidad de precipitación y el efecto esponja del suelo (libera lentamente el agua en su movimiento horizontal). Este caudal se mide igual que en el anterior caso y puede ocurrir después de las lluvias y en épocas secas, cuando el agua proveniente es de bosques. En esta evaluación, cuando se determina la infiltración en el movimiento del agua en el suelo o subsuelo, el flujo horizontal corresponde a esta zona de recarga y el flujo vertical corresponde a la escorrentía subterránea.

c) Zonas de recarga hídrica subterránea: es la que corresponde a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos, y rocas permeables) en el cual el flujo vertical de la infiltración es

significativa, esta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca). Para la evaluación se pueden considerar dos métodos: directo (mediante sondeos, bombeos y prospección geofísica), indirecto (mediante el balance hidrogeológico). Corresponde a zonas de la cuenca que presentan fallas geológicas profundas o cuando en el balance hidrogeológico se identifica una pérdida por percolación profunda.

Las áreas de mayor recarga son las que más nos interesa conservar y/o proteger, tanto en sus características físicas de permeabilidad, que afectan la magnitud de la recarga como en actividades que produzcan contaminación que fácilmente se puedan infiltrar al acuífero afectando la calidad de sus aguas. Debido a que gran parte de la precipitación es de origen orogénico, las montañas y zonas altas, principalmente si su suelo y subsuelo son permeables, debido a su mayor constancia de precipitación, son por lo general áreas de recargas importantes (Losilla 1986).

2.6 Recarga artificial

La recarga artificial de los acuíferos data por lo menos, de la época en que se comenzó a regar el agua sobre el terreno, siendo el volumen de agua excesivo en relación a las necesidades de las plantas, una parte no despreciable de aquel que se infiltraba en el acuífero, provocando una recarga no natural del mismo. La recarga artificial está condicionada primordialmente por las características del terreno que permitan tal operación (conductividad hidráulica, permeabilidad, porosidad, textura, estructura), por lo tanto, todas aquellas actividades que tiendan a disminuir la permeabilidad del terreno en las inmediaciones de las obras de inyección tendrán una influencia negativa sobre el resultado de la recarga. Así mismo, las características de los acuíferos influyen en su recarga artificial, ya que un acuífero poco permeable dificulta tal actividad, de modo que solo se les pueden inyectar pequeños caudales y no se consigue extraer más que pequeños volúmenes de agua, aún a pesar de que el volumen almacenado sea grande (Pierre 1971).

2.7 Método GOD

El método GOD (por sus siglas en inglés: *Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table*; según la versión en español de los manuales del CEPIS-OPS) para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido ampliamente probado en América Latina y el Caribe durante la época de los 90. En el método se consideran dos componentes o factores básicos: 1) el grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada a ser alcanzado por un contaminante; y 2) la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada del acuífero, por retención física y reacción química con los contaminantes. El Cuadro 5 detalla los componentes de vulnerabilidad referidos anteriormente (Foster et al. 2002).

Cuadro 5. Factores hidrogeológicos que controlan la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

Componentes de la vulnerabilidad	Información hidrogeológicas	
	Idealmente requerido	Normalmente disponible
Inaccesibilidad hidráulica	Grado de confinamiento del acuífero	Tipo de acuífero
	Profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero	Profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero confinado
	Contenido de humedad de la zona no saturada	
	Conductividad hidráulica vertical de los estratos de la zona no saturada o de las capas confinantes	
Capacidad de atenuación	Distribución del tamaño de granos y fisuras en la zona no saturada o en las capas confinantes	Grado de consolidación / fisuración de los estratos
	Mineralogía de los estratos de la zona no saturada o capas confinantes	Características litológicas de los estratos

Fuente: Foster (2002)

Foster e Hirata (1988) caracterizan la vulnerabilidad a la contaminación de acuífero en función de los siguientes parámetros (generalmente disponibles o fácilmente determinados), en: **G** (grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración) * **O** (ocurrencia del sustrato suprayacente en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes) * **D** (distancia al agua determinada como; la profundidad del nivel de agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados).

En el esquema de la Figura 4 se muestra el procedimiento original para calcular el método GOD a través de la multiplicación de tres parámetros o factores. Consecutivamente en el Cuadro 6 se presenta una definición general correspondiente a las clases de vulnerabilidad a la

contaminación de acuíferos una vez determinado el índice de vulnerabilidad en cada zona del acuífero.

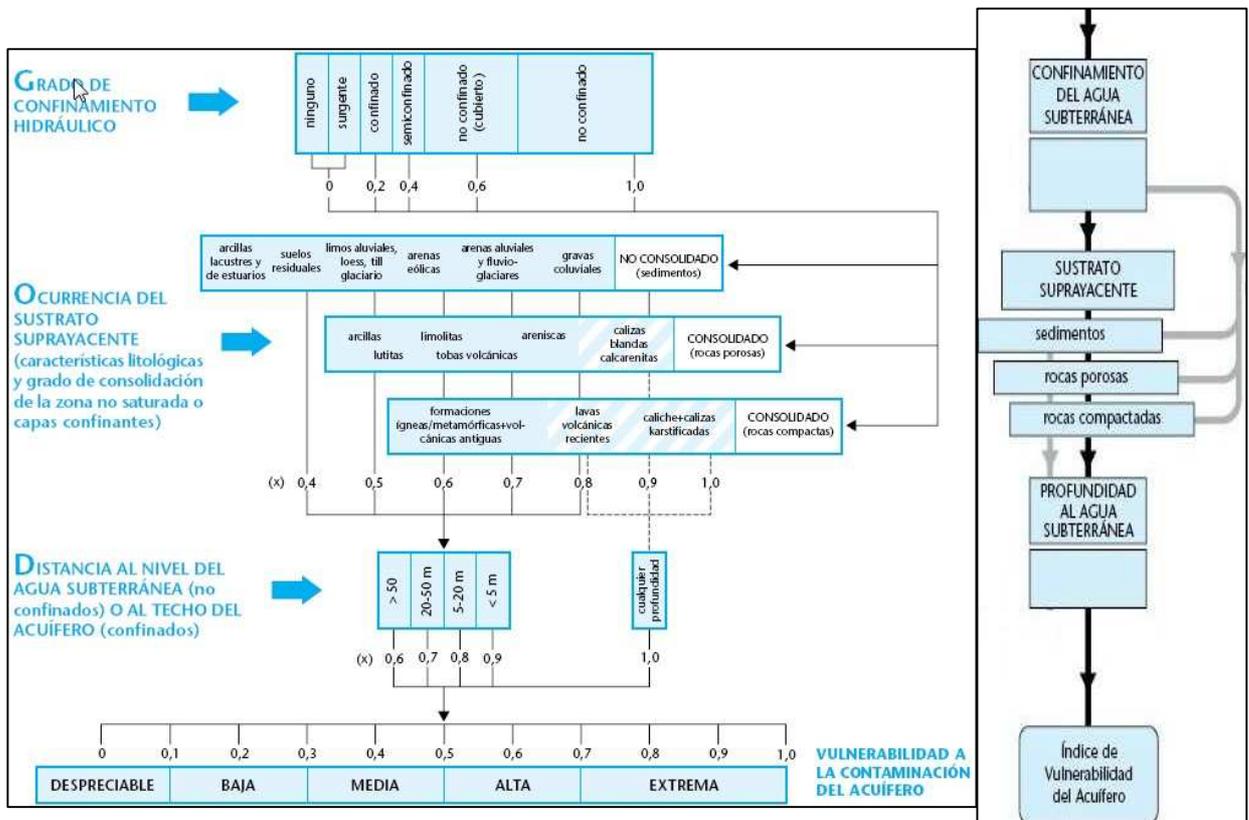


Figura 5. Modelo GOD Foster (1987)

Fuente: Foster et al. (2002)

Cuadro 6. Clases de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

Clase de vulnerabilidad	Definición correspondiente
Extrema	Acuífero vulnerable a la mayoría de los contaminantes y con un impacto relativamente rápido. IV = [0,7 a 1,0]
Alta	Vulnerabilidad a muchos contaminantes (los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación (se refiere a productos agroquímicos bajo riego y desechos sólidos y líquidos) IV = [0,5 a 0,7]
Media	Vulnerabilidad a algunos contaminantes solo cuando son contenidos, descargados o lixiviados. IV = [0,3 a 0,5]
Baja	Solo vulnerables a contaminantes que son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo. IV = [0,1 a 0,3]
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante. IV = [0 a 0,1]

Fuente: Foster et al. (2002)

La estimación del índice de vulnerabilidad GOD, Foster e Hirata (1991) involucra una serie de etapas concretas tales como: 1) identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro que va en una escala de 0,0 - 1; 2) especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos del: (a) grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras); (b) tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro que va de 0,4 - 1; y 3) estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidades al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0,6 - 1. Finalmente se multiplican los factores para obtener el índice GOD.

2.7.1 Mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuífero

De acuerdo a Foster et al. (2002) el mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es adecuado solamente en los casos que se requiera la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea relacionado a descarga de contaminantes que ocurren en la superficie del terreno y cuerpos de agua. Y no debería ser usado para la evaluación de peligros provocado por: 1) descargas mas profundas de contaminantes directamente debajo de la superficie del terreno (como en el caso de grandes tanques de almacenamiento enterrados, lixiviados de rellenos sanitarios, descargas de afluentes a canteras y pozos minerales, entre otros); y 2) derrames de contaminantes orgánicos sintéticos. Debido a que en ambos casos el peligro de contaminación del agua subterránea resultará alto.

Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad con la metodología propuesta, se podrá contar, en la mayoría de los casos, con mapas hidrogeológicos y/o informes sobre los recursos hídricos subterráneas, los cuales generalmente contienen adecuada información básica. Sin embargo, frecuentemente es necesario complementar esta información con estudios directo de mapas geológicos y registros de perfiles de perforaciones y en algunas ocasiones con inspecciones limitadas de campo. Se debe hacer referencia que los mapas de vulnerabilidad y peligros de contaminación de acuíferos están diseñados para proveer un esquema general en el que se basará la política de protección del agua subterránea. La Figura 6 sintetiza el mapeo de

vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos por el método GOD a través de los tipos mapas elaborados en SIG.

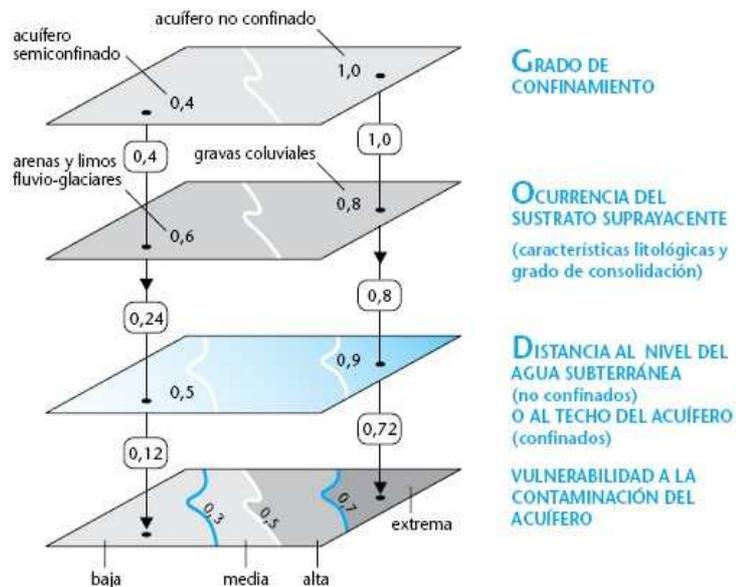


Figura 6. Esquema para general el mapa GOD

Fuente: Foster et al. (2002)

2.7.2 Mapeo de líneas equipotenciales o isopiezas

De acuerdo a Sánchez (2008), el mapa de líneas equipotenciales o isopiezas refleja iguales cotas de superficie freática o superficie piezométrica (presión hidráulica), según se trate de un acuífero libre o confinado, igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno. Estos mapas permiten: conocer el sentido del flujo de agua subterránea; diferenciar áreas de recarga y descarga; identificar divisiones hidrogeológicas; manifestar relaciones río-acuíferos; mostrar diferencias de parámetros hidrodinámicos; y dibujar las direcciones de flujo de aguas subterráneas (perpendicular a las isopiezas). Generalmente en el mapa de isopiezas no se dibujan líneas de flujo para conseguir una red, solamente se representan algunas líneas con el objetivo de proporcionar una indicación visual de las direcciones predominantes del flujo.

Durante el trazado de las isopiezas de un acuífero o sector del acuífero se requiere, en primer lugar, de dos particularidades: 1) que los valores de nivel (freática o piezométrica) medidos correspondan a un mismo acuífero; y 2) que estén expresados en cotas absolutas (msnm). Una

vez comprobado el requisito 1) y realizado la transformación 2), la determinación del lugar por la cual pasan las isopiezas se realizan mediante interpolación geométrica muchas veces utilizando el programa SIG. La Figura 7 representa la relación entre las direcciones de flujo del acuífero y las líneas isopiezas.

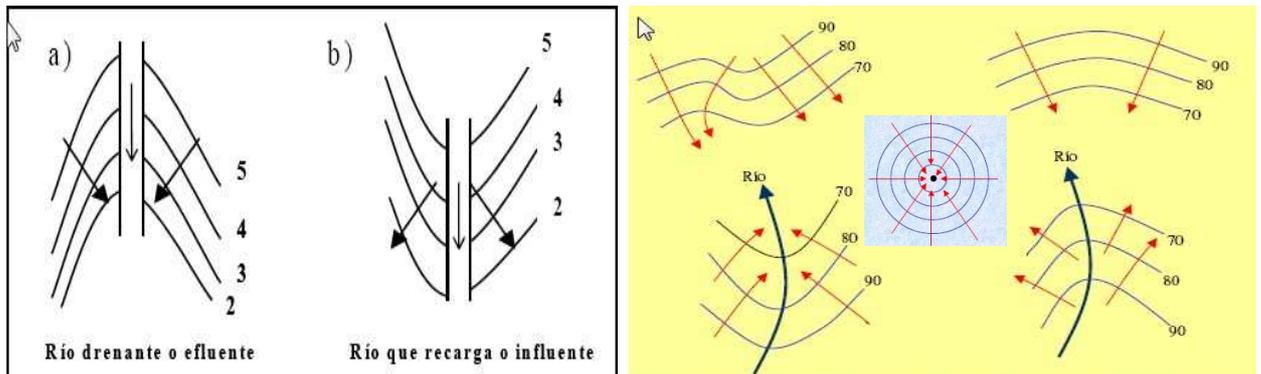


Figura 7. Trazos de la dirección de flujo subterráneo con respecto a las líneas isopiezas

2.7.3 Estudio de caso en la aplicación del método GOD para Costa Rica

En el estudio de caso *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección del acuífero del Valle Central de Costa Rica* (Agüero et al. 2006), se establecen conclusiones puntuales en la aplicación de las metodologías utilizadas (DRASTIC, GOD y SINTACS), que a continuación se mencionan.

Resultados desde el punto de vista de la metodología, algunas conclusiones del estudio:

1) La metodología GOD desprecia el efecto de atenuación del suelo para determinar la vulnerabilidad. En el método GOD puede ser incluido el efecto del suelo al estimar la amenaza de contaminante. Al despreciar o tomar en cuenta el efecto del suelo en la atenuación de contaminantes y por lo tanto la vulnerabilidad, debe tenerse sumo cuidado al establecer el posible contaminante y su modo de aplicación en el área.

2) El método DRASTIC es mucho más complejo que el método GOD por la utilización de un número mayor de variables. Sin embargo, algunas de estas variables son tomadas por el método GOD en forma indirecta a través de las amenazas.

3) La clasificación del sustrato litológico o zona no saturada del método GOD es más apropiado para un medio geológico de origen volcánico que la utilizada por el DRASTIC. Esto por cuanto el detalle y la descripción de las formaciones geológicas se aproximan más a las condiciones del país.

4) La variable de ocurrencia del agua subterránea del método GOD es confusa y difícil de estimar. Además, el efecto en la inaccesibilidad hidráulica ya fue tomado en cuenta por la variable de sustrato litológico. Por ello, sería conveniente substituir por una variable de mayor importancia, como el tipo de suelo.

5) Cuando existe información suficiente puede utilizarse el método GOD como determinación preliminar y el método DRASTIC para la estimación de la vulnerabilidad de una forma más detallada. Esto no quiere decir que la metodología DRASTIC sea mejor o peor que el índice GOD. Lo cierto es que el método GOD puede ser utilizado en casos donde la información no sea suficiente para determinar el índice DRASTIC.

Resultados desde el punto de vista de las derivaciones de la vulnerabilidad en el área de estudio:

1) En general los índices DRASTIC y GOD coinciden en las áreas de más alta vulnerabilidad, debido al mayor peso de las variables de profundidad y conformación de la zona no saturada en el índice DRASTIC, que son de las tres variables del índice GOD.

2) Las diferencias más importantes en los métodos se dan en las zonas de vulnerabilidad media y baja, donde las variables del índice DRASTIC que no toma en cuenta el GOD tienen mayor importancia.

2.7.4 Estudio en la aplicación del método GOD-S modificado

De acuerdo a Foster et al. (2002), en el esquema original GOD no incluye una consideración explícita acerca de los suelos en un sentido agrícola, no obstante, la mayoría de los procesos que causan la atenuación de contaminantes y/o eliminación en el subsuelo ocurre más rápidamente en la zona biológicamente activa del suelo como resultado de su mayor

contenido de materia orgánica, arcilla y mucho más numerosas poblaciones de bacterias. Una posible modificación al método (GOD-S) incorpora un índice de susceptibilidad a la percolación del suelo basada en una clasificación del suelo en función de su textura, como un cuarto paso capaz de reducir el índice GOD en aquellas áreas de alta vulnerabilidad hidrogeológica. En el caso de áreas urbanas el suelo es frecuentemente removido durante las construcciones, por lo tanto, la consideración del suelo no debería utilizarse.

Algunas investigaciones latinoamericanas han propuesto una modificación al método GOD para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, incorporando un factor relacionado con la capacidad de atenuación del suelo basado solamente en su textura. Recomiendan en términos generales, válido incluir un *factor de suelo*, con excepción en áreas donde el suelo ha sido removido o alterado y en los casos en que la carga contaminante es aplicada debajo de él. Además, si se incluye el factor de suelo, éste debería considerar el espesor del mismo conjuntamente con aquellas propiedades que influyen directamente en la desnitrificación *in situ* y en la atenuación de pesticidas (textura y contenido de materia orgánica del suelo).

Por ejemplo, en el estudio *Mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación del acuíferos incorporando el factor de cobertura de suelo en el Valle del Cauca, Colombia*. El Valle del río Cauca cuenta con una de las reservas de aguas subterráneas más importante de Colombia, con una extracción anual aproximada de 1000 millones de m³, siendo de fundamental importancia para el desarrollo de la región que comprende el abastecimiento de agua a varias ciudades. Con el fin de proponer herramientas técnicas para el uso sustentable del recurso y la planificación del uso del territorio la agencia local del manejo del agua (Corporación del Valle del Cauca) realizó el mapeo de la vulnerabilidad de los acuíferos del área por el método GOD. Además, se introdujo una modificación al método (en principio propuesta por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad de Chile) de incorporar el parámetro S para considerar la capacidad de atenuación de los suelos. La metodología modificada (conocida como GOD-S), le asigna valores a este parámetro S de acuerdo a las características texturales de los suelos, que varían desde las muy finas (arcillosas) hasta las muy gruesas (pedregosas) en áreas donde el espesor del suelo supera los 0,5 m.

Al igual la Agencia Ambiental de Inglaterra y Gales también incluyen un factor de suelo en el mapeo de vulnerabilidad de acuíferos. Este Factor S, se basa en un conjunto de propiedades del suelo que determinan su capacidad de infiltración, pero su efecto es utilizado para reducir potencialmente el nivel de vulnerabilidad del mapeado en áreas rurales y no se considera operativo en áreas urbanas donde el perfil de suelo ha sido alterado por obras de ingeniería (Foster e Hirata 1991). La Figura 7 expone el esquema del Factor S (Foster et al. 2002).

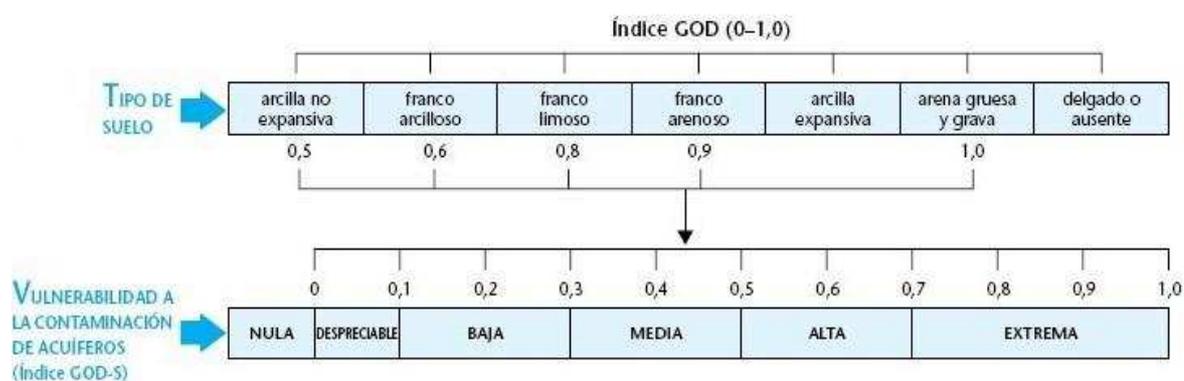


Figura 8. Factor S agregado al índice del método GOD

Fuente: Foster et al. (2002)

2.7.5 Otras metodologías que determinan la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

De acuerdo a Cortes et al. (2005), para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se han planteado métodos tales como: DRASTIC, SINTACS, GOD, EPIK, EKV, DhT, AVI, entre otros. Los métodos son análogos siendo la cantidad de variables la diferencia entre ellos. A continuación, una descripción general de los métodos que determinan el riesgo a la contaminación y protección del agua subterránea.

2.7.5.1 Método DRASTIC

Es un método empírico desarrollado por Aller et al. (1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA 1991). El método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. La técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta: profundidad del agua subterránea (D); tasa de recarga (R); tipo de acuífero (A); tipo de suelo (S); Topografía (T); impacto en la zona no saturada (I); y la conductividad hidráulica (C).

Como método posee tres supuestos importantes: 1) el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra; 2) el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación; y 3) el contaminante es móvil en el agua. Calculado a través de la siguiente fórmula: $DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw = \text{Contaminación Potencial}$. Nota: los subíndices r representan tasas y los subíndices w representan rangos, por lo que Dr y Dw son dos cubiertas o capas dentro del SIG obtenidas a partir de la cubierta o capa (Layer) de la profundidad de agua del acuífero (D), corresponde para cada propiedad del acuífero.

2.7.5.2 Método SINTACS

Desarrollado por Civita et al. (1990) para adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y al requerimiento de un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS comprende: **S** (soggiacenza - profundidad del agua); **I** (infiltrazione - infiltración); **N** (non saturo - sección subsaturada - zona no saturada); **T** (tipología de la cobertura - tipo de suelo); **A** (acquifero - características hidrogeológicas del acuífero); **C** (conducibilità - conductividad hidráulica); y **S** (superficie topográfica - pendiente topográfica).

El método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un programa preparado especialmente para el mismo. A las variables mencionadas, que influyen en la vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso del suelo.

2.7.5.3 Método EPIK

Es un método paramétrico desarrollado para acuíferos kársticos. El acrónimo **EPIK** significa: **E** (epikarst); **P** (erotive cover); **I** (infiltration conditions); **K** (karst network development) (Civita et al. 1990).

2.7.5.4 Método EKs

Auge (2004) considera que la vulnerabilidad es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello también se la conoce como protección o defensa natural. En relación a los acuíferos libres desarrolla una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (**E**) y en la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (**K_v**), parámetros que también considera el

método **AVI** (Aquifer Vulnerability Index). A ambas les asigna índices que van de 1 (menos vulnerable) a 5 (más vulnerable).

2.7.5.5 Método DhT' (Relación de potencial hidráulico)

La vulnerabilidad de este tipo de acuífero, está controlada por las propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo (permeabilidad vertical, porosidad, espesor y continuidad) y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el libre sobrepuesto. Esta diferencia, que bajo condiciones de no alteración generalmente es pequeña (algunos dm a pocos m), se magnifica en los ámbitos bajo explotación donde puede alcanzar decenas y aún centenas de metros (Auge 2004).

2.7.5.6 Método índice de vulnerabilidad AVI

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua (Báez 2001). Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica **c** al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero. La resistencia hidráulica **c** se calcula por la expresión: $c = [b_i / K_i]$ para las capas 1, 2, 3,..., i. Donde; **b_i** - Es el espesor de cada capa sobre el acuífero; **K_i** - Es la conductividad hidráulica de cada capa; y **c**; es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica **c**, menor vulnerabilidad.

2.8 Marco legal del recurso hídrico

Desde el punto de vista de la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), el marco legal son las reglas a seguir para cumplir las políticas y metas en el manejo del recurso hídrico. Contempla los derechos de uso y acceso del agua, la legislación con relación a la calidad del agua y la reforma a la legislación existente que se deba realizar en caso necesario. La existencia de un marco legal permite reconocer los derechos y responsabilidades de los usuarios y proveedores del recurso hídrico y el rol del estado, además se facilita la asignación del recurso hídrico asegurando la sostenibilidad de éste. El marco legal permite realizar

reformas cuando los derechos del recurso hídrico son asignados de manera injusta, o cuando estos no reflejan el valor de la provisión y/o el papel administrativo de grupos sociales específicos, incluyendo el del género (GWP 2003).

De acuerdo a la guía para la protección del recurso hídrico, de Aguilar (2002) y reproducido por CEDARENA, se define a las áreas protectoras como espacios de importancia para la conservación, renovación, aprovechamiento y desarrollo del recurso hídrico dadas sus características físicas, geográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, o de cobertura vegetal. La creación o declaratoria de estas áreas en Costa Rica se da a través de leyes, decretos y reformas.

2.9 Vulnerabilidad y medidas y/o manejo adaptativo

El IPCC (2001) define la vulnerabilidad climática como el grado de la incapacidad de superar los efectos del cambio climático incluyendo variabilidades del clima y eventos extremos. La capacidad adaptativa está definida como la capacidad de un sistema de adaptarse a los impactos del cambio climático y sus consecuencias y de reducir la vulnerabilidad del sistema. Por lo tanto la adaptación al cambio climático se refiere a medidas aplicadas a un sistema natural o humano para responder a efectos climáticos esperados o ya existentes intentando de minimizar daños. También se refiere a estrategias adaptativas contra impactos de cambios climáticos existentes y esperados.

Adaptación: se define como el proceso mediante el cual, individuos, comunidades y países, buscan sobreponerse a las consecuencias del cambio climático y la variabilidad climática; incluso a sacar ventaja. Los pilares del proceso de adaptación al cambio climático son: evaluación de la vulnerabilidad; implementación de las medidas de adaptación; y formación de capacidades para la adaptación. En ese sentido, se mencionan algunas medidas adaptativas en el sector de agua potable, tales como: prevenir la contaminación de fuentes existentes; conservación y manejo de cuencas hidrográficas en las áreas más vulnerables; desarrollo de proyectos de trasvase de agua hacia zonas con alta vulnerabilidad; fuentes subterráneas *versus* fuentes superficiales; monitoreo de la calidad de agua; y definir autoridades nacionales del agua (marco regulatorio e institucional) (Pérez 2007).

De acuerdo a Prins (2007) en el curso TC-503 (curso consideraciones económicas, ecológicas y sociales en el desarrollo humano), plantea el significado de *manejo adaptativo* como un enfoque de una planeada intervención en la realidad (un proyecto) que implica: norte claro con implementación flexible; adecuación a las características (cambiantes) de una zona y su gente; continua reflexión, aprendizaje y reajuste para encontrar el camino efectivo al cambio deseado. Y el *manejo adaptativo de proyectos*: como la intervención en una realidad compleja, que debe ser concebida en forma flexible y con capacidad de adaptación, inclusive vale que se diseñe como una intervención experimental y paulatina, la cual implica una continua reflexión y aprendizaje. Además, involucra conocer mejor la realidad, para actuar sobre ella y re-ajustar las metas, acciones y métodos para avanzar hacia el cambio deseado por un camino más claro y acertado. A continuación (Figura 9), establece el concepto de la rueda de aprendizaje para un proyecto de intervención.

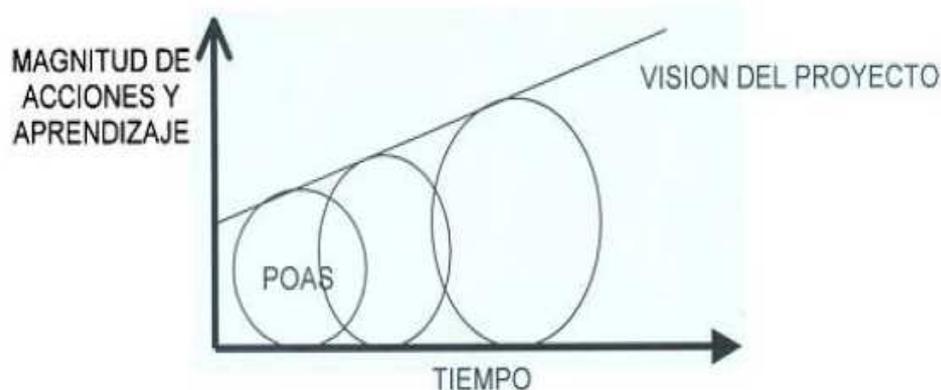


Figura 9. Rueda de aprendizaje : el intercalo de accion y reflexion

Fuente: Prins (2007)

En resumen el manejo adaptativo parte en considerar: la realidad biofísica y social, es compleja; las relaciones biofísicas y sociales, no son lineales, sino interactivas; y que la intervención en la realidad para lograr un cambio en la misma, es compleja (Prins 2007).

2.10 Uso del sistema de información geográfica (SIG) en la calidad del agua

Un SIG es un sistema de base de datos de entrada, manejo y presentación de los mismos, diseñada para manipular grandes volúmenes de información espacial y no espacial, provenientes de una amplia variedad de fuentes (Tim y Jolly 1994 citado por Peter 1998).

Estos autores integraron un modelo de simulación para examinar fuentes no localizadas de contaminación con el uso del SIG dentro de una cuenca. Los resultados fueron interesantes; la implementación de barreras vivas en contorno y fajas vegetativas de protección a lo largo de los cauces, redujeron en un 41 y 47% la producción de sedimentos, respectivamente (medidos a la salida de la cuenca), no obstante, cuando se combinaron ambas, las reducciones fueron del 71%. Con este estudio se demostró la utilidad de la integración de un modelo de simulación con un SIG para planificar acciones y controlar fuentes no localizadas de contaminación.

En los últimos años se ha venido utilizando herramientas que contribuyen en la toma de mejores decisiones, al tiempo de brindar soluciones de corto plazo, a través de diseño de estrategias para proteger la calidad de los cuerpos de agua: en el caso específico del agua, el uso del SIG, cada vez se hace más frecuente para evaluar la tendencia, así como el seguimiento y monitoreo de impactos de los variados usos del suelo sobre la calidad del agua en una cuenca, especialmente la contaminación por fuentes puntuales. Por otra parte, esta herramienta tecnológica permite obtener datos de satélites para ingresarlos a modelos calibrados y validados que simulan diversos procesos y/o escenarios relacionados al manejo de los recursos hídricos (Peter 1998; Sáenz et al. 1997). Por su parte Sáenz et al. (1997), argumentan que el uso de SIG es útil en la planificación del uso del suelo y además, ayuda a utilizar de mejor forma los recursos financieros al ser capaz de identificar áreas críticas de manejo en los recursos naturales.

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Ubicación de la subcuenca del río Siquirres

La subcuenca del río Siquirres (Figura 10), se localiza en la división territorial administrativa del Distrito Primero, del Cantón de Siquirres y Tercero de la provincia de Limón, región IV *Región Huetar Atlántico*. Creado bajo decreto ejecutivo No. 10653 del 19 de septiembre de 1911, y designada como cabecera cantonal con el mismo nombre, según Ley No. 44 del 25 de julio de 1892. La subcuenca tiene una extensión aproximada de 55,29 km² (5529 ha), 44,3 km de perímetro, pertenece a la cuenca del río Pacuare en la vertiente del Caribe Costarricense. Geográficamente se ubica en las coordenadas 10°02'08'' latitud norte y 83°32'53'' longitud oeste; 10°09'22'' latitud norte y 83°26'41'' longitud oeste.

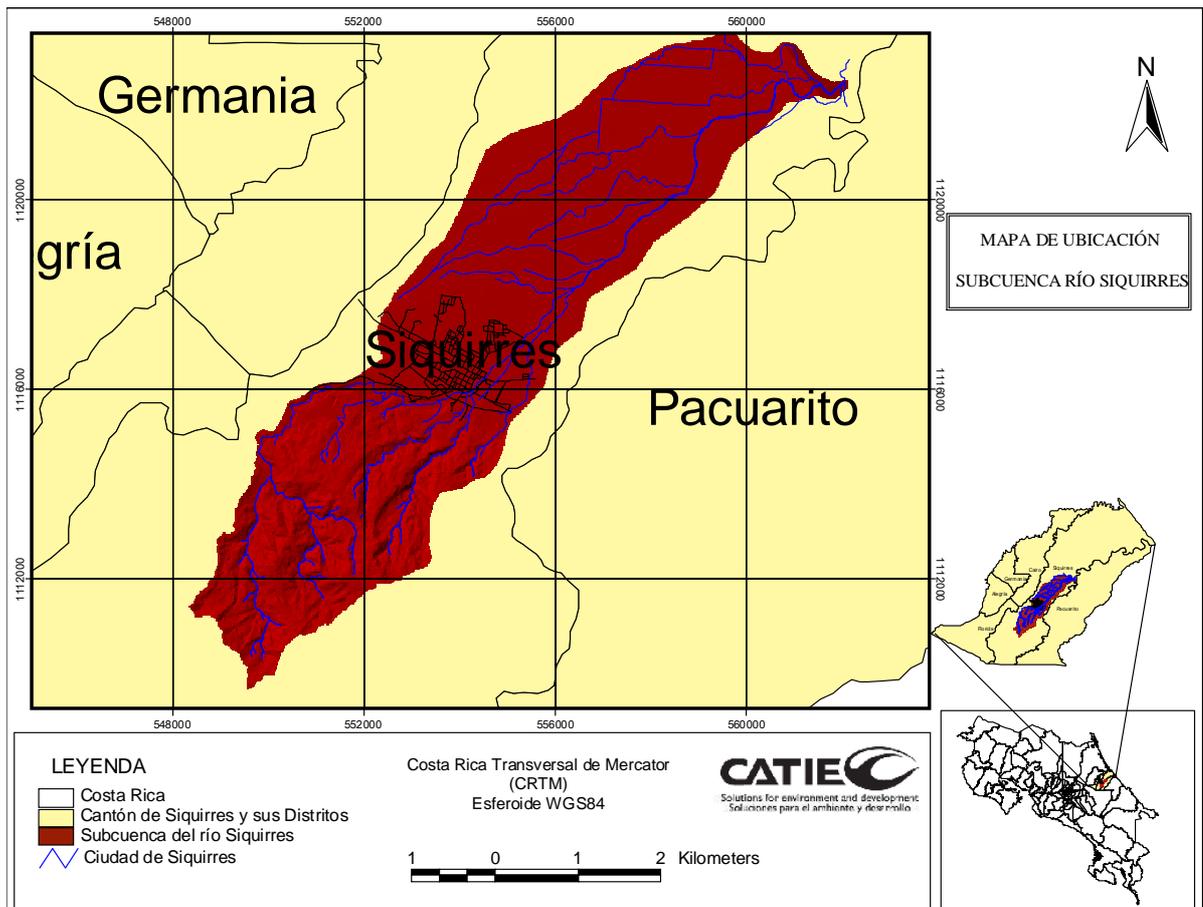


Figura 10. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Siquirres

3.2 Metodología del estudio

La metodología desarrollada se estructuró bajo cinco etapas secuenciales y de orden cronológicos: la primera de tipo básico donde se incluyó la recopilación, clasificación y análisis de diferentes fuentes de información secundaria que organizó y estructuró el trabajo (anteproyecto); la segunda, consistió en la caracterización de la subcuenca en los aspectos biofísico, socioeconómico, incluyendo la revisión de la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones de contaminación del recurso hídrico, fundamentadas sobre la base de literaturas secundarias e información primaria (entrevistas y recorrido de campo); la tercera etapa de evaluación donde se delimitó, estimó y conceptualizó la zona I y II, definida a través de la normativa vigente y estimada sobre la base de la metodología de vulnerabilidad global a la contaminación de aguas superficiales, asimismo la zona II delimitada a través de zonas potenciales de recarga hídrica (metodología RAS) y estimada su índice de vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas por el método GOD-S modificado; la cuarta etapa (objetivo tres) consistió en el análisis y discusión de la vulnerabilidad a la contaminación de las zonas o perímetros de protección definidas y estimadas en la tercera etapa, incluyendo el análisis del dinamismo antrópico actual y las consideraciones sociales; finalmente la quinta etapa se asentó en establecer las medidas adaptativas de vulnerabilidad a la contaminación de las zonas I y II, tomando como referencia la normativa vigente de las áreas de protección (objetivo 1), los resultados biofísicos del análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de las zonas I y II (Objetivo 2 y 3) y las consideraciones sociales, que fusionadas constituyeron las medidas adaptativas de la parte alta de la subcuenca.

En la primera etapa (etapa básica) se efectuaron las siguientes actividades de planificación que facilitaron el proceso de las siguientes etapas:

- ⇒ Revisión, clasificación y análisis de la información secundaria y primaria, para dar origen a la formulación del anteproyecto o guía de investigación.
- ⇒ Elaboración del plan de trabajo por objetivos, con cronograma ajustado a seis meses de campo (febrero - agosto) y tres meses de pos-campo (septiembre - noviembre).
- ⇒ Preparación del presupuesto y cronogramas de trabajo de campo y pos-campo.
- ⇒ Realización del primer taller participativo, organizado por la municipalidad de Siquirres y con participación de las bases cantonales, distritales y comunales para presentar el tema de investigación y establecer las coordinaciones pertinentes ante:

organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, actores claves, asociaciones de productores, funcionarios de las instituciones, sociedad civil entre otros, que tienen injerencia en el área de estudio.

- ⇒ Reconocimiento de la subcuenca con las organizaciones de bases para definir el ámbito espacial objeto de investigación, considerando las particularidades de la zona y ajustando el trabajo de campo, según prioridades de las instituciones y pobladores de las comunidades.

3.2.1 Caracterización biofísica, socioeconómica y legal

Corresponde al objetivo primero del estudio

✓ **Objetivo específico 1.** Caracterizar la subcuenca del río Siquirres en sus aspectos biofísicos, socioeconómicos y legales, con énfasis en el recurso hídrico.

En esta segunda etapa, se efectuaron las siguientes actividades que conllevaron a obtener una caracterización general de la subcuenca: la primera corresponde a la revisión, clasificación y análisis de la información secundaria y primaria referente a los recursos biofísicos y socioeconómicos de la subcuenca del río Siquirres; la segunda actividad, establece el cálculo y análisis de la caracterización biofísica; y la tercera, corresponde a la revisión de la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones legales a la contaminación hídrica. Seguidamente se describen las actividades de la etapa.

Actividad 1. Para la caracterización de la subcuenca, se contó con la siguiente información secundaria: base de datos de la cartográfica digital del distrito de Siquirres, proporcionado por el laboratorio del sistema de información geográfico (SIG) del CATIE (capas de poblados, red hídrica, calles, curvas a nivel con intervalo de 10 m y distribución administrativa del país); Herrera (1988, 1985); MAG-MIRENEM (1995); MAG (2000), INEC (2000); Hernández (2005); Ministerio de Salud y Seguridad Social (2006); hojas topográficas (Bonilla 3446 II NE, 3446 II SE) a escala 1:250.00; Hernández et al. (2007); Base de datos de FAOCLIM; informe del Plan Regulador del Cantón de Siquirres (síntesis del diagnóstico físico ambiental y síntesis del diagnóstico socioeconómico) (UNA 2008a,b).

La información primaria consistió en los recorridos de campo (visitas guiadas al área de estudio, verificación, validación, georeferenciación y constatación de puntos de muestreos) y reuniones con grupos de informantes (comunitarios), autoridad municipal y funcionarios de las distintas instituciones de Siquirres (AyA, MINAET, MAG, ICE, SENARA, Ministerio de Salud y Seguridad Social, Ministerio de Educación, entre otros).

Actividad 2: caracterización biofísica, que inicio con la cartografía de la subcuenca y área de estudio, basada inicialmente en la homogenización de la información, siguiendo; la escala de digitalización establecido en 1:300.0 y la proyección cartográfica, que fue la oficial del Instituto Geográfico Nacional "Proyección Cónica Conforme Secante de Lambert, esferoide de Clarke 1866, Fundamental de Ocotepeque" en su formato de coordenadas métricas Lambert Costa Rica Norte. Luego se procedió a la delimitación de la subcuenca de forma manual, utilizando las hojas topográficas (Bonilla 3446 II NE y 3446 II SE) a escala 1:250.00 y ajustada con verificaciones en campo. Posteriormente, se derivó la delimitación computarizada de la zona de estudio o parte alta de la subcuenca utilizando las capas de la red hidrológica, hitos (puntos de mayor elevación), las curvas a nivel con un intervalo de 10 m y un polígono que definió el área de evaluación, utilizando el programa de Sistema de Información Geográfica (ArcView 3,3) y dos extensiones llamadas *Hidrologic Modeling* y *Basin 1*. Con estos elementos, se determinó la dirección y acumulación del flujo en ese tramo del río y se realizó la delimitación automática.

- Curva hipsométrica: para su construcción se utilizó el mapa de curvas a nivel de 10 m, donde se marcaron áreas a cada 10 m, haciendo uso del programa ArcView 3,3, las cuales determinaron áreas parciales de esos entornos con sus puntos más altos. Estos datos (altitud msnm y áreas parciales) se agruparon en una tabla Excel, a partir de la cual, se determinaron las áreas acumuladas de las porciones de la subcuenca, y las áreas acumuladas que quedan sobre cada altitud del contorno, para luego ser ploteadas las altitudes *versus* las áreas acumuladas que queda sobre esa altitud (curva hipsométrica). Referente a la curva de frecuencia se multiplicaron las áreas parciales de esos entornos con las elevaciones medias entre cada contorno; el resultado fue ploteado con las altitudes del contorno y se obtuvo la curva de frecuencia.

- Parámetros de forma: se determinó a través del cálculo del índice de Gravelius [$C_g = 0,28$ (P / \sqrt{A})]. Donde: C_g = índice de Gravelius; P = perímetro de la subcuenca en km; A = superficie de la subcuenca, en km^2 . Obteniéndose:
 $C_g = 0,28$ ($44,31 \text{ km} / \sqrt{55,29 \text{ km}^2}$)

- Coeficiente de masividad (F. Fournier): representado por la $\text{tg}\alpha$, y su expresión de cálculo es: $\text{tg}\alpha = \bar{h} / A$. Donde: \bar{h} = altura media de la subcuenca = 189,20 msnm; y A = superficie de la subcuenca = 55,29 km^2 .

- Coeficiente orográfico (F. Fournier): su expresión es: $\text{C.O.} = \bar{h}\text{tg}\alpha$. Donde: C.O. = coeficiente orográfico; < 6 (relieve poco accidentado) y > 6 (relieve accidentado).
 \bar{h} = altura media de la subcuenca = 189,20 msnm
 $\text{tg}\alpha$ = coeficiente de masividad = 3,4 m/km^2

- Orden de las corrientes y densidad drenaje: determinado por el método de Strahler a través del programa ArcView 3,3 (extensión *Basin1*), y calculado con celdas de 250 como el umbral de acumulación de flujo para crear la red de drenaje.

- Pendiente media del cauce principal: valores estimados en el programa ArcGIS 9,2 como resultado de la media aritmética de las pendientes de seis tramos de 2995 m de longitud.

- Distribución de la precipitación y evapotranspiración: fue basado en la información de las 16 estaciones meteorológicas tomadas de la base de datos del programa FAOCLIM, para un periodo máximo de 30 años y un mínimo de 5 años. Computada en el programa ArcView 3,3 a partir de la interpolación del inverso de la distancia ponderada (IDW).

- Vientos, brillo solar, humedad relativa y lluvias máximas: fue basado en los datos del Plan Regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico físico ambiental (UNA 2008a).

- Distribución de la pendiente: clasificada sobre la base de la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica (MAG-MIRENEM 1995) y curvas a nivel con intervalos de 10 m.

- Distribución de las unidades geomorfológicas: la delimitación de las unidades geomorfológicas fue parte de la información del Plan Regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico físico ambiental (UNA 2008a), elaborada de acuerdo a los siguientes criterios: procesos geológicos dominantes en la creación de la forma, uniformidad en el tipo de relieve y tipo litológico; esta última de acuerdo a Cervantes (1989).

- Uso del suelo: la obtención de las unidades de uso actual del suelo para la subcuenca se realizó sobre la base de las fotografías aéreas e imágenes multiespectrales tomadas en el año 2005 por la misión Carta (Centro Nacional de Alta Tecnología; del programa de investigación aerotransportadas) y apoyada en el estudio de suelo y capacidad de uso de las tierras (Escala 1:500.00) para la zonificación agropecuaria de las Regiones Huetar Norte, Atlántico y Brunca (MAG 2000). Posteriormente las unidades fueron verificadas y corregidas con base en el informe de las 71 barrenas realizadas por el MAG, Siquirres en el 2007 y recorrido en campo, dando como resultado las unidades de uso actual.

- Áreas silvestres protegidas dentro del territorio cantonal de Siquirres: se obtuvieron del Plan Regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico físico ambiental (UNA 2008a).

Actividad 3. Revisión de la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones legales a la contaminación del recurso hídrico: la revisión, se basó en el resumen de la información divulgada por el grupo ambientalista CEDARENA, y en los estudios de diagnósticos y análisis del marco legal (Salazar 1998; Castro et al 2000; Aguilar et al. 2001; Aguilar 2002; Reyes et al. 2003; Aguilar et al. 2004; Castro et al. 2004; Grupo Técnico del Agua 2004; y Barrantes et al. 2005), contrastada con otras fuentes secundarias tales como: tesis, folletos, textos y revistas jurídicas, informes de foros, publicaciones de la gaceta, documentos de reformas, de leyes y decretos, entre otros. Además, se realizó una revisión de los archivos del periódico la Nación, algunos registros de casos ambientales de la Sala Constitucional y ponencias de las ediciones previas del Informe del Estado de la Nación.

Finalmente se sostuvo audiencias con juristas del medio ambiente y con funcionarios de las instituciones que tienen vínculo por ley en materia del recurso hídrico, quienes proveyeron

información general sobre los conflictos y traslapes de las instituciones, los problemas existentes por la falta de coordinación interinstitucional, la desfragmentación del sistema jurídico por la ausencia en la práctica de un ente rector en materia hídrica, la falta de políticas nacionales concretas y la burocracia existente en el proceso de declaratoria de áreas de protección o áreas silvestres.

El aspecto legal, se agrega únicamente para dar a conocer la existencia de la normativa vigente de las áreas de protección, las regulaciones legales existentes a la contaminación hídrica, los medios disponibles, las herramientas aplicables, los órganos de denuncia general y de regulaciones legales y los entes competentes para velar el cumplimiento de las normas relacionada a la protección y contaminación del recurso hídrico. Además, la revisión creó los mecanismos legales para la delimitación de la primera zona de protección aparente (zona I), y en parte estableció los indicadores de tipo político-institucional y ecológico de la vulnerabilidad global a la contaminación; asimismo, constituyó el ángulo jurídico-legal a las medidas adaptativas.

3.2.2 Delimitación, estimación y definición de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (zonas I y II)

En esta etapa se consideró el proceso de la delimitación, estimación y conceptualización de las zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (zona I y II), partiendo de 200 m aguas abajo de la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano administrado por AyA, llamado punto **W** hacia la parte alta de la subcuenca. Entre los mapas temáticos de resultado final para las zonas I y II de protección a la contaminación aparente del recurso hídrico, tenemos:

- ⇒ Mapa de protección a la contaminación de aguas superficiales (zona I)
- ⇒ Mapa de protección a la contaminación de aguas subterráneas (zona II)

✓ **Objetivo específico 2.** Delimitar, estimar y conceptualizar zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, en la parte alta de la subcuenca.

Para el cumplimiento del objetivo se trabajó en la delimitación y estimación de zonas vulnerables a la contaminación de aguas superficiales (zona I) y subterráneas (zona II) de manera separada, donde cada zona cuenta con un proceso metodológico individual. A continuación se detalla el proceso metodológico efectuado en la zona I y II.

3.2.2.1 Proceso metodológico para la delimitación, estimación y conceptualización de la vulnerabilidad global a la contaminación de aguas superficiales (zona I)

Delimitación de la zona I: la zona I fue delimitada según la Ley Forestal (Ley No. 7575) y Ley de Aguas (Ley No. 276) vigentes, que tipifican una franja de protección de 50 m horizontales a ambos lados del río, si el terreno es quebrado, art. 33, inciso b) de la Ley Forestal, un radio de 100 m medidos de modo horizontal en las áreas que bordean nacientes permanentes, art. 33, inciso a) de la Ley Forestal, y un perímetro de 200 m de radio cuando las tierras circunden los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable, art. 31 de la Ley de Aguas. La delimitación parte de 200 m aguas abajo de la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano administrado por AyA llamado punto **W** hacia la parte alta de la subcuenca.

Estimación y conceptualización: la metodología utilizada para la estimación de la zona I, se basó en la propuesta de Wilches-Chaux (1993), donde conceptualiza que *"la vulnerabilidad en si misma constituye un sistema dinámico, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características (internas y externas) que convergen en una comunidad en particular, a fin de tener una mejor interpretación de las relaciones causales de la vulnerabilidad, y de dar elementos de juicio para la toma de decisiones en cuanto a la priorización de recursos y acciones"*. Se constituyó bajo la metodología descrita por Jiménez et al. (2004), desarrollada en los estudios de casos de tesis de maestría presentadas a la Escuela de Posgrado del CATIE por: Buch (2001), Cáceres (2001), Meléndez (2001); Rivera (2002); Gómez (2003), Parra (2003), Reyes (2003) y Salgado (2005), que definen el procedimiento metodológico general desarrollado para estimar la vulnerabilidad global ante amenazas naturales en microcuencas y subcuencas. Igualmente, se consideraron los conceptos y criterios de Wilches-Chaux (1989), Cardona (1993), y Cáceres (2001).

El proceso metodológico en la formulación de las variables e indicadores, involucró una serie de consultas, análisis y consenso que según la experiencia pueden proporcionar los argumentos más objetivos de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I. A continuación, se detallan las etapas del proceso consumado:

1. Las variables e indicadores definidos en principio parten del análisis del *estudio de caso y ejercicio sobre análisis de vulnerabilidad ante amenazas siconaturales en cuencas hidrográficas* (Jiménez 2007), del estudio *Análisis de vulnerabilidad en la microcuenca del río Talgua, Honduras* (Reyes 2003), y de la *Metodología para estimar degradación y vulnerabilidad a desastres naturales: aplicación a la microcuenca Los Naranjos, Lago de Yojoa, Honduras* (Cáceres 2007), asimismo de la revisión de información secundaria (informes, tesis, artículos, revistas, mapas, entre otros) e información primaria (visitas y recorrido de campo, reuniones formales e informales con actores locales, comunitarios y productores, consultas a expertos y a funcionarios de instituciones). Igualmente, las condiciones y características propias de la zona y del área de estudio, dio lugar a considerar indicadores muy particulares. El proceso resultó en una primera propuesta de variables e indicadores con seis tipos de vulnerabilidades: física, política-institucional, ecológica, económica, social y educativa, documentada en el anteproyecto de investigación *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico de la subcuenca del río Siquirres*.

2. A partir de la primera propuesta se originó una segunda que inicia con la presentación formal²⁴ al Sector Agropecuario Región Huetar Atlántico (Acta No. 03-08, reunión ordinaria celebrada el 19/02/2008, en la Dirección Regional del MAG, Siquirres) sobre la investigación de tesis. En la reunión se discutió la importancia de establecer zonas o perímetros de protección a la contaminación de la parte alta del río Siquirres, a través de un procedimiento metodológico que requiere la verificación, discusión, consenso y validación de variables e indicadores establecidos para estimar la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I. La reunión tuvo la asistencia de funcionarios de las siguientes instituciones: MAG, MINAET, SENARA, IDA, JAPDEVA, SEPSA, INCOPECA, ICE, CNP y INA, resultando un acuerdo de asignación de responsabilidades a funcionarios del MAG y SENARA como los encargados de verificar, analizar, consensuar y validar las variables e indicadores establecidos.

²⁴ Taller o presentación formal: corresponden a una invitación formal de una entidad o institución y que cuenta con acta de reunión ordinaria.

Posteriormente se efectuó un segundo taller participativo informal²⁵, celebrado en la municipalidad de Siquirres, con participación de funcionarios de las siguientes instituciones: municipalidad de Siquirres, AyA, representante de la sociedad civil, MINAET, MAG, SENARA, Ministerio de Salud y Seguridad Social, Ministerio de Educación y representantes de la ASADA Coco-Moravia, donde nuevamente se verificó, discutió y consensuó las variables e indicadores. Además, se definió la ponderación de cada indicador y el peso relativo para cada tipo de vulnerabilidad. En último lugar, se establecieron los parámetros de guía para la verificación y/o ponderación de cada indicador en campo (Anexo 9).

3. En esta etapa se procedió a validar los indicadores consensuados. Por falta de recursos y tiempo se decidió contar únicamente con la participación de dos instituciones: MAG a través del Ing. Marcos Rojas y el Ministerio de Educación por intermedio del Colegio Técnico Profesional de Siquirres (estudiantes del último año y profesores del área ambiental). El proceso consistió en:

- ⇒ Un taller de capacitación de la metodología desarrollada para estimar la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I.
- ⇒ Instrucción del proceso de verificación en campo y explicación de la forma de valoración de cada indicador a validar a través de los parámetros de guía a considerar para validar y valorar los indicadores de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I.
- ⇒ Finalmente se enfatizó en la importancia y responsabilidad que implica la valoración de los indicadores, debido a que estos, constituirán la base de las propuestas, acciones o medidas de protección, administración y manejo a instaurarse en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres (medidas adaptativas).

Validados los indicadores se procedió a estimar la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I, a través del promedio de cada indicador validado, lo cual fue documentado en los cuadros de resumen de cada tipo de vulnerabilidad. Los Cuadros 7, 8, 9, 10, 11 y 12 listan las variables y los indicadores por ángulo de vulnerabilidad que fueron consensuados y validados en el presente estudio, utilizando la parte alta y sus alrededores de la subcuenca como la unidad básica de valoración y análisis.

²⁵ Taller Informal: corresponden a los talleres convocados por el investigador.

Cuadro 7. Variables e indicadores de la vulnerabilidad física (VF)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Código
Zona I	FÍSICA	Asentamiento humano	Número de casas ubicadas dentro de la franja de los 100 m a ambos lado del río	VF1
		Sistema séptico	Número de viviendas sin letrinas y/o tanques sépticos dentro de los 100 m al río	VF2
		Infraestructura de fosa séptica	Porcentaje de letrinas y/o fosa séptica construidas con materiales adecuados	VF3
		Sistema de alcantarillado sanitario	Porcentaje de casas con sistema de alcantarillado sanitario	VF4
		Basureros ilegales	Número de basureros ilegales existente en la parte alta de la subcuenca	VF5
		Vertedero de residuos sólidos y líquidos urbanos	Distancia del vertedero municipal a la parte alta de la subcuenca	NA
		Fábricas o manufacturas	Distancia en m de las fábricas al río Siquirres	NA
		Comercio	Distancia del mercado municipal a la toma de agua de AyA	VF6
		Pequeños talleres de carpintería, automotrices, pintura y esmaltes, entre otros	Número de talleres dentro de los 100 m al río	VF7
		Gasolinera	Número de gasolineras ubicadas a 150 m al río	VF8
		Carretera asfaltada	Distancia en m entre el río y la carretera principal asfaltada	VF9
		Clínicas y farmacia cerca del río	Distancia en m de las farmacias y clínicas con respecto al río	NA
		Industria minera	Cantidad de pequeñas industrias minera (lavado o extracción de oro) dentro de los 150 m al río	NA
		Aguas residuales	Porcentaje de casas que vierten sus aguas residuales o servidas al río	VF10
Tren de aseo	Número de pasadas del tren de aseo por semana	VF11		

Cuadro 8. Variables e indicadores de la vulnerabilidad política-institucional (VP-I)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Código
Zona I	POLÍTICA- INSTITUCIONAL	Apoyo de la municipalidad en proyectos y programas de protección, administración y manejo ambiental	Número de proyectos y programas ejecutados por año	VP-I1
		Apoyo de las instituciones estatales y privadas en la protección, administración y manejo ambiental	Número de proyectos y programas ejecutados por año	VP-I2
		Participación de productores y comunitarios	Porcentaje de productores y comunitarios que participan en la protección del río, nacientes, ojos de agua, pozos y áreas de recargas	VP-I3
		Existencia de liderazgo en la comunidades de la parte alta de la subcuenca	Porcentaje de la población que reconoce a sus líderes comunitarios y/o productores	VP-I4
		Fiscalización por las instituciones cantonales en la protección del río, nacientes,	Porcentaje de la población que considera eficiente la fiscalización de las instituciones nacionales y	VP-I5

		ojos de agua, pozos y áreas de recargas	cantones	
		Aplicación de la Ley de aguas (No. 276) y Ley Forestal (No. 7575) en la protección de la franja ribereña del río (50 m a ambos lados)	Apresiasi3n en la aplicaci3n de las leyes	VP-I6
		Criterios del marco legal	Porcentaje de la poblaci3n que conocen las leyes que tipifican la protecci3n y manejo adecuado de las nacientes y 3reas de recargas	VP-I7
		Plan de prevenci3n y mitigaci3n de riesgo a la contaminaci3n del r3o, nacientes, ojos de agua, pozos, durante los 3ltimos 5 a3o	N3mero de planes elaborados por las instituciones gubernamentales, ONG's y/o gobierno municipal	VP-I8
		Coordinaci3n interinstitucional sobre el tema de contaminaci3n del agua del r3o Siquirres	N3mero de actividades coordinadas por a3o	VP-I9

Cuadro 9. Variables e indicadores de la vulnerabilidad ecol3gica (VEC)

Zona de protecci3n aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminaci3n	Variables respuestas	Indicadores	C3digo
Zona I	ECOL3GICA	Manejo de agroqu3micos	Porcentaje de productores que hacen un buen manejo en la aplicaci3n de agroqu3micos	NA
		Tiendas de agroqu3micos	N3mero de tiendas de agroqu3micos existentes en la subcuenca o en la ciudad de Siquirres	VEC1
		Erosi3n de suelos en la franja ribereña (50 m de distancia a ambos lados al r3o)	Tipo de erosi3n predominante	VEC2
		Tipo de suelo	Propiedades texturales superficial y sub-superficial predominante en los 50 m de distancia al r3o	VEC3
		Deforestaci3n	Porcentaje de 3rea deforestada en los 50 m de distancia al r3o	VEC4
		Agricultura	Porcentaje de productores con pr3cticas agr3colas en la franja ribereña (50 m de distancia al r3o)	VEC5
			Porcentaje de productores que utilizan agroqu3micos	VEC6
			Tipos de cultivos con uso de agroqu3micos	VEC7
			Cantidad de aplicaciones de agroqu3micos por a3o	VEC8
			Tipo de riego utilizado en cultivos ubicados dentro de la franja ribereña	VEC9
			Porcentaje de agricultores con pr3cticas de conservaci3n de suelo y agua	VEC10
			Distancia en m de las 3reas agr3colas con respecto al r3o	VEC11
		Ganader3a	N3mero de porqueriza y gallineros existentes en la franja de los 100 m al r3o	VEC12
Distancia de las 3reas de potrero con respecto al r3o	VEC13			

		Biofísico	Porcentaje de pendiente predominante en la franja ribereña de la parte alta de la subcuenca	VEC14
		Contaminación al río	Cantidad de desechos sólidos y líquidos generados en lb/día/casas ubicadas a 100 m de distancia al río	VEC15
			Evidencia de basuras y residuos sólidos en el río	VEC16
		Áreas de las nacientes	Porcentaje de áreas intervenida por el hombre en un rango de 200 m	VEC17

Cuadro 10. Variables e indicadores de la vulnerabilidad económica (VEN)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Código
Zona I	ECONÓMICA	Capacidad económica	Ingreso promedio anual en colones de los productores y/o pobladores establecidos en la parte alta de la subcuenca	VEN1
		Fuentes de empleo	Porcentaje de la población dedicada a las actividades agropecuarias dentro de los 100 m de distancia al río	VEN2
		Instrumentos económicos	Accesibilidad a incentivos económicos que motivan la conservación y manejo sostenible del recurso hídrico en la parte alta de la subcuenca	VEN3
		Desempleo	Porcentaje de la población desempleada de la parte alta de la subcuenca	VEN4
		Dependencia económica de actividades agropecuaria por familia	Número de actividades agropecuarias por familia en la parte alta de la subcuenca	VEN5

Cuadro 11. Variables e indicadores de la vulnerabilidad social (VS)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Código
Zona I	SOCIAL	Instituciones y organizaciones comunales	Número de Inst. y organizaciones vinculadas a la protección y manejo adecuado de la franja ribereña y/o parte alta de la subcuenca	VS1
		Población de la ciudad de Siquirres	Porcentaje de la población de Siquirres enferma a causa del agua para consumo humano abastecido por AyA durante los últimos 5 años	VS2
		Participación de productores	Porcentaje de productores que han participado en talleres de cambio de uso del suelo, protección de la franja ribereña y conservación de las nacientes	VS4
		Apoyo de la sociedad civil en proyectos comunales de protección	Número de proyectos ambientales ejecutados durante los últimos 5 años en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres	VS5
		Salud	Porcentaje de menores de 10 años con enfermedades gastrointestinales en la ciudad de Siquirres en los últimos 5 años	VS6
		Organización social	Número de organizaciones civiles, comunitarias y asociaciones de productores vinculados a la protección del río Siquirres	VS7

		Servicios públicos	Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca con exceso a los servicios básicos	VS8
--	--	--------------------	--	-----

Cuadro 12. Variables e indicadores de la vulnerabilidad educativa (VE)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Código
Zona I	EDUCATIVA	Talleres educativos	Número de talleres realizados en los últimos 5 años a pobladores en tema de protección y manejo de las fuentes de agua, nacientes y áreas de recarga	VED1
		Educación ambiental orientada a productores y comunitarios	Número de programas radiales o escritos por año orientados a la protección y manejo de la subcuenca del río Siquirres	VED2
		Educación orientada a la prevención y mitigación de la contaminación del río Siquirres	Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca que han sido capacitadas en estos temas	VED3
		Escolaridad	Porcentaje de analfabetismo en la parte alta de la subcuenca	VED4

La caracterización y valoración de la vulnerabilidad descrita por Jiménez (2007), establece cinco tipos de vulnerabilidad a cada uno de los cuales se le asigna una valoración numérica o una escala de ponderación lineal de 0 a 4, que se aplica a cada indicador que se evalúa. Se parten de la premisa que entre mayor es la valoración asignada, mayor es el grado de vulnerabilidad para esa variable o indicador. Para el presente estudio, se consideró una caracterización más de la vulnerabilidad llamada NA (No Aplica) (estos indicadores no influyen en la estimación de la vulnerabilidad global, solo serán mencionados, ya que en un futuro podrían ser valorados). Su justificación parte de la importancia que manifestaron los actores locales y funcionarios de las instituciones, aduciendo que aunque son indicadores que en la actualidad no se evalúan, no se descarta que en un futuro muy cercano puedan ser evaluados y valorados. El Cuadro 13 muestra la caracterización asignada a la vulnerabilidad.

Cuadro 13. Caracterización y valoración de la vulnerabilidad

Caracterización de la vulnerabilidad	Valoración de la vulnerabilidad
Muy alta	4
Alta	3
Media	2
Baja	1
Muy baja	0
NA (No Aplica)	NA

De la misma manera, se consideró la escala de valoración de la vulnerabilidad (Cuadro 14) expresada en forma porcentual (Jiménez 2007). Donde el valor de 0 - 19,99 representa que el aporte del indicador es menos significativo al nivel de vulnerabilidad, contrario al otro extremo con un valor entre 80 - 100 (Reyes 2003).

Cuadro 14. Escala de valoración de la vulnerabilidad

Escala porcentual de la vulnerabilidad	Caracterización de la vulnerabilidad
0,00 – 19,99	Muy baja
20,00 – 39,99	Baja
40,00 – 59,99	Media
60,00 – 79,99	Alta
80,00 – 100	Muy alta

El peso relativo para cada tipo de vulnerabilidad fue definido durante el proceso de verificación, discusión y de consenso en las reuniones formales e informales realizadas, obteniéndose los siguiente pesos relativos (Figura 11).

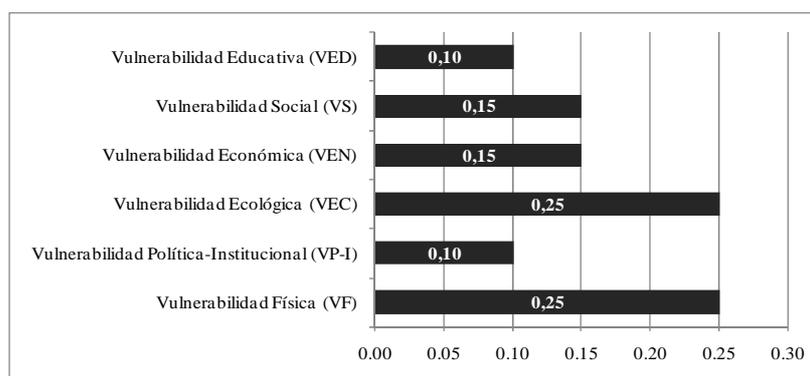


Figura 11. Peso relativo por cada tipo de vulnerabilidad

En la estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres representada en la zona I, se procedió de la siguiente manera:

1. Luego de validados los indicadores por parte del MAG, Ministerio de Educación (Colegio Técnico Profesional de Siquirres) y la verificación en campo de acuerdo a los parámetros de guía establecido, se determinó el promedio de cada indicador, definido como valoración del promedio (Anexo 3, 4, 5, 6, 7 y 8 variables e indicadores para cada tipo de vulnerabilidad). Lo que equivale a; valoración del MAG + valoración del Ministerio de

Educación + valoración de verificación en campo dividido entre tres = valoración del promedio de cada indicador.

2. Estos valores (valoración del promedio) fueron agrupados en los cuadros resumen de cada tipo de vulnerabilidad, a partir del cual se determinó el promedio de la vulnerabilidad (Vulnerabilidad*) donde el valor resultante es el cociente de calificaciones obtenidas para cada tipo de vulnerabilidad. Seguidamente se calculó su valor porcentaje o vulnerabilidad % (el índice promedio de la vulnerabilidad se dividió entre el valor máximo definido y se multiplicó por cien para el componente correspondiente es decir vulnerabilidad*/4x100), consecutivamente los porcentajes, se verificaron en la escala de valoración de la vulnerabilidad (Cuadro 14) para caracterizar el índice de cada tipo de vulnerabilidad.
3. Los valores de vulnerabilidades (vulnerabilidad*, valor máximo definido, vulnerabilidad % y caracterización de la vulnerabilidad), se agruparon. A partir del cual se determinó el promedio global de la vulnerabilidad porcentual o primer resultado de la estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I (VF% + VP-I% + VEC% + VEN% + VS% + VED% divididas entre seis = primer resultado).
4. En último lugar se estimó la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I a través de la siguiente ecuación lineal ponderada, donde el porcentaje estimado se comparó con la escala de valoración (Cuadro 14) para determinar el grado o caracterización de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I:

$$VG = \sum_{i=1}^6 x_i * w_i = (VF * 0,25 + VP - I * 0,10 + VEC * 0,25 + VEN * 0,15 + VS * 0,15 + VED * 0,10)$$

VG = Vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I

x_i = Tipos de vulnerabilidades; w_i = Peso relativo (Figura 21)

VF = Vulnerabilidad física

VP-I = Vulnerabilidad política-institucional

VEC = Vulnerabilidad ecológica

VEN = Vulnerabilidad económica

VS = Vulnerabilidad social

VED = Vulnerabilidad educativa

3.2.2.2 Proceso metodológico para la delimitación, estimación y conceptualización de la vulnerabilidad global a la contaminación de aguas subterráneas (zona II)

Delimitación de la zona II: se concibió por el método de recarga de aguas subterráneas (RAS) de Junker (2005), aplicado en el ámbito del El Salvador. El método permite calcular el agua que se infiltra en el subsuelo basado en los principios de Schosinky y Losilla (2000), el cual requiere del coeficiente C (*coeficiente de infiltración*) para realizar su evaluación. A continuación se describen los pasos que dieron lugar a la delimitación de la zona II, a través del método RAS:

Paso 1. Consistió en crear el mapa de distribución de las precipitaciones, haciendo uso de la información de las 16 estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca.

Paso 2. Se elaboró el mapa de la evapotranspiración real (ETreal). Para ello se recurrió al cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) construido a partir del método de Thornthwaite por cada estación meteorológica, haciendo uso de la información de la temperatura mensual obtenida de las 16 estaciones meteorológicas más cercanas a la subcuenca, asimismo se confeccionó el mapa del coeficiente global de desarrollo (kg), cuyos valores fueron obtenidos de las tablas de Bosch et al. (1982), Aparicio (1997) y Domínguez (2008) los cuales fueron asignados a cada tipo de uso actual en la subcuenca. El Cuadro 15 muestra los valores kg promedios para cada cobertura del suelo tanto en los periodos lluviosos y secos.

Cuadro 15. Valores kg y ciclo vegetativo

No.	Cobertura (uso actual)	kg
1	Asentamientos humanos	0,00
2	Bosque	0,80
3	Carretera asfaltada y de tierra	0,00
4	Charral o matorral	0,63
5	Cuerpo de agua	0,00
6	Cultivo anual	0,80
7	Musáceas	0,80
8	Pasto con árboles	0,70
9	Pasto natural	0,75
10	Piña	0,65
11	Plantaciones forestales	0,80
12	Sistemas agroforestales	0,60

Fuente: Bosch et al (1982); Aparicio (1997); y Domínguez (2008)

Con los pasos 1 y 2 se determinó el mapa del balance climático ($BC = \text{mapa de precipitación} - \text{mapa de } ET_{real}$), empleando la herramienta *Map Calculator* del programa ArcView 3,3.

Paso 3. Se basó en la obtención y sobreposición de los mapas C (*coeficientes de infiltración* = $kp + kv + kfc$) establecidos sobre la base de los valores de Shosinsky y Losilla (2000), y modificado para el caso de El Salvador (Junker 2005). En principio se elaboró el mapa de pendientes en unidades porcentuales con seis rangos, fijándole a cada unidad el valor del coeficiente kp relacionado al rango de pendiente (Cuadro 16).

Cuadro 16. Valores kp

No.	Rangos de pendiente en %	kp
1	0 – 3	0,40
2	3 – 15	0,15
3	15 – 30	0,10
4	30 – 50	0,07
5	50 – 70	0,05
6	Más de 70	0,01

Fuente: Junker (2005)

Seguidamente se creó el mapa de uso actual del suelo reclasificado, con su respectivos valores de coeficiente de uso de suelo kv (Cuadro 17).

Cuadro 17. Valores kv

No.	Cobertura (uso actual)	kv
1	Asentamientos humanos	0,10
2	Bosque	0,20
3	Carretera asfaltada	0,10
4	Carretera de tierra	0,15
5	Charral o matorral	0,15
6	Cuerpo de agua	0,00
7	Cultivo anual	0,15
8	Musáceas	0,18
9	Pasto con árboles	0,15
10	Pasto natural	0,10
11	Piña	0,30
12	Plantaciones forestales	0,20
13	Sistemas agroforestales	0,20

Fuente: Junker (2005)

Con base en el mapa de tipo de suelo confeccionado en el Plan Regulador del Cantón de Siquirres (UNA 2008), se elaboró el mapa de orden de suelo de la subcuenca, asignándole a cada orden el coeficiente *kfc* relacionado al tipo de suelo (Cuadro 18).

Cuadro 18. Valores kfc

No.	Orden de suelos	Descripción y/o composición	<i>fc</i>
1	Inceptisoles	Suelos de textura media a mediana (franco arenoso), bien drenados, profundos mayor a 120 cm, de fertilidad media a alta	0,15
2	Ultisoles	Suelos de textura media, poco profundos y con presencia de material parental en la superficie de color pardo	0,15

Fuente: Junker (2005)

Luego se procedió a determinar el mapa *C* (*coeficiente de infiltración*), sobreponiendo los mapas de cada coeficiente usando el *Map Calculator* ($C = kp + kv + kfc$). Finalmente, se terminó el RAS multiplicando el mapa del balance climático con el mapa *C* (*coeficiente de infiltración*) que equivale a; R (*recarga*) = $BC * C$.

Estimación y conceptualización de la zona II: existen una variedad de métodos establecidos para estimar el grado de vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas. Sin embargo, para el presente estudio se eligió el método GOD por ser simple, sistemático y requerir de información generalizada en comparación con otros métodos. El GOD de Foster (1987); y Foster e Hirata (1991) supone la mejor elección, debido a que fue desarrollado especialmente para zonas cuya información acerca del subsuelo y sistema de aguas subterráneas sean escasas (Custodio 1998). Además, por presentar una estructura de cálculo simple que lo hace excelente en la estimación como en la discusión de sus resultados.

El método original estima la vulnerabilidad multiplicando tres parámetros o factores que representan tres tipos de información. En el estudio se agrega un nuevo factor llamado tipo de suelo (Factor S), definido de acuerdo a las variaciones texturales (de superficie y de subsuelo) y que supone dos razones: 1) considerar la capacidad de atenuación del suelo superficial (zona no saturada) de acuerdo a la textura del mismo; y 2) por tratarse de áreas rurales. Está claro que es un método empírico que establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación, factores que poseen relaciones complejas y que dependen en gran medida de variables difíciles sino imposibles de cuantificar.

El Cuadro 19 muestra de forma generalizada cómo se estimó el grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y las Figuras 12 y 13 muestran el método GOD-S modificado y el proceso de mapeo efectuado al método GOD-S modificado para espacializar las áreas estimadas.

Cuadro 19. Índice GOD-S que estimó la vulnerabilidad a la contaminación de agua subterránea en la subcuenca del río Siquirres

Índice de vulnerabilidad	Factores multiplicativos	Factores de vulnerabilidad
Ocurrencia del agua subterránea o Groundwater hydraulic confinemen	G*	Factor G
Litología predominante sobre el acuífero o Overlaying Strata	O*	Factor O
Profundidad del agua o Depth to groundwater table	D*	Factor D
AGREGACIÓN DEL FACTOR S		
Características texturales del suelo	S =	Factor S
Índice de vulnerabilidad =	$G*O*D*-S$	= Grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

Cada uno de los factores señalados poseen valores que van entre cero a uno, indicando que entre mayor es el valor, más desfavorable es la categoría. Por ejemplo: se considera de vulnerabilidad despreciable si el valor es menor a 0,1; baja si el valor está entre 0,1 - 0,3; media si está entre 0,3 - 0,5; alta si está entre 0,5 - 0,7; y extrema si es mayor a 0,7 como se detalla en el esquema básico de la estimación del método GOD-S modificado (Figura 12).

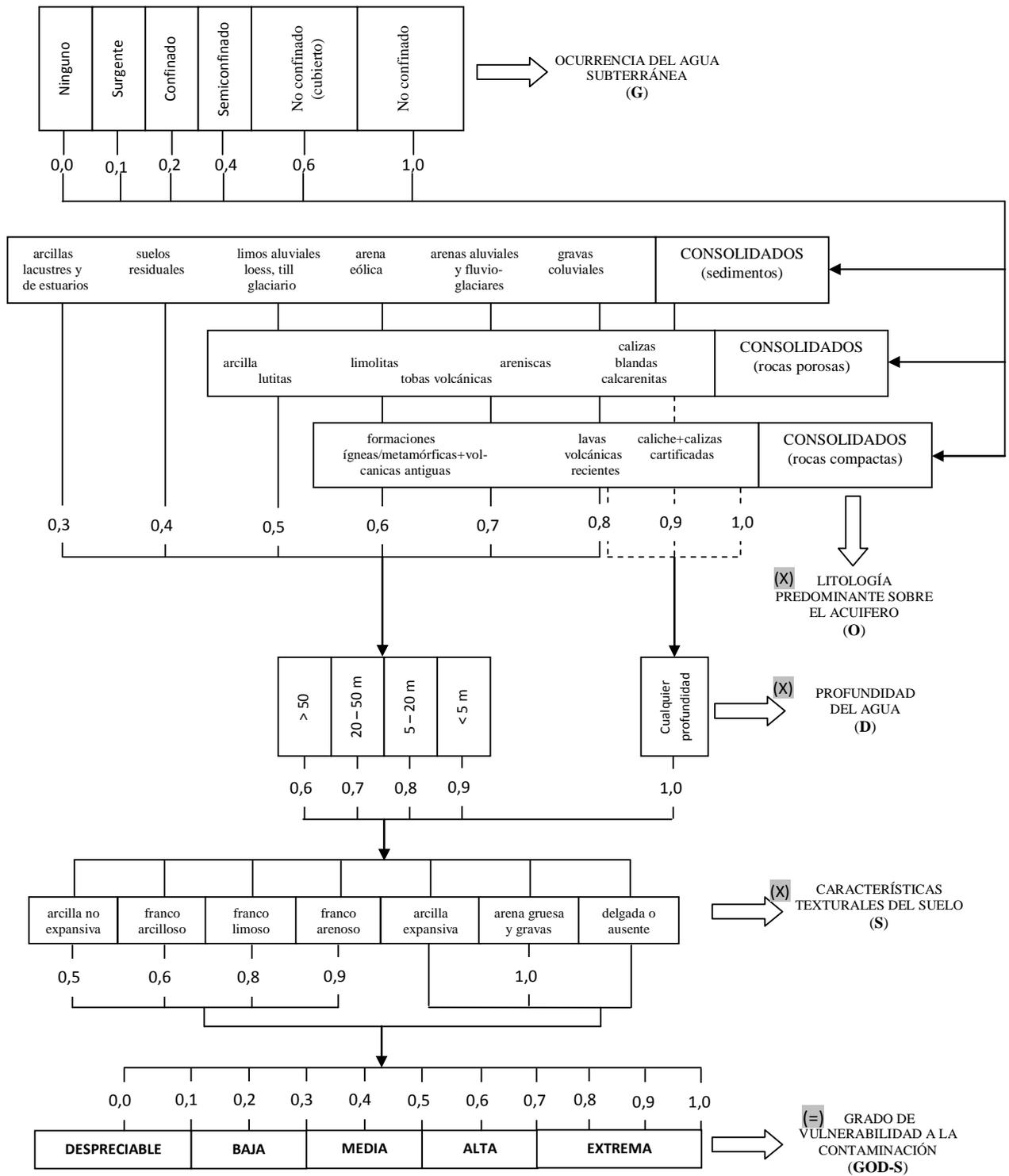


Figura 12. Método GOD-S modificado para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en la subcuenca del río Siquirres

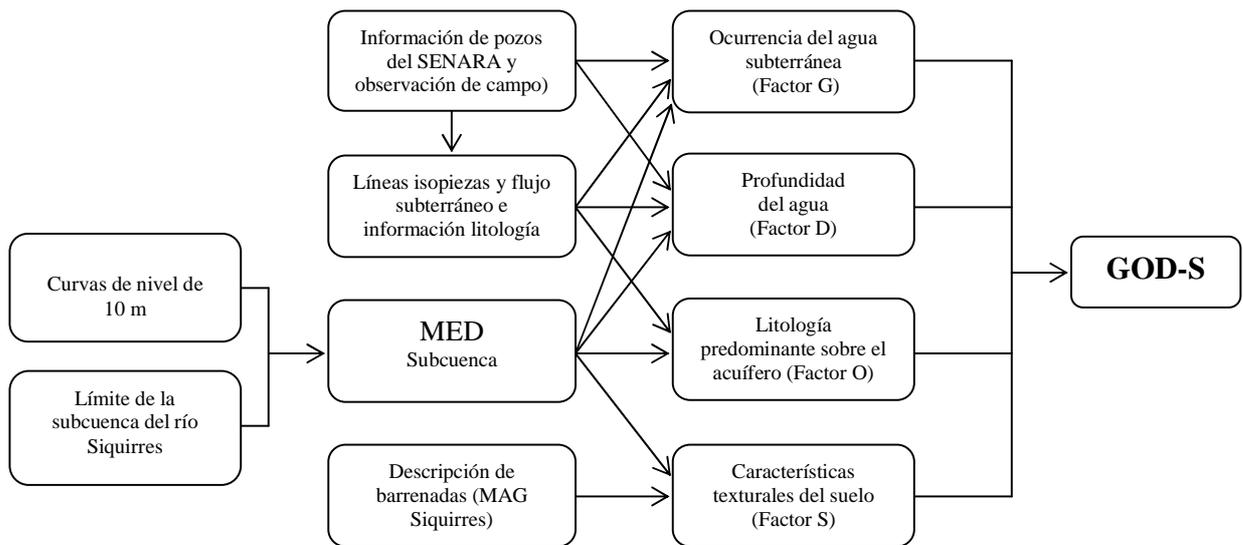


Figura 13. Proceso de espacialización y estimación (mapeo) del método GOD-S modificado

Fuente: Agüero et al. (2006) modificado

3.2.3 *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente (zona I y II)*

Esta etapa desarrolla el análisis del segundo objetivo desde el punto de vista biofísico de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, a la cual se incluye el análisis social (consideraciones sociales).

✓ **Objetivo específico 3.** Analizar la vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente.

El análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente I y II, se divide en cuatro etapas: la primera, consiste en la caracterización del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA); la segunda, obedece a la modelación del flujo subterráneo de la parte alta de la subcuenca o mapa de líneas equipotenciales (isopiezas); la tercera, establece el análisis de la relación del dinamismo antrópico actual conformado por los indicadores con valoraciones mayores o iguales a la media (≥ 2) del valor máximo definido (4) en la vulnerabilidad global con respecto a los parámetros ICA que sobrepasan las normas del Decreto No. 32327 y Norma CAPRE, considerando las direcciones del flujo subterráneo expuesta en el mapa de isopiezas; y la cuarta y última etapa, consistió en el análisis social a través de las consideraciones de los diferentes actores locales.

Etapa 1. Caracterización del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA): con el fin de facilitar la interpretación de los datos físicos, químicos y biológicos de la parte alta del río Siquirres, se recurre al ICA, el cual, mediante una expresión matemática que representa 9 parámetros valorados, permite evaluar la calidad del recurso hídrico. Con el propósito de dar cumplimiento a la primera etapa del presente objetivo, se procedió a la estimación del ICA, basado en el estudio de caso de la propuesta de descontaminación del río Acelhuate en El Salvador (SNET 2002). El proceso metodológico realizado para la estimación del ICA fue:

- Punto de muestreo: corresponde al agua cruda o agua del río Siquirres, localizada en la comunidad del Coco Siquirres, específicamente en el dique que es utilizado para desviar el agua del río Siquirres hacia la pila de captación de AyA que posteriormente es enviada vía tubería a la planta de tratamiento. Se ubica en las coordenadas 10° 05' 11" de latitud norte y 83° 32' 40" de longitud oeste, con una elevación de 195 msnm.
- Selección de la época de muestreo: las épocas de muestreos fueron seleccionadas de acuerdo al promedio mensual del caudal (l/s) estimado para un periodo de 29 años (1979 a febrero del 2008), correspondiente al informe ejecutivo del 09 de mayo del 2008 de AyA de Siquirres, y al promedio mensual de precipitación (mm/año) de la estación meteorológica Las Lomas tomadas de la base de datos del programa FAOCLIM para un periodo de 30 años. Debido a la existencia de una regresión lineal positiva entre el caudal y la precipitación de la estación Las Lomas, se procedió a agrupar la distribución del caudal y la precipitación en tres categorías: la primera categoría corresponde a valores menores de 500 l/s y 250 mm/año, llamado periodo seco; la segunda comprende los valores entre 500 - 700 l/s y 250 - 350 mm/año, llamado periodo de transición; y la tercera categoría que concierne a valores mayores a 700 l/s y 350 mm/año, llamado periodo lluvioso, como se muestra en la Figura 14.

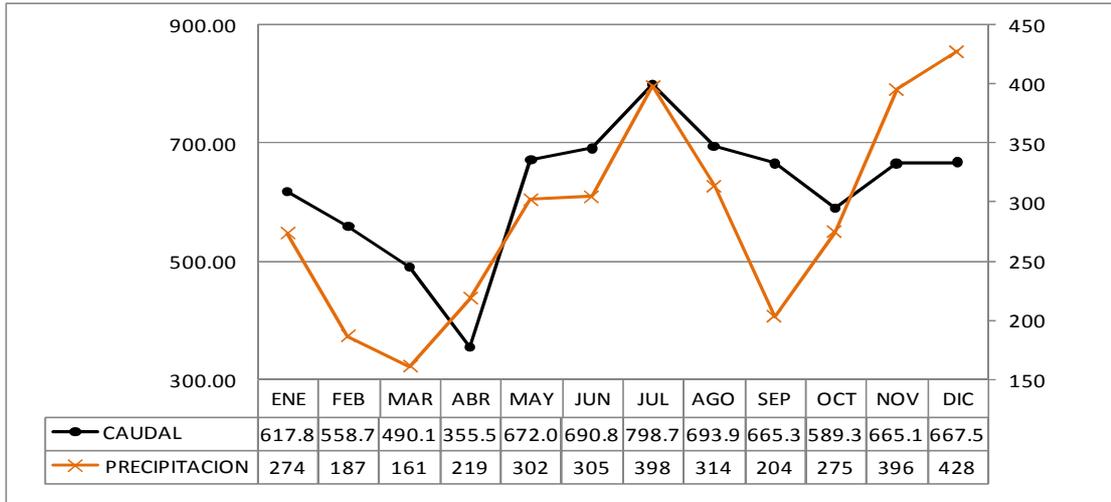


Figura 14. Promedio mensual de caudales en el agua cruda del río Siquirres

Fuentes: datos de caudales de 29 años (1979 a febrero del 2008); precipitación FAOCLIM para un periodo de 30 años

- Recolección de datos y toma de muestras: la base de datos de los parámetros establecidos para estimar el ICA proceden de dos fuentes de información:

1. Del informe de laboratorio central de AyA, con resultados del control físico-químico y microbiológico realizado en el agua cruda del río Siquirres. Los parámetros son: coliformes fecales con datos de 1997 - 2007 (528 datos); pH y turbidez con datos del 2003 - 2007 (240 datos), con una frecuencia de muestreo de dos veces por mes durante todo el año (48 datos).

2. Del muestreo de campo de los siguientes parámetros; DBO₅ analizado en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) según la norma INTE/ISO/IEC del 17/02/2005 (ver alcance de la acreditación en la página www.eca.or.cr) y los parámetros como nitrato, fosfato, temperatura, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto, analizados en el laboratorio de CATIE, con una frecuencia de muestreo de una vez por mes. La metodología empleada para el análisis de cada muestra de agua fue la metodología del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th ed. 1998. APHA-AWWA-WEF, de los Estados Unidos de América, acreditados para los análisis químicos y microbiológicos de aguas potables y residuales ante el Ente Costarricense de Acreditación, según la Norma ISO 17025.

Para el muestreo se consideraron las recomendaciones de control y protocolo de CEQIATEC, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITC) y según el manual de procedimientos de muestreo químico (CQ-PM-QUI-11), garantizando así la confiabilidad de los datos de campo. El equipo y materiales utilizados en la recolección de la muestra fue facilitado por el laboratorio de CATIE (botellas de plástico y de vidrio con capacidad de 250 ml, bolsa de hielo, papel parafina, periódicos, hielera, y termómetro digital para medir la temperatura del agua en campo). Una vez recolectada la muestra se procedió inmediatamente a almacenarla y conservarla en la hielera a temperatura de entre 5 - 8 °C, con el fin de evitar cualquier alteración de sus propiedades y evitar la multiplicación de bacterias y gérmenes, hasta llegar el laboratorio ubicados en Turrialba-CATIE y CEQIATEC en Cartago, a una y cuatro horas de distancia en vehículo particular.

- Metodología ICA: la metodología utilizada concierne al índice de calidad del agua propuesto por Brown que es una versión modificada del Water Quality Index (WQI) desarrollado por la *Fundación de Sanidad Nacional de Estados Unidos (NSF)*, como un esfuerzo por idear un sistema que permitiera comparar la calidad del agua de ríos en varios lugares de Estados Unidos. Este índice fue establecido en 1970 para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos del mismo río con diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo es saludable o no, debido a que el ICA especifica la aptitud del cuerpo de agua respecto a los usos prioritarios que este pueda tener (SNET 2002).

El proceso de estimación del ICA, se basó en el estudio de caso de SNET (2002), la cual se resume para el presente estudio en tres pasos:

Paso 1. Selección de las variables o parámetros: de acuerdo a la propuesta de Brown el ICA corresponde a nueve parámetros; coliformes fecales (NMP/100 mL), pH (unidades o valor de pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅ mg/L), nitrato (NO₃ mg/L), fosfato (PO₄ mg/L), temperatura (°C), turbidez (UNT), sólidos disueltos totales (mg/L), y oxígeno disuelto (OD en mg/L).

Paso 2. Consistió en la selección de la fórmula matemática de agregación, y en la determinación de los subíndices para cada parámetro: en la estimación del índice Brown (ICA) se utilizó el promedio multiplicativo ponderado (ICA_m), la cual obedece a que el cálculo del ICA mediante técnicas multiplicativas es superior a las aritméticas, es decir que son mucho más sensibles a la variación de los parámetros, reflejando con mayor precisión un cambio en la calidad (SNET 2002). A continuación se expresa matemáticamente la ecuación:

$$ICA_m = \prod_{i=1}^9 (Sub_i^{w_i}) \quad (1)$$

Donde:

ICA_m = índice de calidad de agua del promedio multiplicativo ponderado

w_i = pesos relativos asignados a cada parámetros (sub_i) o peso del i-ésimo parámetro, ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Sub_i = subíndice del parámetro i o valor del subíndice del i-ésimo parámetro.

Para obtener el valor ICA es necesario sustituir los datos en la ecuación (1) obteniendo los Sub_i de las distintas gráficas como se explicará a continuación. Dicho valor se eleva por sus respectivos w_i (Cuadro 20) y se multiplican los nueve resultados, obteniéndose de esta manera la estimación del ICA.

Cuadro 20. Pesos relativos para cada parámetros del ICA

i	Sub_i	Unidades	w_i
1	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0,15
2	pH	unidades o valor de pH	0,12
3	DBO ₅	DBO ₅ mg/L	0,10
4	Nitratos	NO ₃ mg/L	0,10
5	Fosfatos	PO ₄ mg/L	0,10
6	Temperatura	°C	0,10
7	Turbidez	UNT	0,08
8	Sólidos disueltos totales	mg /L	0,08
9	Oxígeno disuelto	mg /L	0,17

De acuerdo a SNET (2002), se describen los pasos a seguir para obtener los (Sub_i) de las distintas gráficas del ICA (Anexo 12)

1. Si los resultados de coliformes fecales son mayores de 100000 bact/100 mL el (Sub_1) es 3. Si el valor es menor de 100000 bact/100 mL, se deberá buscar el valor en el eje (X) de la

figura (Anexo 12) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_1) de coliformes fecales, y se procede a elevarlo al peso w_1 .

2. Si el valor de pH es menor o igual a 2 unidades el (Sub_2) es igual a 2, si el valor de pH es mayor a igual a 10 unidades el (Sub_2) es igual a 3. Si el valor está entre 2 y 10 se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 13) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_2) de pH y se procede a elevarlo al peso w_2 .

3. Si el DBO₅ es mayor de 30 mg/L el (Sub_3) es igual a 2. Si es menor de 30 mg/L, buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 14) interpolando el valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_3) de DBO₅ y se procede a elevarlo al peso w_3 .

4. Si el valor del nitrato es mayor de 100 mg/L el (Sub_4) es igual a 2. Si es menor de 100 mg/L, se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 15) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_4) de nitrato y se procederá a elevarlo al peso w_4 .

5. Si el fosfato es mayor de 10 mg/L el (Sub_5) es igual a 5. Si es menor de 10 mg/L, se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 16) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_5) y se procederá a elevarlo al peso w_5 .

6. Para el parámetro de temperatura (Sub_6) primero hay que calcular la diferencia entre la $T^{\circ}_{ambiente} - T^{\circ}_{muestra}$ y con el valor obtenido proceder. Si el valor de esa diferencia es mayor de 15 °C el (Sub_6) es igual a 9. Si el valor obtenido es menor de 15 °C, se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 17) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_6) de temperatura y se procede a elevarlo al peso w_6 .

7. Si la turbidez es mayor de 100 UNT el (Sub_7) es igual a 5. Si es menor de 100 UNT, se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 18) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_7) de turbidez y se procede a elevarlo al peso w_7 .

8. Si los sólidos disueltos totales son mayores de 500 mg/L el (Sub_8) es igual a 3, y si es menor de 500 mg/L, se deberá buscar el valor en el eje (X) en la figura (Anexo 19) interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_8) de residuos disueltos totales y se procede a elevarlo al peso w_8 .

9. Para el parámetro oxígeno disuelto (OD) es necesario calcular el porcentaje de saturación del OD en el agua. El porcentaje de saturación es la cantidad de oxígeno disuelto en la muestra de agua comparada con la cantidad máxima que podría estar presente a la misma temperatura. En definitiva los valores del porcentaje de saturación de OD de 80 - 120% se consideran excelentes y los valores menores al 60% o superiores a 125% se consideran malos. El OD en unidades (mg/L) puede ser determinado con el valor de la temperatura del agua (Cuadro 21) y de esta manera estimar el porcentaje de saturación del OD a través de una interpolación (Anexo 20).

Cuadro 21. Solubilidad del oxígeno en agua dulce

Temp. °C	OD mg/L						
1	14,19	12	10,76	23	8,56	34	7,05
2	13,81	13	10,52	24	8,40	35	6,93
3	13,44	14	10,29	25	8,24	36	6,82
4	13,09	15	10,07	26	8,09	37	6,71
5	12,75	16	9,85	27	7,95	38	6,61
6	12,43	17	9,65	28	7,81	39	6,51
7	12,12	18	9,45	29	7,67	40	6,41
8	11,83	19	9,26	30	7,54	41	6,31
9	11,55	20	9,07	31	7,41	42	6,22
10	11,27	21	8,90	32	7,28	43	6,13
11	11,01	22	8,72	33	7,16	44	6,04

Instrucción para la interpolación de los datos en la figura (Anexo 20): 1) se marca el valor del oxígeno disuelto (mg/L) en la línea inferior del nivel; 2) luego se marca la temperatura del agua en la línea superior; 3) posteriormente se dibuja una línea recta desde la marca del oxígeno en mg/L hasta la marca de la temperatura del agua; 4) el valor convertido del porcentaje de saturación es aquel en donde la línea recta que se ha dibujado pasa a través de la línea de porcentaje de saturación de OD. Finalmente si el porcentaje de saturación de OD es mayor de 140% el (Sub_9) es igual a 50. Si el valor obtenido es menor a 140% de saturación de OD se busca el valor en el eje (X), interpolando al valor en el eje de las (Y). El valor es el (Sub_9) de OD y se procede a elevarlo al peso w_9 .

En resumen el valor del ICA = $(Sub_1)^{15} \times (Sub_2)^{12} \times (Sub_3)^{10} \times (Sub_4)^{10} \times (Sub_5)^{10} \times (Sub_6)^{10} \times (Sub_7)^{0,08} \times (Sub_8)^{0,08} \times (Sub_9)^{11}$. El valor obtenido, corresponde al índice ICA de carácter general, orientado hacia aguas con potenciales para abastecimiento humano.

Paso 3. Consiste en la comparación del valor estimado con la clasificación del ICA propuesto por Brown: donde el ICA adopta para condiciones óptimas un valor máximo determinado de 100, que va disminuyendo con el aumento de la contaminación del curso de agua en estudio. En el Cuadro 22 encontramos la clasificación de la calidad del agua superficial, de acuerdo a los rangos y valores ICA evaluado por SNET (2002) y sus usos como agua para consumo humano (León 1991), y el Cuadro 23 muestra la manera en que se ordenaron los nueve parámetros que estimaron el ICA.

Cuadro 22. Clasificación del ICA propuesto por Brown y sus usos

Calidad de agua	Color	Valor	Uso como agua para consumo humano
Excelente		91 a 100	No requiere purificación para su consumo humano
Buena		71 a 90	Requiere purificación mínima debido a su dudoso consumo sin purificar
Regular		51 a 70	Requiere tratamiento potabilizador necesario
Mala		26 a 50	Requiere un tratamiento especial con inspecciones de calidad continuos
Pésima		0 a 25	Inaceptable para el consumo

Fuentes: SNET (2005); León (1991) modificado

Cuadro 23. Hoja de cálculo para la estimación del ICA

Parámetros	Unidades	Peso asignado (wi)	Valor medido (a)	Valor (Subi) (b)	(a) x (b)
1 Coliformes Fecales	NMP/100 mL	0,15			
2 pH	Unidades de pH	0,12			
3 DBO ₅	mg/L	0,10			
4 Nitratos	mg/L	0,10			
5 Fosfatos	mg/L	0,10			
6 Temperatura	°C	0,10			
7 Turbidez	UNT	0,08			
8 Sólidos disueltos Totales	mg/L	0,08			
9 Oxígeno Disuelto	% saturación	0,17			
Valor ICA (promedio multiplicativo ponderado)					▼

Etapas 2. Modelación del flujo subterráneo en la parte alta de la subcuenca a través del mapa de líneas equipotenciales (isopiezas): se utilizó el procedimiento propuesto por Sánchez (2008) para trazar las líneas isopiezas y que consiste en lo siguiente.

1. En cada pozo se resta la cota estimada (a partir de la curva de nivel o MED) menos la profundidad del nivel freático. Por ejemplo, un pozo con un nivel de profundidad de 14 m, se le estima una cota de 628 msnm. Entonces, la cota del agua será: $628 - 14 = 614$ msnm. Se realizó esta operación para los 41 pozos registrados por SENARA y los verificados en campo, utilizando curvas de nivel con una separación de 10 m para crear el MED.

2. Posteriormente, se procedió a trazar las isolíneas con una equidistancia de 10 m (la equidistancia es subjetiva, dependerá de la cantidad de datos disponibles y de la variabilidad de éstos). La forma del trazado también es en parte subjetiva, pero en todo caso deben formar curvas suaves. El trazo fue evaluado por un experto (hidrogeólogo) del ICE.

3. En último lugar se trazaron las líneas direccionales del flujo subterráneo perpendicular a las isopiezas de modo que las líneas de flujo siguieran obligatoriamente un cierto camino. Las líneas fueron trazadas haciendo uso del programa ArcGIS 9,2.

Etapa 3. Análisis de relación entre el dinamismo antrópico actual respecto a los parámetros ICA, considerando el mapa de isopiezas: el análisis se realizó con el propósito de observar cómo el dinamismo antrópico actual valorado en la parte alta de la subcuenca, está repercutiendo en los parámetros ICA que definen la calidad del agua del río Siquirres, teniendo presente las direcciones de flujo del agua subterránea, respecto a la fuente de abastecimiento de AyA de agua para consumo humano.

El procedimiento metodológico fue el siguiente: 1) se agruparon en las columnas los indicadores del dinamismo antrópico actual y en las filas los parámetros ICA que sobrepasan las normas del Decreto No. 32327 y norma CAPRE; 2) posteriormente se procedió a seleccionar el indicador que a nuestro criterio tiene relación directa con las concentraciones de cada parámetro ICA a contrastar; y finalmente 3) se describió cómo el indicador, está repercutiendo en las concentraciones de cada parámetro del ICA, sobre la base de la metodología que estimó la vulnerabilidad a la contaminación de la zona I.

Etapa 4. Análisis de las consideraciones sociales: la etapa social se basó en dos ángulos de observaciones: la primera corresponde al sondeo institucional y poblacional realizado a

funcionarios de instituciones del Cantón de Siquirres y a pobladores de las comunidades del Coco, Moravia Guayacán y zona urbana de Siquirres; y la segunda a los apuntes realizados en el taller de vulnerabilidad del recurso hídrico: calidad, salud pública y ambiente, en el marco de la Red Ambiental Nacional en Agua y Saneamiento (RANAS), realizado 12 de mayo del 2008 en Limón, Costa Rica.

En el sondeo institucional, la modalidad de la encuesta aplicada fue en calidad de conversación y vía correo electrónico, con opción libre de expresión, comentarios y sugerencias en las respuestas a las preguntas (Anexo 11). Es importante aclarar que los funcionarios entrevistados corresponden al máximo puesto cantonal o regional. La cantidad de entrevistados fue 19.

Para el sondeo poblacional (Anexo 12), se tomó como criterio la población abastecida de agua para consumo humano, tanto de la ASADA Coco-Moravia como de AyA. La muestra fue de 150 pobladores, consultados al azar, procurando una proporción homogénea de hombres y mujeres. Al sondeo poblacional se le aplicó el análisis de la prueba chi-cuadrado usando el programa estadístico Infostat, con el propósito de conocer la probabilidad de cometer el error tipo 1 (rechazar la hipótesis nula siendo esta verdadera), para el caso de esta prueba, la hipótesis nula, corresponde a que *No hay relación entre edad y conocimiento*. De esta manera, se obtuvo una percepción generalizada del conocimiento por rangos de edades de los pobladores con respecto a la situación hídrica ambiental de la parte alta de la subcuenca.

3.2.4 Proponer medidas adaptativas a la vulnerabilidad a la contaminación, sobre la base de la normativa vigente del recurso hídrico, resultado del análisis biofísico y social

Esta etapa se desarrolló a partir de los objetivos anteriores, es decir se fundamentó en la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones legales a la contaminación del recurso hídrico, al análisis de vulnerabilidad a la contaminación de las zonas I y II, y en el análisis de las consideraciones y/o planteamientos sociales.

✓ **Objetivo específico 3.** Proponer medidas adaptativas a la vulnerabilidad a la contaminación, en la parte alta de la subcuenca, con fines de protección, administración y manejo adecuado del recurso hídrico.

A la interrogante ¿porqué medidas adaptativas? El concepto de medidas adaptativas parte de la definición del IPCC al definir *vulnerabilidad* como la incapacidad de superar los efectos del cambio climático y *la capacidad adaptativa* como la capacidad de adaptarse a los impactos del cambio climático, por lo tanto, para responder a los efectos climáticos se habla de mitigación al cambio climático o estrategias adaptativas entendidas como medidas adaptativas a la vulnerabilidad de los cambios extremos. Esto supone que al analizar la vulnerabilidad de cualquier elemento ambiental a diferentes escalas espaciales (global, regional, nacional y local) se deben plantear estrategias de mitigación (medidas adaptativas) a las condiciones y características particulares del lugar en estudio.

Y al segundo cuestionamiento ¿por qué se establecen medidas adaptativas por periodos de 5, 10 y 15 años? El establecimiento de los períodos, partió del concepto de *manejo adaptativo de proyecto* (Prins 2007), esquematizada en la rueda de aprendizaje: el intercalo de acción y reflexión (Figura 9). Donde manifiesta, que para avanzar en la dirección de la finalidad del proyecto y ser exitoso en lograr sus objetivos, precisa reajustar su estrategia y adecuarlas a la realidad. Si no, puede fallar. Este reajuste implica cumplir el ciclo del proyecto, para que con base en la sistematización (POAS), poder establecer los ajustes pertinentes a la realidad actual y de esta manera, reiniciar el nuevo ciclo del proyecto. Para el presente estudio cada ciclo del proyecto fue definido por periodos de 5 años, donde a cada periodo se estableció medidas adaptativas por zonas.

Las medidas adaptativas para la zona I y II, se definió como de diligencias porque requiere de una intervención rápida y a corto plazo. Sin embargo, la garantía del agua en calidad y cantidad, requieren medidas complementarias a largo plazo, es así, como se establecieron las medidas adaptativas definidas como planes y proyectos. Estas medidas corresponden en parte a direccionar la visión de los proyectos a elaborarse y ejecutarse.

La Figura 15 muestra el concepto de medidas adaptativas de las zonas I y II, consideradas para el presente estudio.

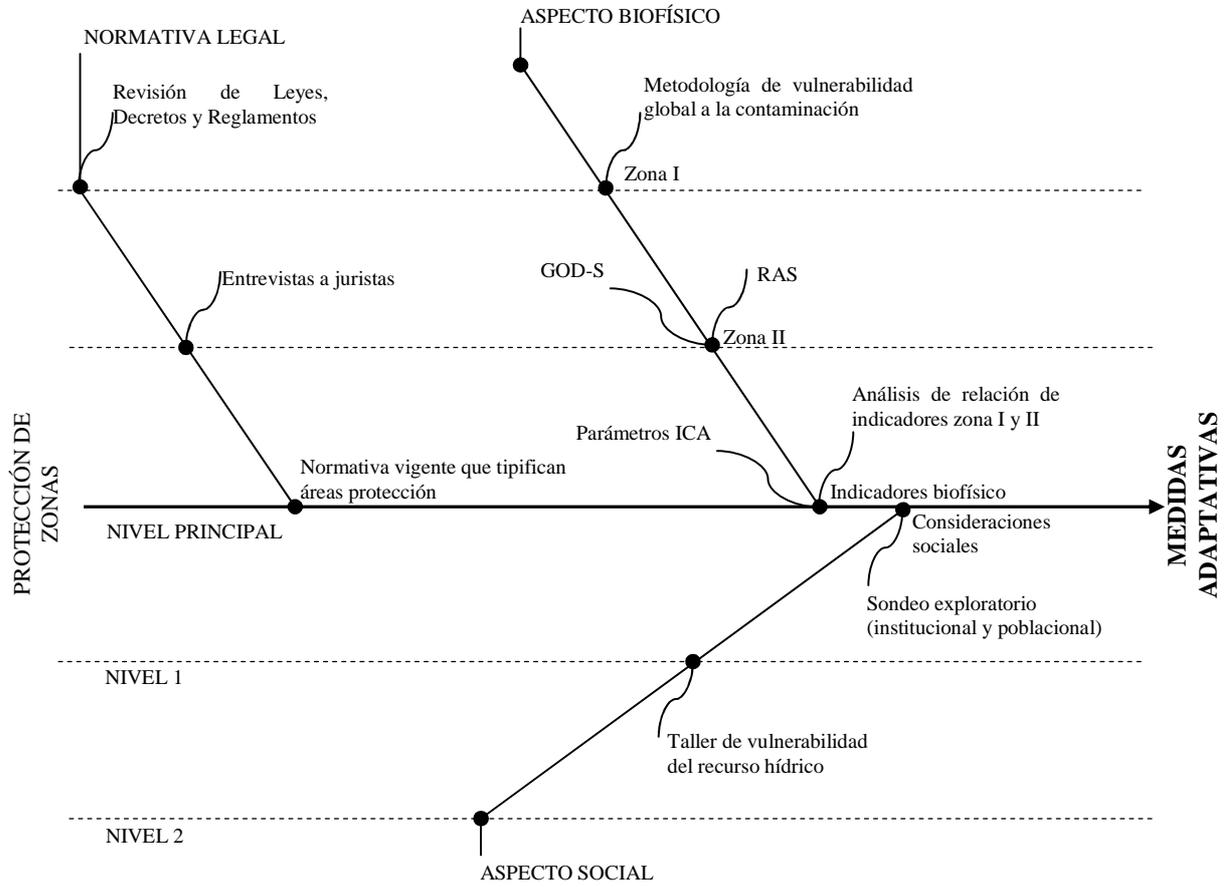


Figura 15. Ángulos de definición las medidas adaptativas de las zonas I y II

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización biofísica, socioeconómica y legal de la subcuenca del río Siquirres

La caracterización está dirigida fundamentalmente a cuantificar las variables que tipifican a la subcuenca con el fin de establecer la vocación, posibilidad y limitaciones de sus recursos naturales y el ambiente y las condiciones socioeconómicas de las comunidades que la habitan. En el proceso de manejo de cuencas, la caracterización cumple tres funciones fundamentales: 1) describir y tipificar las características principales de la cuenca; 2) sirve de información básica para definir y cuantificar el conjunto de indicadores que servirán de línea para el seguimiento, monitoreo y evaluación de resultados e impactos de los programas y proyectos de manejo de cuencas; y finalmente 3) sirve de base para el diagnóstico, donde se identifican y priorizan los principales problemas de la cuenca, se identifican sus causas, consecuencias y soluciones (Jiménez 2007).

4.1.1 Características físicas

4.1.1.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio o parte alta de la subcuenca presenta una extensión aproximada de 10,4 km² (1043 ha), 16,43 km de perímetro, localizada en las hojas topográficas (Bonilla 3446 II NE y 3446 II SE) a escala 1:250.00. Limita al norte con la ciudad de Siquirres, al este con el Alto Berlín, al oeste con el río Reventazón y al sur con Alto de Guayacán, con altitudes que varían desde los 500 - 720 msnm. Sin embargo, con el propósito de obtener una máxima protección a las fuentes de aguas y áreas de recarga se consideró definir una área más allá de los límites del área de estudio o de la parte alta de la subcuenca, definida como la área de evaluación porque corresponde al marco de referencia para la delimitación y estimación de las zonas I y II. El área de evaluación tiene una extensión aproximada de 31,45 km² (3145 ha), 24,14 km de perímetro.

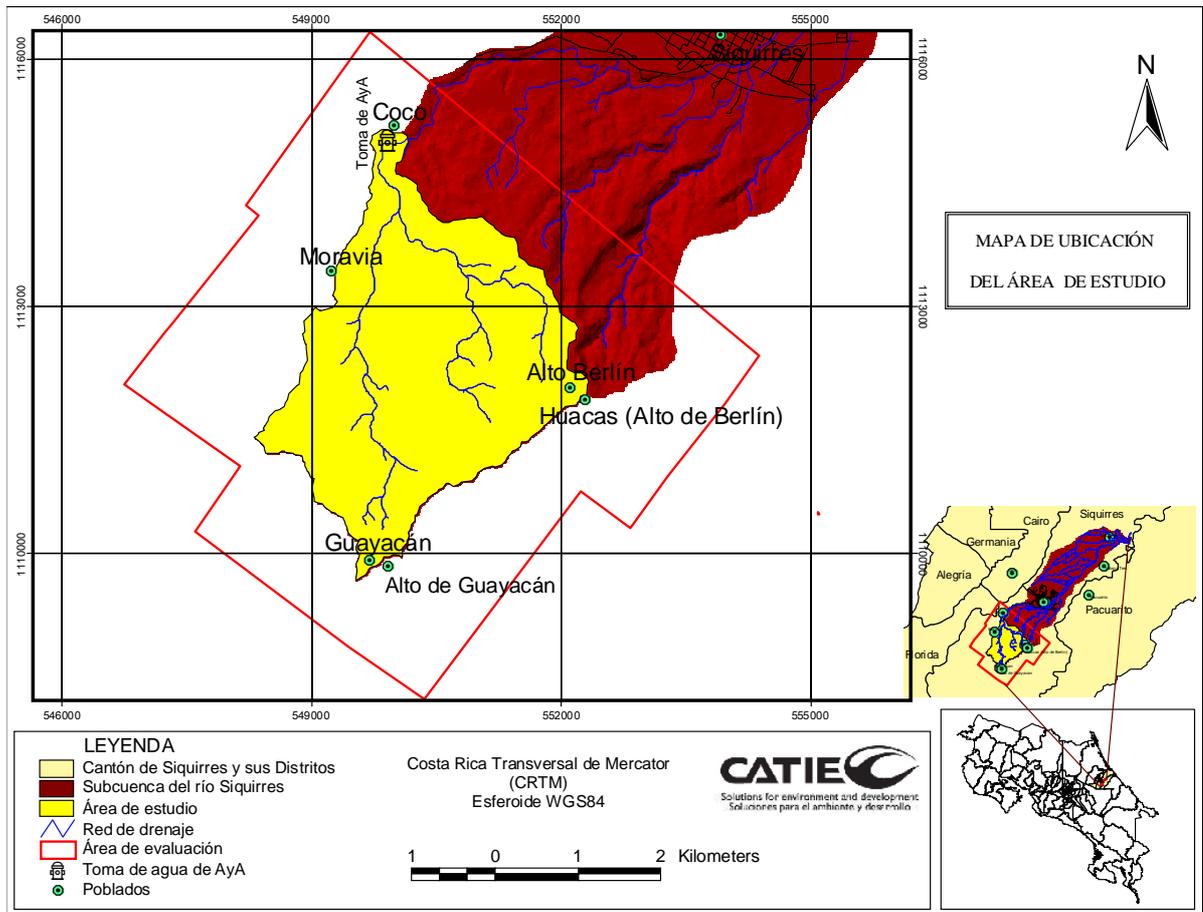


Figura 16. Mapa de ubicación del área de estudio y área de evaluación

4.1.1.2 Características morfométrica e hidrología

Elevación media: la subcuenca presenta una elevación media de 189,2 msnm, tal y como se muestra en la curva hipsométrica (Figura 17). Aproximadamente el 53,37% del área de la subcuenca se ubica en los rangos de elevaciones de 10 - 60 msnm; mientras que el restante (46,6%) corresponde a los rangos que varían de los 60 - 770 msnm. Según Villón (2004), la curva hipsométrica representa la relación entre la altitud y la superficie de la cuenca que queda sobre esa altitud. Referente al área de estudio, esta posee un amplio rango de altitudes (190 - 770 msnm), existiendo una mayor probabilidad de lluvias con intensidades fuertes y prolongadas, respecto a la parte baja de la subcuenca (ciudad de Siquirres hacia la desembocadura del río), con altitudes inferiores a la 60 msnm.

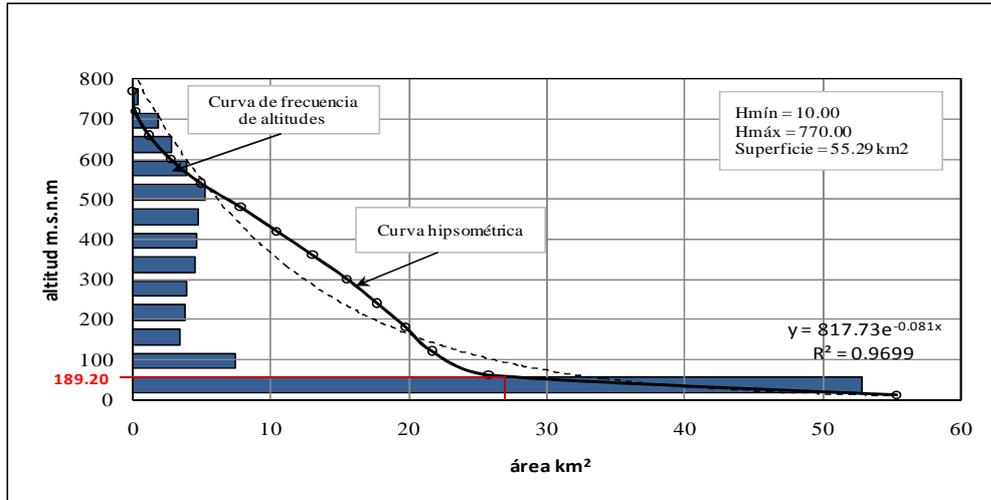
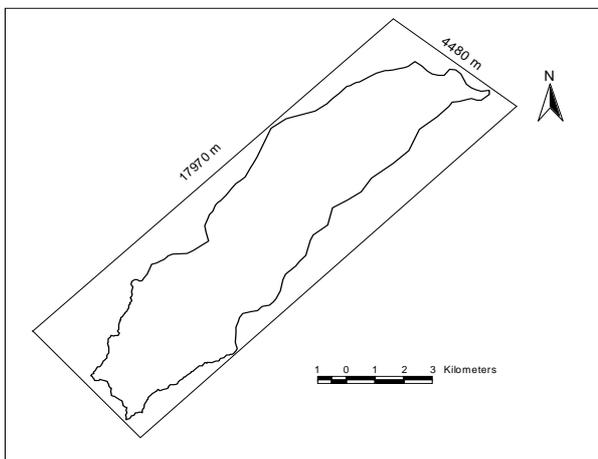


Figura 17. Curva hipsométrica de la subcuenca río Siquirres

De acuerdo a la Figura 17, es notoria la existencia de una fuerte inclinación desde la parte media hacia la parte alta en relación con la superficie que esta abarca. Evidenciando, la formación de rápidos escurrimientos superficiales en esta zona, como resultante de una fuerte y prolongada precipitación y peligros de contaminación aguas abajo, si este es depositado o lixiviado en la parte alta.

4.1.1.3 Parámetros de forma

La subcuenca presenta forma oblonga ($Gravelius = 1,67$. Figura 18). Esta representación hace que el agua discorra en general por un solo cauce principal, por lo que la duración del escurrimiento superficial que se generan se concentran más lentamente, reduciendo las probabilidades de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta.



Cálculo del índice de Gravelius de la subcuenca del río Siquirres:

$$C_g = 1,67$$

Figura 18. Forma y cálculo del índice de Gravelius de la subcuenca río Siquirres

En definitiva, el índice de compacidad (índice de Gravelius) trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la esorrentía, particularmente en las características del hidrograma (Villón 2004). Para este caso $C_g = K$ es > 1 , indicando que la forma alargada de subcuenca reduce las probabilidades de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que puede afectar el tipo de respuestas que se presenta en el río.

4.1.1.4 Parámetros de relieve en relación con la erosión

Según TRAGSA et al. (1998), es evidente el carácter determinante que toma el relieve en el fenómeno erosivo. Entre los índices más utilizados que destacan esta relación, están:

a) El coeficiente de masividad (F. Fournier): es de 3,4 m/km². Este coeficiente permite diferenciar netamente cuencas de igual altura media y relieve distintos, aun cuando no es suficiente para caracterizar la proclividad a la erosión de una cuenca, pues da valores iguales en el caso de las cuencas diferenciadas.

b) Coeficiente orográfico (F. Fournier): es de 11,3 definiendo al relieve como accidentado. Este índice combina los dos parámetros del relieve actuantes en los procesos erosivos: 1) la altura media, sobre la energía potencial del agua; y 2) la inclinación característica de las laderas de la subcuenca, sobre la energía cinética del flujo de la esorrentía superficial (TRAGSA et al. 1998).

4.1.1.5 Parámetros relativos a la red hidrográfica

Se entiende por red hidrográfica al drenaje natural permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales y subterráneos de una cuenca (TRAGSA et al. 1998), entre los parámetros calculados se mencionan:

a) Orden de las corrientes y densidad drenaje: la subcuenca presenta 5 órdenes de corrientes perennes e intermitentes con 2,4 km de densidad de drenaje. Según Villón (2004), la densidad de drenaje es un parámetro que indica la posible naturaleza de los suelos que se encuentran en una cuenca y da una idea sobre el grado de la cobertura existente. Cuando mayor sea la densidad de drenaje, más rápido será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menor tiempo.

b) Pendiente media del cauce principal: es de aproximadamente 3,57% y una longitud de 23,3 km, con elevaciones máximas de 640 y mínimas de 10 msnm. Otros resultados de importancia para el presente estudio, muestra una pendiente media desde la ciudad de Siquirres a la parte alta de la subcuenca (alto de Guayacán) de 13,1% con rangos de pendientes mínimas de 1,7 - 3% y valores máximos de 84,9%.

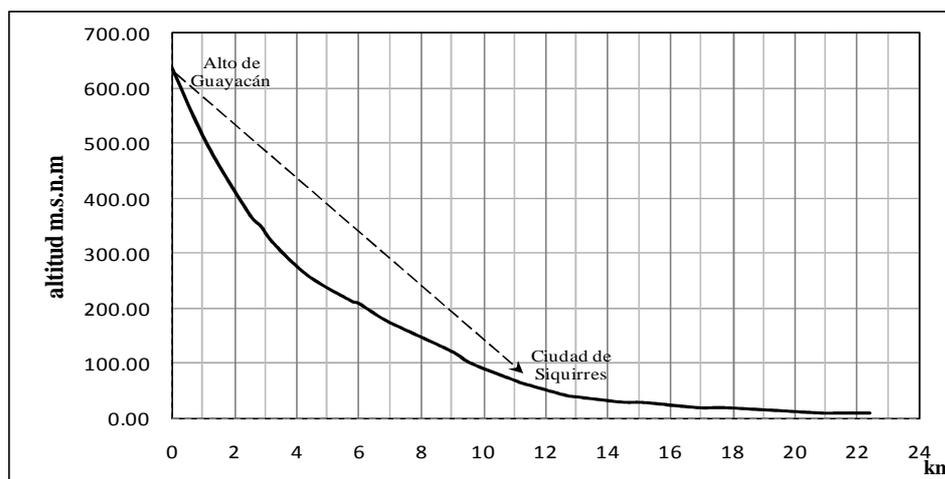


Figura 19. Perfil longitudinal de la subcuenca río Siquirres

4.1.2 Características biofísicas

4.1.2.1 Precipitación

El Cantón de Siquirres desde el punto de vista climatológico se encuentra durante todo el año bajo la influencia de las masas de aire provenientes del Atlántico, el cual se despliega desde el litoral Caribe hasta aproximadamente la divisoria de aguas continentales del país a unos 2200 msnm. El régimen costero Atlántico, no muestra una estación seca a lo largo del año, solamente presenta un descenso de precipitación durante los meses de marzo a abril, y en septiembre a octubre. En ningún mes del año la precipitación promedio está por debajo de la evapotranspiración promedio mensual (Herrera 1985).

De acuerdo a la información de las 16 estaciones meteorológicas tomadas de la base de datos del programa FAOCLIM, para un periodo máximo de 30 años y un mínimo de 5 años (Cuadro 24). La precipitación media anual de la subcuenca, computada en el programa ArcView 3,3 a partir de la interpolación del inverso de la distancia ponderada (IDW) es de 3485 mm,

presentando los valores máximos en la parte alta (áreas de las nacientes y ojos de agua) con 3914 mm y valores mínimos en la parte baja de 3184 mm. Existiendo una diferencia de precipitación de 729 mm en tan solo una distancia aproximada de 8,6 km, esto probablemente se deban a las diferencias de cotas mostradas en la Figura 19 (cotas de 10 - 640 msnm). La Figura 20 expone la distribución espacial de la precipitación.

Cuadro 24. Precipitación media mensual y anual (mm) de 16 estaciones meteorológicas

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec. total
BATAAN	295	202	170	239	256	234	360	308	183	243	333	325	3148
CAIRO	284	218	161	214	382	369	408	271	203	334	395	432	3671
GOOD-HOPE	267	202	158	194	278	267	346	263	114	238	374	474	3175
GOSCHEN	311	165	168	189	302	179	336	256	88	179	372	439	2984
GUÁCIMO	257	158	159	180	287	291	386	252	220	262	332	340	3124
HACIENDA-EL-CARMEN	291	209	141	208	246	341	479	400	232	257	432	388	3624
INDIANA	263	181	159	164	276	260	385	296	154	149	342	427	3056
LA-AMISTAD	316	198	156	219	277	338	387	390	306	343	368	415	3713
LA-FLORIDA	182	122	134	294	279	283	339	257	197	285	390	407	3169
LA-LOLA	314	203	167	243	265	310	419	312	213	255	445	489	3635
LOMAS	269	210	170	232	389	375	430	311	236	365	406	526	3919
PERALTA	255	185	168	254	501	406	488	359	239	404	391	436	4086
RIO-JIMÉNEZ	262	168	181	217	246	303	416	348	227	257	548	457	3630
SAN-ALBERTO	269	192	173	176	297	224	376	268	121	237	379	483	3195
SIQUIRRES	277	198	145	259	246	370	387	373	262	314	419	441	3691
WILLIAMSBURG	270	181	169	219	311	335	426	365	265	284	415	368	3608
Promedio	274	187	161	219	302	305	398	314	204	275	396	428	3464

En el Cuadro 24 se observa que los mayores promedios mensuales de precipitaciones se presentan en los meses de julio, noviembre y diciembre, y los menores promedios entre los meses de febrero, marzo y parte de abril.

De acuerdo a Hernández (2005), las lluvias máximas en 24 horas con periodos de retorno de dos años pueden alcanzar montos significativos de entre 100 - 125 mm y en algunas zonas hasta 150 mm, indicando que en condiciones de suelos saturados fácilmente pueden provocar inundaciones. De acuerdo al régimen climático dominante en la subcuenca, esta corresponde a las características de un clima de tipo Af²⁶ de la clasificación Köppen.

²⁶ La letra A corresponde a climas tropicales (lluviosos tropical, bosque tropical) con temperaturas promedio superior a 18 °C, la precipitación anual es abundante y excede a la evaporación y f significa clima tropical de pluvisilva (lluvioso todo el año) representa un régimen húmedo, con precipitación regular y constante durante todo los meses del año.

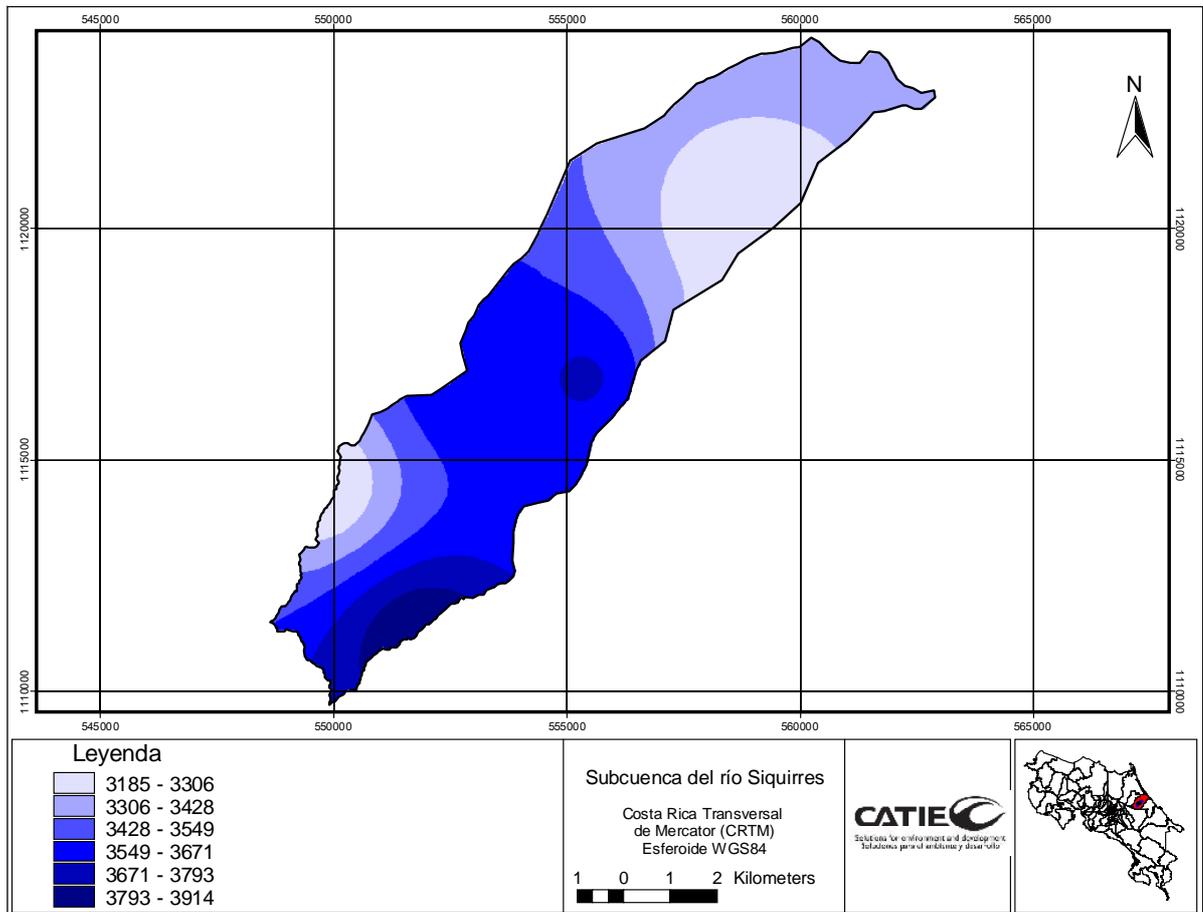


Figura 20. Mapa de distribución espacial de la precipitación de la subcuenca del río Siquirres

4.1.2.2 Temperatura y evapotranspiración potencial

De acuerdo a las 16 estaciones meteorológicas tomada de la base de datos del programa FAOCLIM, la temperatura media anual es de 25,5 °C (Cuadro 25). De acuerdo a la clasificación de Hernández et al. (2007), la subcuenca está establecida en las zonas climáticas A y B: la primera zona (A) comprendida entre la parte media y parte baja (centro urbano de Siquirres hacia la desembocadura del río del mismo nombre), presenta una temperatura media anual de 26 °C con valores mínimos de 21 °C, máximas de 30 °C y con una variación anual de 1,83 °C; la segunda zona (B) correspondiente a la parte alta de la subcuenca (límite del centro urbano de Siquirres hacia las zonas del alto Guayacán), ostenta una temperatura media anual de 23 °C con mínimos de 19 °C, máximas de 28 °C, y una variación anual de 1,78 °C.

Cuadro 25. Temperatura media mensual y anual (°C) de 16 estaciones meteorológicas

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media total
BATAAN	25,8	26,0	27,4	27,8	27,2	26,4	26,6	26,2	25,9	25,7	25,3	25,3	26,3
CAIRO	23,2	23,4	23,6	24,0	23,8	24,8	24,3	24,6	24,6	24,2	22,6	22,1	23,8
GOOD-HOPE	25,5	26,1	27,2	27,8	27,2	26,1	26,6	26,1	25,5	25,5	25,0	25,0	26,1
GOSCHEN	25,9	26,1	27,5	27,9	27,3	26,5	26,7	26,3	26,0	25,8	25,4	25,4	26,4
GUÁCIMO	25,4	25,6	27,0	27,4	26,8	26,0	26,2	25,8	25,5	25,3	24,9	24,9	25,9
HACIENDA-EL-CARMEN	24,3	24,3	24,8	25,2	26,1	25,9	25,5	25,7	26,0	25,4	24,8	24,0	25,2
INDIANA	25,7	25,9	27,3	27,7	27,1	26,3	26,5	26,1	25,8	25,6	25,2	25,2	26,2
LA-AMISTAD	23,1	23,4	24,5	25,0	24,5	23,8	24,0	23,7	23,4	23,2	22,8	22,7	23,7
LA-FLORIDA	25,1	25,3	26,6	27,0	26,5	25,7	25,9	25,5	25,2	25,0	24,6	24,6	25,6
LA-LOLA	23,8	24,0	24,6	25,2	26,1	26,2	25,5	25,8	26,2	25,7	25,2	24,6	25,2
LOMAS	22,9	23,5	24,6	25,2	24,6	23,5	24,0	23,5	22,9	22,9	22,4	22,4	23,5
PERALTA	24,1	24,7	25,8	26,3	25,8	24,7	24,2	24,7	24,1	24,1	23,6	23,6	24,6
RIO-JIMÉNEZ	25,8	26,0	27,4	27,8	27,2	26,4	26,6	26,2	25,9	25,7	25,3	25,3	26,3
SAN-ALBERTO	25,7	25,9	27,3	27,7	27,1	26,3	26,5	26,1	25,8	25,6	25,2	25,2	26,2
SIQUIRRES	25,8	26,3	27,4	28,0	27,4	26,3	26,9	26,3	25,8	25,8	25,2	25,2	26,4
WILLIAMSBURG	25,4	25,6	26,9	27,3	26,8	26,0	26,2	25,8	25,5	25,3	24,9	24,9	25,9
Promedio	24,8	25,1	26,2	26,7	26,3	25,7	25,8	25,5	25,3	25,1	24,5	24,4	25,5

Utilizando los datos de las temperaturas medias anuales y a través del método Thornthwaite se estimó la evapotranspiración potencial (ETP) corregida de la subcuenca (Cuadro 26 y Figura 21). De acuerdo a Villón (2004), el método puede ser aplicado con relativa confianza en regiones húmedas de Costa Rica.

Cuadro 26. Evapotranspiración media y anual (Thornthwaite) de la subcuenca río Siquirres

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ETP media	ETP total
BATAAN	118,8	113,4	155,5	164,0	158,7	139,7	146,3	137,2	125,4	121,9	110,6	111,7	133,6	1603
CAIRO	90,3	86,0	98,7	104,8	107,3	118,7	113,9	117,0	111,5	106,3	83,7	79,2	101,5	1217
GOOD-HOPE	114,3	115,4	151,5	163,9	158,9	134,4	146,6	135,7	119,0	119,0	106,4	107,5	131,0	1572
GOSCHEN	120,2	114,8	160,1	166,2	160,8	141,4	148,2	138,8	126,9	123,3	111,8	113,0	135,5	1625
GUÁCIMO	113,4	108,2	147,7	155,6	150,9	133,1	139,4	130,8	119,6	116,4	105,7	106,8	127,3	1527
HACIENDA-EL-CARMEN	99,6	92,5	128,3	118,0	138,8	132,9	128,6	130,7	129,5	119,9	106,5	96,5	118,5	1421
INDIANA	117,4	112,1	153,5	161,8	156,7	138,0	144,5	135,5	123,9	120,4	109,3	110,4	132,0	1583
LA-AMISTAD	89,5	86,3	97,8	118,2	116,9	105,5	110,2	105,2	96,7	94,3	86,2	86,0	99,4	1192
LA-FLORIDA	109,7	104,6	140,6	147,9	145,5	128,6	134,5	126,4	115,7	112,6	102,4	103,4	122,7	1472
LA-LOLA	92,7	88,5	131,7	117,8	138,7	137,9	128,4	132,3	132,7	124,5	112,1	104,5	120,1	1441
LOMAS	87,7	87,7	113,1	121,2	118,6	102,2	110,5	103,1	91,3	91,3	82,4	83,2	99,4	1192
PERALTA	98,5	98,9	137,5	136,3	134,6	115,2	110,0	116,2	102,6	102,6	92,3	93,2	111,5	1337
RIO-JIMÉNEZ	118,8	113,4	155,5	164,0	158,7	139,7	146,3	137,2	125,4	121,9	110,6	111,7	133,6	1603
SAN-ALBERTO	117,4	112,1	152,3	161,8	156,7	138,0	144,5	135,5	123,9	120,4	109,3	110,4	131,9	1582
SIQUIRRES	118,6	118,1	155,5	168,4	163,0	137,6	152,3	138,9	123,4	123,4	108,7	109,9	134,8	1617
WILLIAMSBURG	113,4	108,3	141,0	153,6	150,9	133,2	139,4	130,8	119,7	116,4	105,8	106,8	126,6	1519
Promedio	107,5	103,8	138,8	145,2	144,7	129,8	134,0	128,2	117,9	114,7	102,7	102,1	122,5	1469

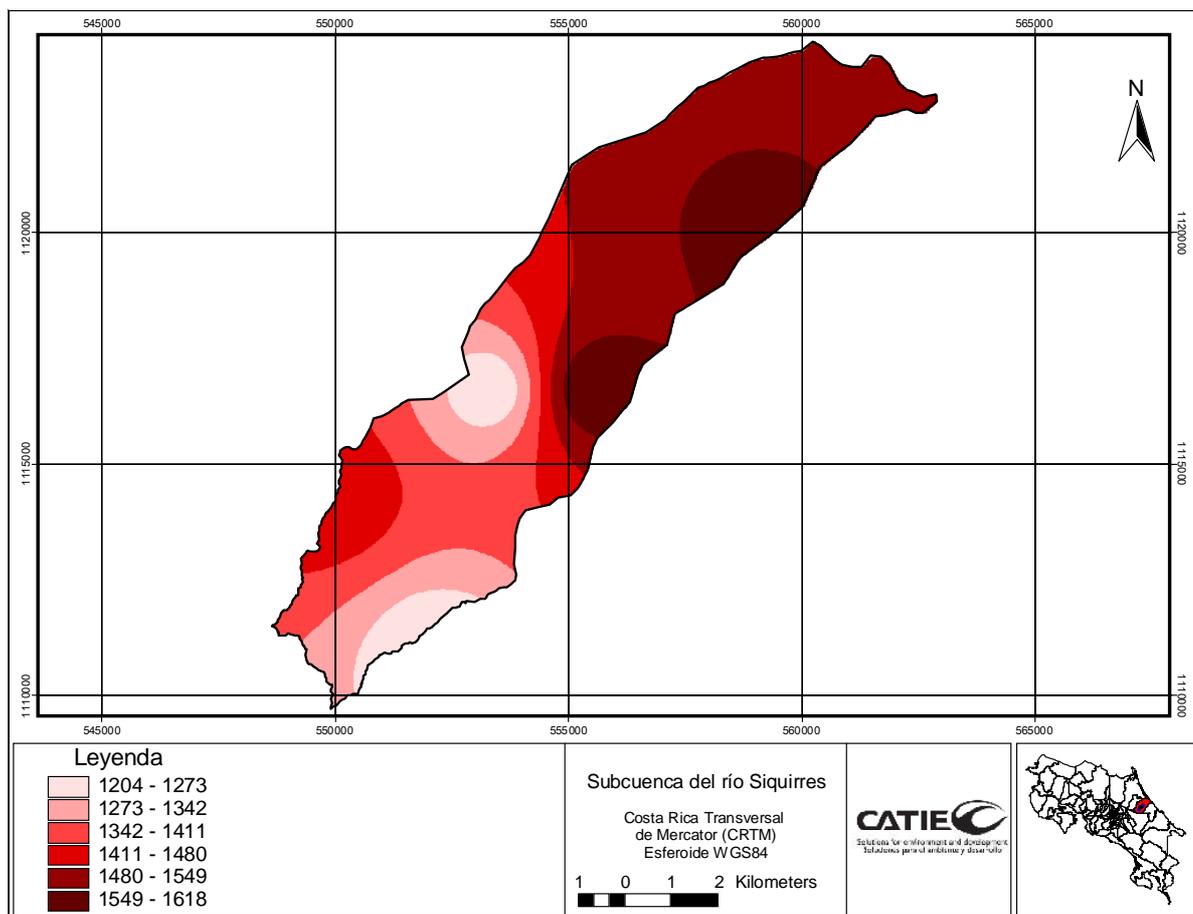


Figura 21. Mapa de distribución espacial de la evapotranspiración de la subcuenca del río Siquirres

4.1.2.3 Vientos, brillo solar y humedad relativa

Basado en la información del Plan Regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico físico ambiental del Cantón de Siquirres UNA (2008a), se describe a nivel distrital los siguientes parámetros climáticos.

Vientos: las velocidades máximas de vientos de la parte baja del Cantón de Siquirres son relativamente débiles, con promedios diarios y mensuales que oscilan entre 5,3 - 8,3 km/h a 3,2 - 5,7 km/h, y en las zonas altas los promedios diarios varían de 9 - 15 km/h. Las velocidades más altas se presentan en horas de la tarde durante la época de diciembre a mayo y estas disminuyen en el periodo que va de junio a noviembre. La dirección predominante en época de menor precipitación es del noreste y en menor proporción del este y oeste, en general durante todo el año predominan los vientos alisios del norte, noreste y este.

Brillo solar: para la vertiente del Caribe (Herrera 1998) el brillo solar alcanza 4,2 horas por día, con un promedio de 3 horas en junio, hasta 5 horas en marzo. En Siquirres el promedio de horas sol es de 4,9 por día, oscilando de enero a mayo con un promedio de 5,54 horas y de junio a diciembre de 4,44 horas/día.

Humedad relativa: fluctúa entre 85 y 90% en Siquirres, en las zonas montañosas puede alcanzar el 90% y se debe a un descenso de las temperaturas por el incremento de las precipitaciones. En las llanuras y zonas costeras (parte baja de la subcuenca) la humedad relativa tiende a subir de mayo a enero, con un leve descenso en septiembre y octubre. Durante febrero, marzo y abril, desciende un 5%, en relación a otros periodos (Herrera 1988).

4.1.2.4 Pendiente y relieve

Sobre la base de la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica (MAG-MIRENEM 1995), la subcuenca fue clasificada en siete categorías de pendiente en función del relieve. Resultando la siguiente distribución porcentual del área total: pendiente con categoría plana a casi plana (0 - 3%), representa el relieve predominante con un 58,6% (32,4 km²) conteniendo la parte media y baja de la subcuenca (incumbe la ciudad de Siquirres hacia la desembocadura del río); en segundo lugar se presentan las pendientes con relieve de categorías ondulado (15 - 30%) a fuertemente ondulo (30 - 60%) con 13,84 y 13,94% establecidas en la parte media y alta; y finalmente las categorías clasificadas como ligeramente ondulado (3 - 8%), moderadamente ondulado (8 - 15%), escarpado (60 - 75%) y fuertemente escarpado (> 75%) en total cubren un 13,61% del área total. Cálculo basado en la estimación realizada a través del programa ArcView 3,3, donde la pendiente media de la subcuenca es aproximadamente de 12,87% con pendientes mínimas de 1,4 y máximas de 83,7%.

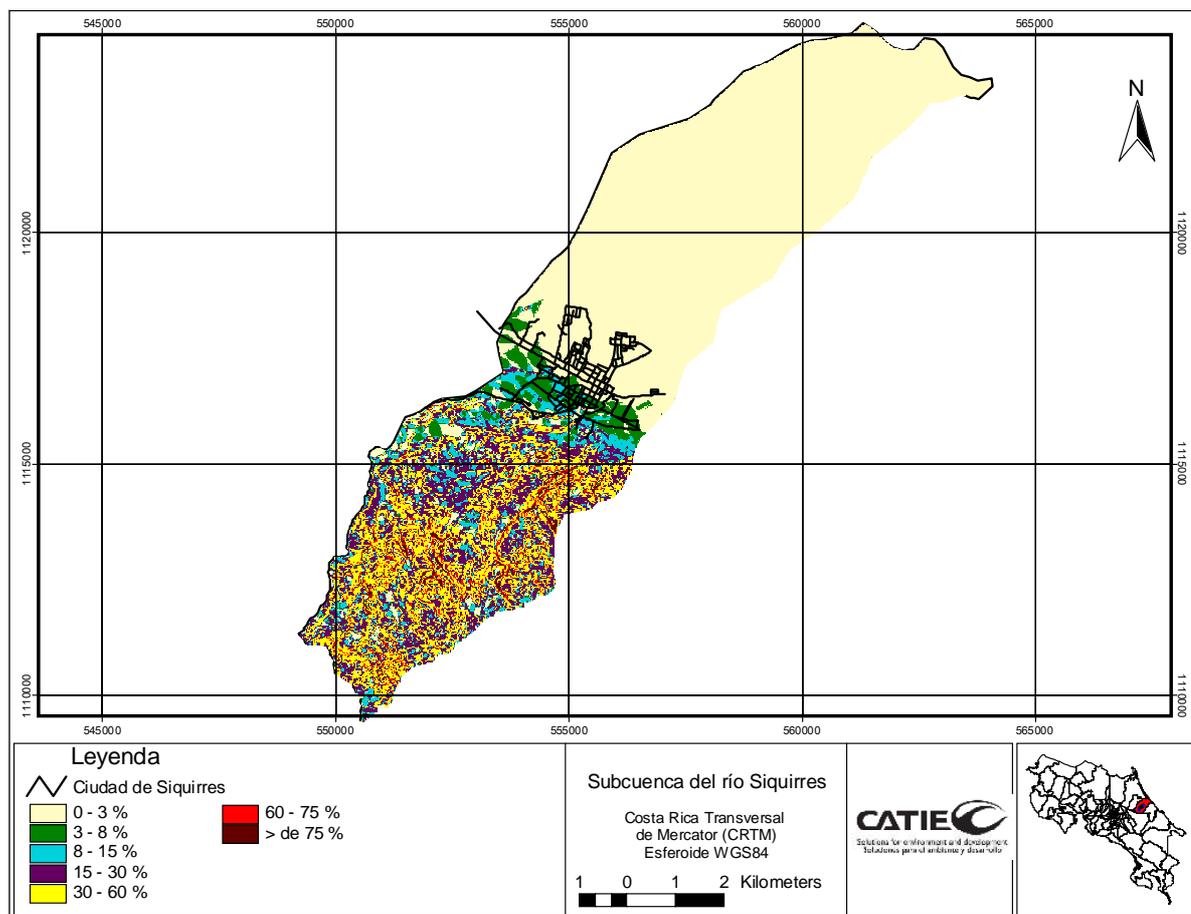


Figura 22. Mapa de porcentaje de pendiente de la subcuenca de río Siquirres

4.1.2.5 Geomorfología

En la subcuenca se distinguen seis clases de unidades geomorfológicas que por su origen se deben a procesos aluviales de origen tectónico y erosivo de origen volcánico, a remoción en masa y a litoral de origen marino (Figura 23). Las unidades geomorfológicas de la subcuenca corresponden (UNA 2008a):

- Unidad de sedimentación aluvial **F8b** (*llanura aluvial y/o coalescencia de abanicos aluviales*): abarca el 13,14% (7,3 km²) del área total. La unidad presenta una superficie plana con sitios localizados de ligeramente ondulado (gran parte de esta ondulación es ocasionada por un *paleorelieve*) y tiene por efecto erosión de forma de lomeríos bajos, sobre las cuales se depositan materiales aluviales recientes. Las inundaciones es el peligro natural potencial asociado con esta morfología.

- Unidad **F3** (*terrazas aluviales*): comprende 2,66% (1,5 km²) del área total. La unidad representa depósitos de materiales aluvionales ubicadas en la desembocadura del río Siquirres, y en varias secciones del cauce del río Reventazón y Pacuare. Las inundaciones es el peligro natural potencial asociado con esta morfología.

- Unidad **F12** (*abanico aluvial activo*): representa un 4,42% (2,45 km²) del área total. La unidad sirve de asiento a la ciudad de Siquirres y ha sido formada por los depósitos aluviales provenientes de procesos de erosión ocurridos a lo largo de la subcuenca hidrográfica del río Siquirres. En comparación con unidades morfológicas similares presentes en el Cantón, esta carece de extensión y exhibe una forma convexa, de pendientes suaves a laderas ligeramente inclinadas. Las inundaciones es el peligro natural potencial asociado con esta morfología.

- Unidad **F5** (*abanicos aluvial*): comprende el 29,7% (16,44 km²) del área total. Este curso fluvial representa también el vertido del abanico, y tiene un patrón de drenaje dicotómico que se expresa en una densidad de drenaje media a alta. La unidad en sí tiene pendiente suave y de forma convexa, y parte de su límite se expresa mediante un profundo corte que realiza el río Reventazón. Las inundaciones es el peligro natural potencial asociado con esta morfología.

- Unidad **D4** (*colinas y laderas denudacionales*): es la unidad morfológica más extensa de las delimitadas en la subcuenca y abarca el 38,6% (21,32 km²). Constituye una unidad morfológica altamente disectada en concordancia con materiales de las formaciones Suretka y río Banano. La topografía responde precisamente a su conformación geológica, es decir materiales muy meteorizados, inestables por el efecto lubricante que ejercen las aguas pluviales sobre terrenos arcillificados y por lo tanto, favorecedores del entalle vertical de los cursos fluviales con interfluvios que van de amplitud moderada a cortos.

La forma de las pendientes por tanto se corresponde con esta descripción, observándose una combinación de forma cóncava y convexa, cuya correspondencia se asocia en principio a afloramientos rocosos y a procesos de erosión en áreas en donde la pendiente lo favorezca. Inestabilidad de laderas en áreas adyacentes al río Siquirres corresponde el peligro natural potencial asociado a esta morfología.

- Unidad **F10** (áreas con amenazas por inundación): corresponde a la zona ribereña de la parte baja o desembocadura del río Siquirres, representando un 11,5% (6,34 km²) del área total. Eminentemente las inundaciones constituyen el peligro natural potencial asociado a esta morfología.

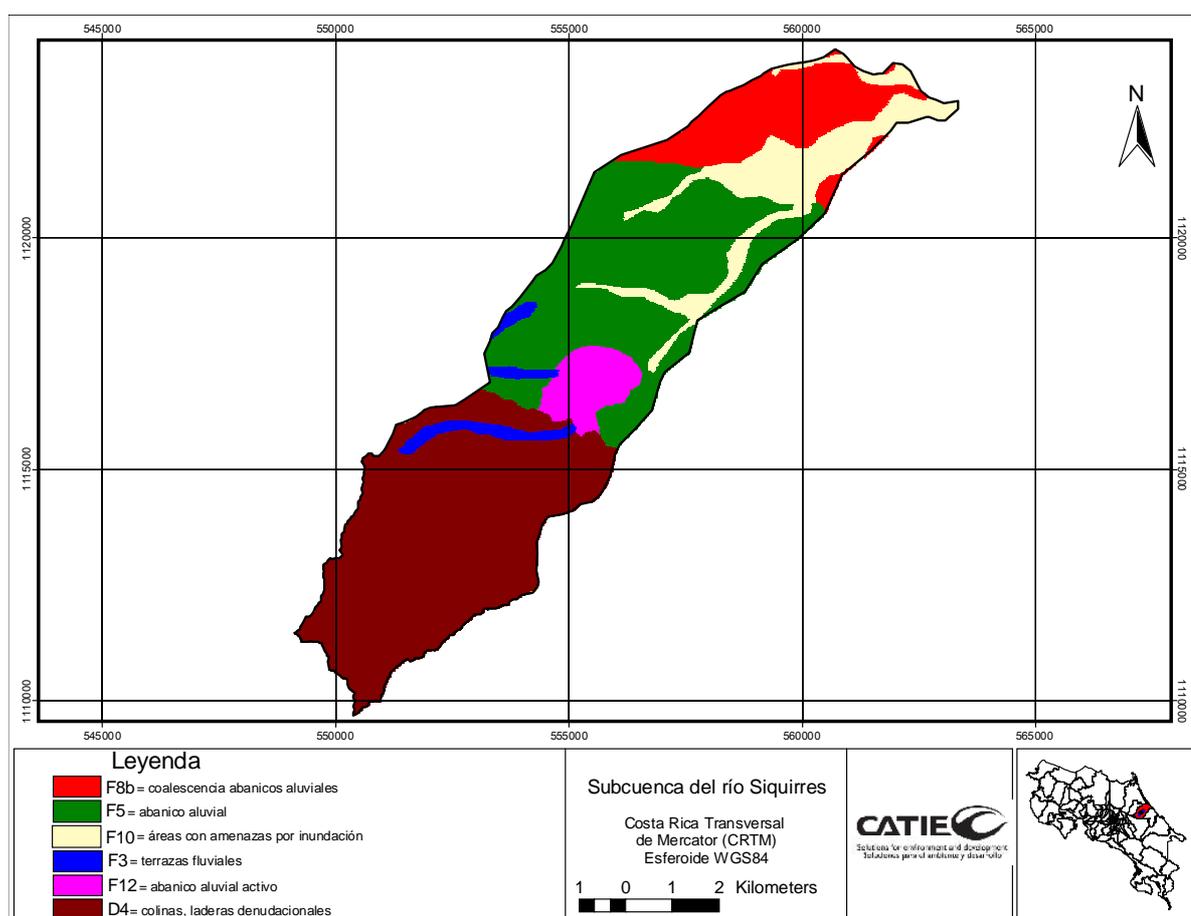


Figura 23. Mapa geomorfológico de la subcuenca del río Siquirres

4.1.2.6 Uso del suelo

La siguiente Figura 24 muestra la distribución porcentual del uso actual del suelo y la Figuras 25 su distribución en la subcuenca.

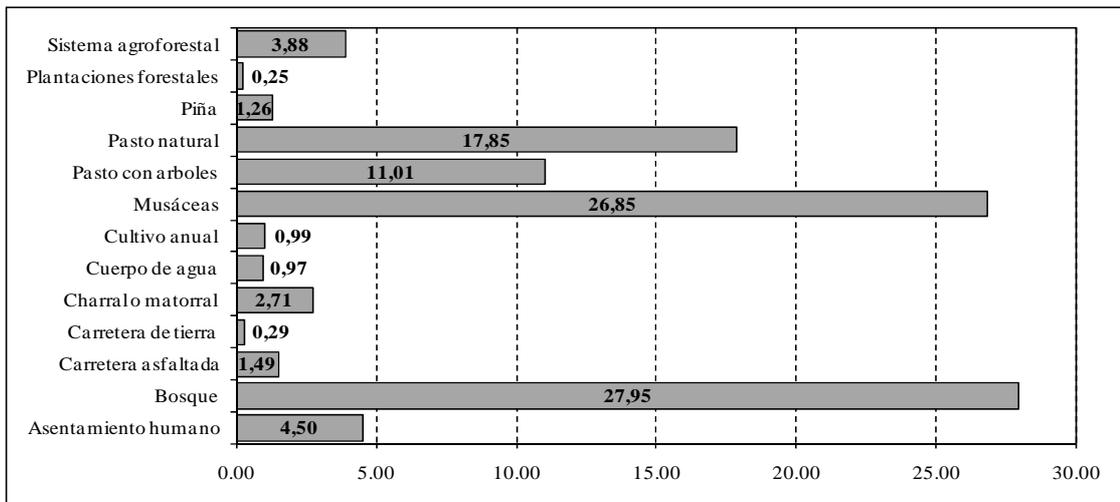


Figura 24. Distribución porcentual del uso actual del suelo en la subcuenca del río Siquirres

- Asentamiento humano: representa 2,49 km² (249,29 ha) del área total. Comprendido en su mayoría por el centro urbano o ciudad de Siquirres, y en menores extensiones los poblados del Coco, Moravia y Guayacán en la parte alta, y Indiana Tres y La Lucha en la parte baja de la subcuenca.
- Bosque: representa la mayor superficie con 15,47 km² (1547 ha), 178,48 km de perímetro del área total, debiéndose en parte a la existencias del áreas silvestre protegidas dentro del territorio cantonal correspondiente a la *Zona Protectora Cuenca río Siquirres* y *Reserva Forestal río Pacuare*. La unidad comprende bosque primarios (árboles mayores a 12 m de altura y cobertura de las copas entre 60 - 90%, ubicados en elevaciones a los 200 msnm) y bosque secundarios en conjuntos con áreas de arbustos y árboles dispersos, muy relacionada a la rivera del cauce principal y quebradas, constituyéndose en bosque de galería (UNA 2008a).
- Carretera asfaltada y de tierra: comprenden 0,98 km² del área total, aunque se considera una unidad de poca importancia es necesario estimarla, debido a que podría ser considerado en un futuro como un indicador del crecimiento urbano en las zonas boscosas de la subcuenca.
- Charral y matorral: ocupa 1,50 km² (149,72 ha), 42,8 km de perímetro del área total. La unidad corresponde a áreas en barbecho y potreros abandonados con más de tres años, se localizan en espacios circundantes a las principales manchas de bosque primarios.

- Cuerpo de agua: comprende los cauces del río Siquirres y áreas relacionadas como terrazas y bancos de arena, meandros abandonados y pequeñas lagunas. Ocupan aproximadamente 0,54 km² (53,73 ha) del área total.

- Cultivo anual: comprende una superficie muy reducida en relación al área total de la subcuenca con 0,55 km². Constituida principalmente por parcelas de maíz, cultivados en su mayoría en terrenos inclinados y en las laderas de los cerros de formas irregulares. Los cultivos de hortalizas no se desarrollan de manera extensiva, se practican sobre reducidas parcelas de forma muy dispersa.

- Musáceas: después del bosque es la unidad que ocupa la mayor superficie en la subcuenca con 14,86 km² (1486 ha), 192,32 km de perímetro del área total, según la UNA (2008a) las plantaciones de bananos alcanzan unas 9520 ha, lo que equivale a casi un 11% del área del Cantón. Las principales plantaciones se localizan hacia el noreste del centro urbano de Siquirres, sobre la zona de llanura flanqueada del río Pacuare.

- Pasto con árboles y pasto natural: en conjunto abarcan 15,97 km² del área total. La unidad de pasto con arboles; se constituye de áreas donde preexisten pastos naturales con árboles que pueden ocupar un 20 - 30% del área. En cambio la unidad de pastos naturales se relacionan a tierras dedicadas exclusivamente al pastoreo, por lo general por falta de un manejo adecuado poseen malezas y matorrales. La presencia de arboles es casi nula y se encuentran en forma de manchas de manera dispersa en la parte alta y media de la subcuenca.

- Piña: abarcan 0,7 km² (69,87 ha) en relación al área de la subcuenca; mientras que a nivel cantonal cubren 3000 ha, casi un 3,6% del territorio cantonal (UNA 2008a). Se extienden sobre terrenos de pendientes suaves o planas a ligeramente onduladas, ocupan los terrenos entre el centro urbano de Siquirres hacia la desembocadura del río Siquirres con el río Pacuare.

- Plantaciones forestales: son escasas en relación con el área total de la subcuenca, ocupan solamente 0,14 km² lo que equivale a 13,86 ha de Teca (*Tectona grandis*) ubicada en la parte alta conocido como Alto de Berlín. Existen además algunos pequeños espacios en los cuales

los cultivos corresponden con especies arbustivas, en algunos casos son cultivos y en otros corresponden con remanentes de vegetación natural del lugar.

- Sistema agroforestal: comprende 2,15 km² (214,8 ha) del área total. Este sistema concierne a arboles maderables y/o frutales en asociación con cultivos perennes y semiperennes principalmente el café (*Coffea arabica*), pejibayes (*Guillielma gasipaes* o *Bactris gasipaes*) y musáceas.

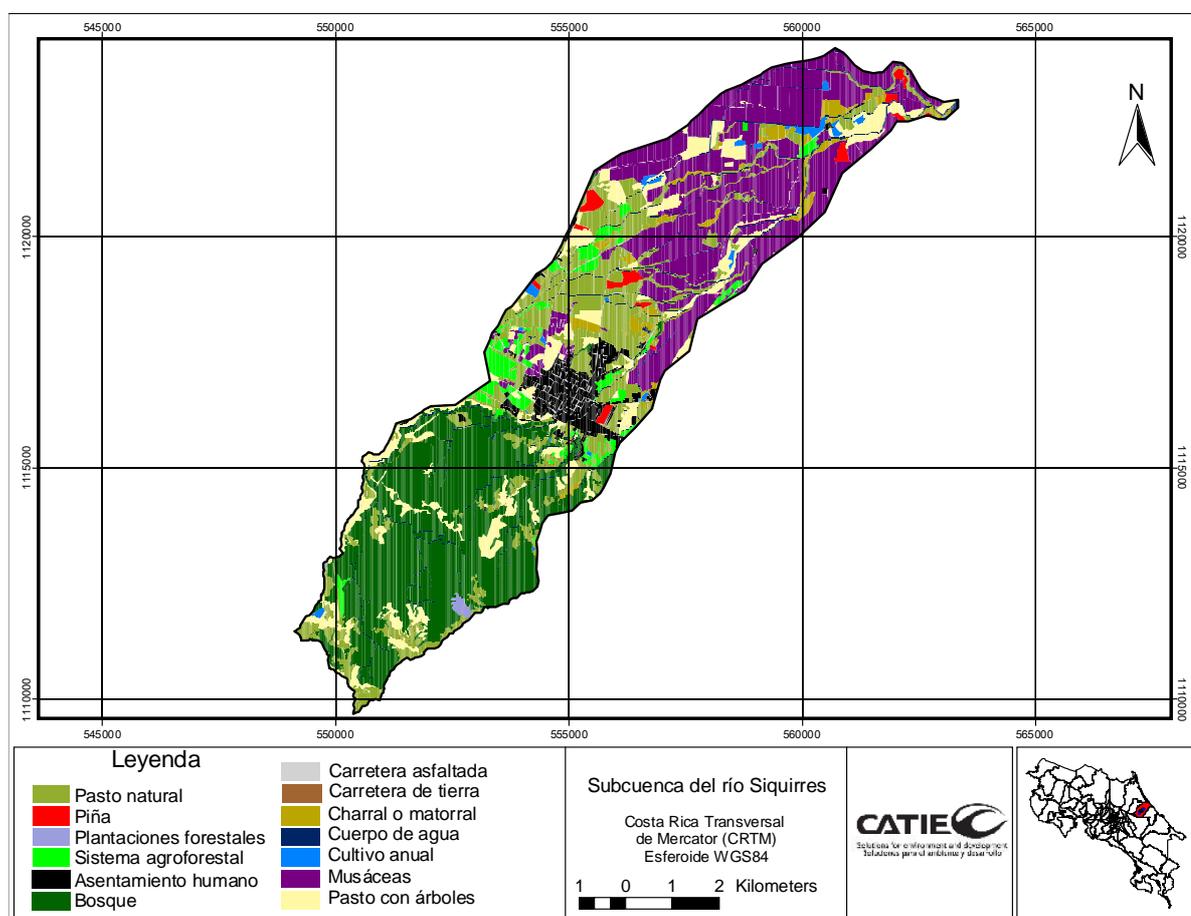


Figura 25. Mapa de uso del suelo en la subcuenca del río Siquirres

4.1.2.7 Áreas silvestres protegidas dentro del territorio cantonal de Siquirres

En el Figura 26 se muestran las áreas silvestres protegidas de mayor extensión correspondiente al Cantón de Siquirres, entre estas se nombran: *Reserva forestal río Pacuare* (protección de fuentes que abastecen de agua a las poblaciones urbanas de la ciudad de

Siquirres y pueblos aledaños con 9364 ha); *Reserva forestal cordillera volcánica central* (zona importancia de los ecosistemas del Cantón de Siquirres con 2484 ha, aunque solo abarca una parte dentro del Cantón); *Humedal lacustrico Bonilla y Bonillita* (zona importancia de los ecosistemas del Cantón de Siquirres con 788 ha); y *Zona protectora cuenca río Siquirres* (protección de fuentes que abastecen de agua a las poblaciones de la ciudad de Siquirres y pueblos aledaños, abarca 695 ha) (UNA 2008a).

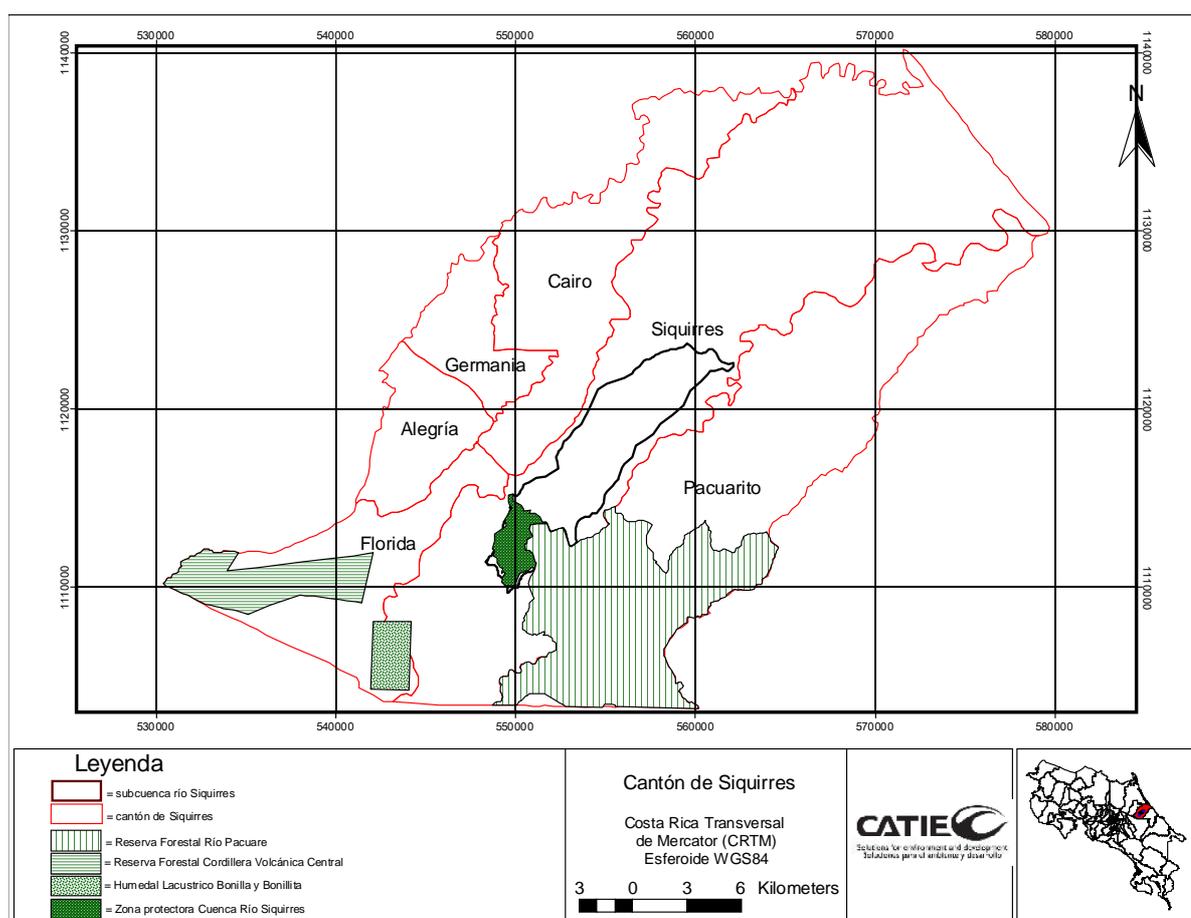


Figura 26. Mapa de áreas silvestre protegidas dentro del territorio cantonal de Siquirres

4.1.3 Aspecto socioeconómico de la subcuenca

4.1.3.1 Recopilación histórica del Cantón de Siquirres

Para entender los procesos de organización socioeconómico del espacio estudiado a nivel cantonal, la UNA (2008b) en su informe: síntesis del diagnóstico socioeconómico del

Cantón de Siquirres correspondiente al documento del Plan Regulador, realizó una descripción de cuatro épocas que marcan el inicio del Cantón. En el presente documento únicamente abordaremos los acontecimientos que caracterizan a cada época.

- *Primera época*: antes de 1543 y hasta 1651. Desde la llegada de los españoles hasta a finales del siglo XVIII.

- *Segunda época*: de 1871 a los años de 1930. Construcción del ferrocarril al puerto de Limón, creación del Cantón, fundación de la Villa de Siquirres y crisis del cultivo de banano.

- *Tercera época*: de la década de 1930 a los años setenta. Recomposición de la economía, recomposición del espacio, crecimiento demográfico y consolidación de la Villa como Ciudad de Siquirres.

- *Cuarta época*: 1970 - 2007, desde los programas de ajuste estructural hasta nuestros días. Lo más destacable del periodo actual es el proceso paulatino de desaparición de la agricultura campesina tradicional de consumo interno, la tendencia hacia el deterioro de la red vial y de la infraestructura urbana de la ciudad de Siquirres.

Para el caso específico del aspecto socioeconómico, el área de la subcuenca corresponde parcialmente a los sectores *Centro* y *Sur* del distrito Primero de Siquirres, tal y como se señala en el informe del Plan Regular (UNA 2008b). Ambos sectores se componen de 38 comunidades, no obstante las pertenecientes al sector *Central* ubicadas dentro de la subcuenca son: Betania, Indianas Dos, San Rafael, Siquirrito, INVU Nuevo, San Martín, La Amelia, Barrio María Auxiliadora (INVU Viejo), Brooklin, Laureles, Barrio Miraflor, Barrio El Triunfo y Barrio Nuevo. Y del sector *Sur* solamente corresponden las comunidades: Guayacán Moravia y el Coco.

4.1.3.2 Aspecto poblacional

Es necesario resaltar la falta de datos oficiales de la población que conforman las comunidades de la subcuenca, debido a que los datos estadísticas de INEC las exhiben por provincias, cantones y distritos, por tal razón la información poblacional presentada comprenderá el nivel distrital. Según INEC (2000) y la Dirección de Compras de Servicios de Salud (2006) la mayor cantidad de población del Cantón de Siquirres se concentra en el distrito Primero con un 59,83 y 58,34%, ubicados en el área urbana del Cantón y la subcuenca

del río Siquirres. A través de las fuentes mencionadas se da a conocer las cantidades de habitantes por distritos (Cuadro 27).

Cuadro 27. Población del distrito primero de Siquirres

Distritos del Cantón de Siquirres	Total de habitantes		Relación (Hombres/Mujeres)		Porcentaje		Edad promedio (INEC 2000)
	INEC (2000)	Direc. Comp. de Servicios de Saludo (2006)	INEC (2000)	Direc. Comp. de Servicios de Saludo (2006)	INEC (2000)	Direc. Comp. de Servicios de Saludo (2006)	
Siquirres	31358	34789	0,93	0,90	59,83	58,34	25
Pacuarito	8707	10325	0,86	0,82	16,61	17,32	23
Florida	1964	1845	0,94	0,97	3,75	3,09	25
Germania	2425	2867	0,88	0,87	4,63	4,81	27
El Cairo	4355	5116	0,91	0,93	8,31	8,58	26
Alegría	3600	4688	0,92	0,91	6,87	7,86	25
Cantón Σ	52409	59631	1,09	0,88	100,00	100,00	---

Fuente: Dirección de Compras de Servicios de Salud (2006); INEC (2000).

De acuerdo a INEC (2000) del total de la población del distrito Primero (31358), 15259 pertenecen a la población urbana y 16099 a la rural, con un PEA²⁷ de 10168, un PEI²⁸ de 11875, una densidad poblacional de 84 habitantes por km², un TIA²⁹ de 3,64 y TDP³⁰ de 19,4. Concerniente al crecimiento poblacional, está relacionada con las actividades productivas introducidas desde su fundación en 1912.

La Figura 27 expone la proyección de la poblacional del distrito Primero hasta el año 2030, basado en los datos oficiales de INEC desde 1950 - 2000. Esta proyección tiene como finalidad la demanda aproximada en los servicios básicos como: agua potable, electricidad, teléfonos, escuelas, colegios, transporte públicos, vivienda, recolección de basura, entre otros (UNA 2008b).

²⁷ PEA (Población Económicamente Activa)

²⁸ PEI (Población Económicamente Inactiva)

²⁹ TIA (Tasa de Incremento Anual)

³⁰ TDP (Tiempo de Duplicación en años de la Población)

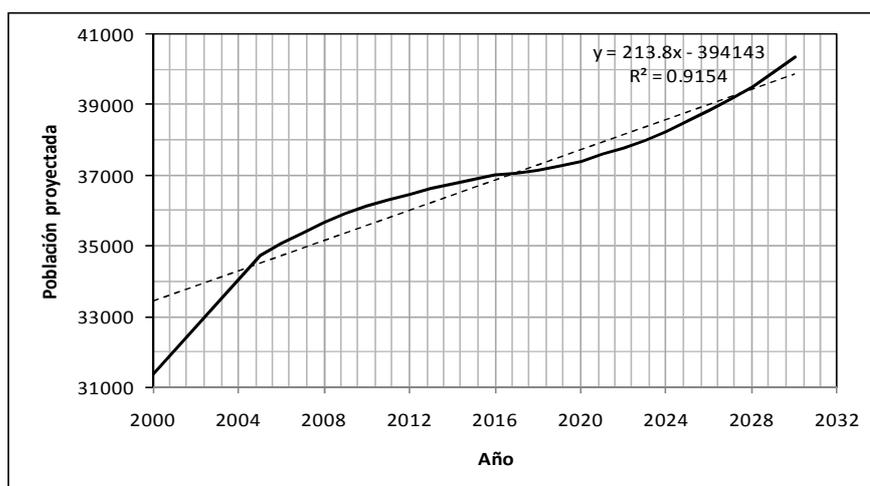


Figura 27. Proyección demográfica del distrito primero de Siquirres

Fuente: UNA (2008b)

4.1.3.3 Servicios básicos existentes en los sectores Central y Sur

De acuerdo a UNA (2008b) las características rurales, desempleo, pobreza y de poco acceso a los servicios de salud y educación, con que cuentan los sectores *Central* y *Sur* del distrito Primero de Siquirres, ha provocado emigraciones de los pobladores hacia el Valle Central, obligando a muchas personas a abandonar sus familias en busca de una mejor calidad de vida. Entre los servicios básicos existentes en los sectores *Central* y *Sur*, se mencionan:

- Acueducto: actualmente existen dos acueductos. El primero administrado por AyA de Siquirres, como la institución gubernamental encargada de abastecer de agua para consumo humano al sector *Central* (ciudad de Siquirres y comunidades aledañas) a través de una planta de tratamiento; y el segundo concierne al acueducto o ASADA Coco-Moravia, ubicada en la comunidad Moravia y Linda Vista, abasteciendo a las comunidades del sector.

- Telecomunicaciones y electricidad: existe una instalación central telefónica en el distrito con una capacidad de 4828 líneas de las cuales se utilizan 3476. Estos números corresponden a la cantidad de líneas telefónicas totales, es decir, a líneas de teléfonos residenciales, comercio y telefonías públicas. El distrito cuenta con aproximadamente 500 km de líneas eléctricas, 15500 clientes y un consumo promedio residencial de 250 a 300 KWH mensual.

- Aguas negras y residuales: en el sector *Central* prevalece el uso de tanques sépticos en los patios traseros de las casas, en lo que concierne a las aguas residuales en el casco urbano, corresponde al alcantarillado, administrado por la municipalidad. Para el sector *Sur*, los tanques sépticos son pocos frecuentes para el depósito de aguas negras, siendo lo más habitual la construcción de drenajes caseros, que al igual que las aguas residuales van a dar directamente a las orillas de los patios traseros y al río Siquirres.

- Infraestructura vial: en el año 2001, Siquirres contaba con 131,9 km de caminos de lastre y asfalto, de los cuales el 47,5% corresponde a asfalto y el 52,5% a lastre. De la red vial asfaltada, solo el 13,1% está en buen estado, el 33,59% en estado regular y el 53,3% en mal estado. De las carreteras de lastre el 49,7% está en estado regular, el 50,3% en mal estado y no existen caminos que se consideren en buen estado. En términos generales, se puede concluir que solo 6,2% de la red vial de Siquirres se encuentra en buen estado, el 42% en estado regular y el 51,7% en mal estado. En definitiva, el 93,76% de la red vial de Siquirres se puede calificar entre regular a mala.

El sector *Central*; se caracteriza por tener cobertura asfaltada en las principales vías de comunicación del casco urbano, pero no así en aquellos caminos que conducen de las comunidades aledañas al *Centro* las cuales son de lastre. Para el sector *Sur*, se presenta una situación similar al centro, pues la ruta principal (carretera Siquirres-Turrialba) se haya totalmente asfaltada, no obstante, las rutas vecinales que conducen al interior de las comunidades presentan un mal estado, pues, los caminos ni siquiera cuentan con lastre sino que son de piedra suelta, representando en épocas de lluvias un gran peligro.

- Servicios de Salud: el sector *Central* cuenta con una clínica de tipo tres que brinda los servicios de farmacia (funciona todos los días de 7:00 am a 10:00 pm), de laboratorio-microbiológico y consultas de especialistas (funcionan de lunes a viernes de 6:00 am a 4:00 pm). A su vez, el área de salud está subdividida en 15 sectores, cada uno por un equipo básico de atención integral en salud (EBAIS), donde, no todos los EBAIS cuentan con un médico permanente, un auxiliar de enfermería o un asistente técnico de atención primaria. Para el caso del sector *Sur* existen tres EBAIS ubicadas en las comunidades de Santa Marta, Linda Vista y Guayacán. Los EBAIS presentan falta de personal, equipo médico y un lugar apto de atención.

Asimismo, los hospitales de referencia de la zona, son el hospital de Limón que se encuentra a 61 km y el de Guápiles a 37 km.

- Educación: en el sector *Central* y *Sur* se identifican 26 instituciones educativas públicas, de las cuales 23 atienden la educación formal básica (primaria) y las tres faltante corresponden a: educación secundaria, diversificada y superior (universitaria) distribuida de la siguiente manera (Cuadro 28).

Cuadro 28. Centro educativos públicos en los sectores Central y Sur del distrito Primero de Siquirres

No.	Institución	Sector	Matriculas por año
1	UNED	Central	Sd
2	Colegio técnico profesional de Siquirres diurno		1668
3	Colegio técnico profesional de Siquirres nocturno		514
4	Escuela Indiana I		Sd
5	Escuela Indianas II		Sd
6	Escuela Indianas III		Sd
7	Escuela Justo Antonio Facio		740
8	Escuela Las Palmiras		Sd
9	Escuela Las Brisas del Reventazón		97
10	Escuela La Amelia		309
11	Escuela Siquirritos		329
12	Escuela Tobías Vaglio		Sd
13	Escuela Batenia		Sd
14	Escuela Pueblo Civil de Siquirres		Sd
15	Escuela San Rafael		164
16	Escuela Monte Cristo		37
17	Escuela IDA Los Ángeles		56
18	Escuela Líder del Sector Norte		720
19	Escuela Orlando Moya Moya		Sur
20	Escuela Guayacán	52	
21	Escuela Linda Vista	63	
22	Escuela Los Ángeles	20	
23	Escuela San Joaquín	Sd	
24	Escuela Casorla	12	
25	Escuela El Coco	Sd	
26	Escuela Santa Marta	53	

Fuente: UNA 2008b

Del Cuadro 28 podemos deducir que existe en los sectores, al menos una escuela en cada comunidad, lo cual indica que un número considerable de niños tienen acceso a la educación general básica, no obstante, en lo que respecta a la educación secundaria, existe un único colegio diurno y nocturno que funciona en las mismas instalaciones, lo cual dificulta el acceso a los jóvenes que viven lejos, por ejemplo en las comunidades del sector *Sur*. En cuanto a la

educación superior existe un grave problema para los estudiantes, y es la poca opción ofrecida por parte de los tres centros de enseñanza superior.

- Tipos de vivienda: en el distrito de Siquirres sector *Central*, la cantidad de viviendas ocupadas es de 8762, con un promedio de habitantes por vivienda de 5 personas. El 43,9% de las viviendas son de cemento, el 38% de madera y el resto de materiales mixtos. Además, el 68% de las viviendas son propias, el 14,5% son alquiladas y el 17,5% son prestadas. Mientras que en el sector *Sur* imperan los asentamientos o barriadas (UNA 2008).

- Principales actividades productivas que generan ingresos: en el sector *Central* la principal actividad generadora de ingresos es la actividad comercial, la cual es de carácter urbano y se ha ido expandiendo conforme a su base social de desarrollo. Más al norte-central predomina el cultivo de banano y en menor proporción la piña como las principales fuentes de empleo, no obstante este trabajo es muy inestable debido a los despidos frecuentes.

Es necesario enfatizar que la actividad que generan los mayores índices de contaminación son las empresas bananeras, que a pesar de que sus plantaciones no se ubican en los sectores *Central* y *Sur* de Siquirres, si llegan hasta estos territorios las repercusiones ambientales. En el *Sur* prevalece la producción agrícola específicamente el cultivo de culantro y plantas ornamentales, igualmente sobresale la ganadería que en los últimos años ha tenido un auge significativo. Actualmente el 28,86% del área de la subcuenca, corresponde a pasto naturales o pasto con árboles, prevaleciendo en las zonas de mayor recarga o parte alta de la subcuenca.

4.1.4 Aspecto legal concerniente a las áreas de protección del recurso hídrico

4.1.4.1 Revisión de la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones legales a la contaminación en materia de agua

La revisión tiene como finalidad dar a conocer la normativa vigente de las áreas de protección y las regulaciones legales a la contaminación hídrica, asimismo señalar los medios disponibles y órganos competentes de regulación y denuncias, con el fin de evidenciar desde la perspectiva legal las áreas de protección.

De acuerdo a la guía para la protección del recurso hídrico, elaborado por Aguilar (2002) y reproducido por CEDARENA (2004, 2008), a las áreas protectoras se las define como los espacios de importancia para la conservación, renovación, aprovechamiento y desarrollo del recurso hídrico dadas sus características físicas, geográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, o de cobertura vegetal. La creación o declaratoria de estas áreas en Costa Rica se efectúan por medios de leyes, decretos y reformas que a continuación son abordadas.

4.1.4.2 Áreas de protección

Las áreas de protección del recurso hídrico se constituyen en zonas geográficas que por sus características y ubicación son indispensables de proteger para salvaguardar el recurso hídrico (CEDARENA 2008). Las leyes, decretos y reglamentos que tipifican áreas de protección al recurso hídrico presentadas a continuación, conciernen a un resumen de la *Guía para la protección del recurso hídrico* de Aguilar et al. (2004) y del *Manual de regulaciones jurídicas para la gestión del recurso hídrico en Costa Rica* (Aguilar et al. 2001).

El Capítulo IV, art. 33 de la Ley Forestal (Ley No. 7575), es la norma guía en cuanto al tema de áreas protectoras del recurso hídrico y las otras normas existentes fortalecen el contenido de la presente Ley Forestal. En el art. 33; *Se declaran áreas de protección las siguientes:*

a) Las áreas que bordeen nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal.

b) Una franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado.

c) Una zona de cincuenta metros medidos horizontalmente en las riberas de los largos y embalses naturales y en los lagos o embalses artificiales construidos por el Estado y sus instituciones. Se exceptúan los lagos y embalses artificiales privados.

d) Las áreas de recarga y los acuíferos de los manantiales, cuyos límites serán determinados por los órganos competentes establecidos en el reglamento de esta ley.

El artículo manifiesta que las riberas de los ríos con terrenos inclinados están sujetas a ciertas restricciones. De igual manera no se puede realizar actividades de tala o destrucción de árboles

debido a lo que se pretende es garantizar la conservación y protección del agua (Art. 34³¹ Ley Forestal). Además, si estas áreas estuvieren dentro de terrenos declarados como Áreas Silvestre de Protección (ASP), también se le aplicarían las restricciones establecidas en el art. 1³² de la Ley Forestal. De igual manera, el art. 61 inciso c) de la Ley Forestal impone prisión de un mes a tres años a quien realice actividades que implique cambio en el uso de la tierra, contrario a lo estipulado en el art. 19 de la misma ley, la cual no permite el cambio de uso de terrenos cubiertos de bosque, salvo con permiso expreso del Estado con fines específicos.

En el Reglamento de Fraccionamiento y Urbanización del Capítulo III, inciso 111.3.7 Protección de ríos en su art. III.3.7.1 *En el caso de que se pretenda urbanizar fincas atravesadas por ríos o quebradas o que colinde con estos, deberá proveerse una franja de no construcción con un ancho mínimo de 10 metros a lo largo del lecho máximo y medidos a cada lado del mismo en la proyección horizontal.* Al igual en el art. III.3.7.6 *En caso que una corriente de agua permanente nazca en un área urbana, el ojo de agua deberá protegerse en un radio de 50 metros como mínimo, zona en que no se podrá construir ninguna obra, salvo las de aprovechamiento del agua.* Finalmente el art. III.3.7.7 establece que todos los tipos de terrenos indicados en el inciso 111.3.7, deberán presentar un plan de reforestación al MINAET. El alineamiento de estas áreas es competencia del Instituto Nacional de Viviendas y Urbanismo (INVU) art. 34 de la Ley Forestal donde establece *Los alineamientos que deben tramitarse en relación con estas áreas, serán realizados por el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo.*

En el inciso b) del art. 33 de la Ley Forestal se crea la interrogante ¿cómo se puede deducir si es o no naciente permanente? a este criterio técnico le compete aclararlo al departamento de aguas del MINAET, y en caso de fallarse que la naciente es permanente se procede a realizar el alineamiento por parte del INVU. Asimismo, en el art. 33 de los incisos a), b) y c) las áreas establecidas tienen un régimen diferente en cuanto a las áreas de recarga acuífera³³ señaladas en el inciso d). Referente a la delimitación de las áreas de recarga acuífera legalmente le atañe al MINAET quien es el ente que inicia el proceso de creación (art. 2 de la Ley Forestal). En el

³¹ Art. 34 *Se prohíbe la corta o eliminación de árboles en las áreas de protección descritas en el artículo anterior, excepto en proyectos declarados por el Poder Ejecutivo como de conveniencia nacional.*

³² Art. 1 *En virtud del interés público y salvo lo estipulado en el art. 18 de esta ley, se prohíbe la corta o el aprovechamiento de los bosques en parques nacionales, reservas biológicas, manglares, zonas protectoras, refugios de vida silvestre y reservas forestales propiedad del Estado.*

³³ Áreas de recarga acuífera: se definen como: *la superficie en las cuales ocurre la infiltración que alimenta los acuíferos y cauces de los ríos y su delimitación obedece a características geomorfológicas, hidrogeológicas, geológicas, topográficas, y de cobertura vegetal.*

proceso el MINAET debe consultar a AyA y al SENARA para declarar la zona, mediante decreto. Aunque su delimitación obedece a características geomorfológicas, hidrogeológicas, geológicas, topográficas, y de cobertura vegetal, en la práctica SENARA las crea considerando únicamente la información de pozos, justificando menos complicación. Posteriormente delimitadas las áreas, el MINAET procede a redactar el dictamen de declaratoria, cuyo contenido contiene las recomendaciones hechas en el estudio técnico según la capacidad de uso del área y el tipo de protección que esta implique.

Lo representado en el inciso b) del art. 33, el art. 149 de la Ley de Aguas establece una disposición complementaria a este. De acuerdo a este artículo los propietarios de terrenos atravesados por ríos, arroyos o manantiales deberán reforestar las márgenes de los mismos (si se han cortados árboles) en un perímetro de cinco metros.

Además, de lo establecido en el art. 33 de la Ley Forestal se definen otras áreas de protección del recurso hídrico, las cuales existen una serie de disposiciones legales que permiten el establecimiento, a continuación hacemos referencia a las disposiciones:

Art. 31 de la Ley de Aguas: *Se declaran como reserva de dominio a favor de la nación:*

a) Las tierras que circunden los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable en un perímetro no menor de doscientos metros de radio.

b) La zona forestal, que protege o debe proteger el conjunto de terrenos en que se produce la infiltración de aguas potables, así como la de las que dan asiento a cuencas hidrográficas y márgenes de depósito, fuentes surtidoras o cursos permanentes de las mismas.

Para que estas áreas puedan convertirse en reserva de dominio a favor de la nación deben seguir los mismos trámites señalados para la creación de un ASP. Es decir, declara estas áreas como tierra pública art. 7 inciso c)³⁴ de la Ley de Tierras y Colonización, donde las limitaciones establecidas en la Ley Forestal vienen a complementar esta norma. Es decir que los primeros 100 metros están sometidas a las limitaciones de los art. 31 y 33, y los restantes

³⁴ *Los terrenos de las islas, los situados en las márgenes de los ríos, arroyos y, en general, de todas las fuentes que estén en cuencas u hoyas hidrográficas en que broten manantiales, o en que tengan sus orígenes o cabeceras cualesquiera cursos de agua de los cuales se surta alguna población, o que convenga reservar con igual fin. En terrenos planos o de pequeños declive se considerará inalienable una faja de doscientos metros a uno y otro lados de dichos ríos, manantiales o arroyos; y en las cuencas u hoyas hidrográficas, una faja de terreno de trescientos metros a uno y otro lados de la depresión máxima, en toda la línea, a contar de la mayor altura inmediata.*

100 o más metros de reserva pueden someterse o no a estas limitaciones según decisión discrecional.

Art. 154 de la Ley de Aguas: *queda prohibido a las municipalidades enajenar, hipotecar o de otra manera comprometer las tierras que posean o que adquieran en las márgenes de los ríos, arroyos o manantiales o en cuencas u hoyas hidrográficas en que broten manantiales o en que tenga sus orígenes o cabeceras cualquier curso de agua de que se surta alguna población. En terrenos planos o de pequeño declive, tal prohibición abrazará desde luego una faja de cien metros a uno y otro lado de dichos ríos, arroyos y manantiales; y en las cuencas u hoyas hidrográficas, doscientos cincuenta metros a uno y otro lado de la depresión máxima, en toda la línea, a contar de la mayor altura inmediata.*

Art. 2 de la Ley de Agua Potable: *son del dominio público todas aquellas tierras que tanto el Ministerio de Obras Públicas como el Ministerio de Salubridad Pública, consideren indispensables para construir o para situar cualquier parte o partes de los sistemas de abastecimiento de agua potable, así como para asegurar la protección sanitaria y física, y caudal necesario de las mismas.* El artículo establece la potestad de comprar o expropiar terrenos para proteger el abastecimiento de agua potable o salvaguardar la pureza del agua. En la actualidad, el ente competente es AyA.

4.1.4.3 Otras normativas de importancia para la protección del recurso hídrico

Las disposiciones generales a la propiedad que se hacen en razón del interés social por la protección del recurso hídrico y que son impugnables a todos los ciudadanos, son:

Art. III.3.7 del Reglamento de Fraccionamiento y Urbanización: hacen referencias los incisos III.3.7.1³⁵, III.3.7.2³⁶, III.3.7.3³⁷, III.3.7.4³⁸, III.3.7.5³⁹ y III.3.7.6⁴⁰. Para todos los tipos de

³⁵ En el caso de que se pretenda urbanizar fincas atravesadas por ríos o quebradas o que colinden con éstos, deberá proveerse una franja de no-construcción con un ancho mínimo de 10 m a lo largo del lecho máximo y medios a cada lado del mismo, en la proyección horizontal. Esta franja será entregada al uso público en exceso de la indicada en el artículo III 3.6.3, para efectos de limpieza, rectificación de cauces, bosque urbano, colocación de infraestructura de aguas similares. Sin embargo, cuando esté integrado plenamente el área de parque o que siendo de pendiente no mayor de 25% con frente a una calle y no a fondos de lote, se podrá computar como área pública. La cesión del área para uso público se aplicará siempre que no exceda el 20% que fija la Ley de Planificación Urbana.

³⁶ Para acequias y cauces de agua intermitentes, se considerarán 5 m en lugar de 10 m.

³⁷ En distritos urbanos, en el caso de que una vez cumplido el párrafo anterior quedan franjas no construibles a orillas de cauces de agua, éstas deberán conformar una sola finca entre calles, no aptas para la construcción y deben tener carácter de protección al cauce.

³⁸ En el caso de cañones de río, los terrenos aledaños al cauce que tengan más del 2 % de pendiente no podrán urbanizarse, para efectos de la cesión de áreas públicas estos terrenos no se computarán por no formar parte del área urbanizable. En dichas laderas no se podrán realizar movimientos de tierra que alteren la topografía natural de terreno, esto implica prohibición de terrajeo y depósito o extracción de materiales. En casos muy calificados el INVU y la Municipalidad podrán autorizar algunas de estas obras cuando se demuestre que no producirán deterioro a la ecología local.

terrenos indicados en el art. III.3.7, se deberá presentar un plan de reforestación aprobado por la Dirección Forestal del MINAET, adicionado por el art. IV de la Sesión Ordinaria No. 3928 del INVU. A pesar de lo manifestado por el art. III.3.7.1, prevalece lo dispuesto en la Ley Forestal por ser de rango constitucional.

Art. 149 de la Ley de Aguas: el artículo de la ley puede aplicarse tanto a las nacientes permanentes como a las intermitentes. En este sentido, complementa al art. 33 inciso a) de la Ley Forestal que se refiere a las nacientes permanentes exclusivamente. También, hacen referencias el art. 148⁴¹ de la Ley de Aguas y el art. 16⁴² de la Ley de Agua Potable.

4.1.4.4 Para el hipotético caso de existir irregularidades en el alineamiento o cuando hay invasión en el área de protección

Entre las instituciones legales que deben dar respuestas por ley a cualquier irregularidad en el alineamiento o en la invasión de áreas de protección, se mencionan:

Ministerio del Ambiente y Energía (MINAET): por ser el órgano rector en materia ambiental, la cual tiene injerencia en distintos ámbitos relacionados con la protección del recurso hídrico. Para el caso de las áreas de protección, se podría acudir a cualquiera de las siguientes instancias: Departamento de Aguas, Secretaría Técnica Nacional del Ambiente (SETENA); Tribunal Ambiental Administrativo; Ministerio Público del Poder Judicial (Fiscalía Ambiental) y a los Consejos Regionales Ambientales.

Instituto Nacional de Viviendas y Urbanismo (INVU): en el hipotético caso de considerar la existencia de irregularidades en el alineamiento de un área de protección. Sin embargo, de tratarse de áreas circundante a nacientes, la inspección debe efectuarse en conjunto con el representante del Departamento de Aguas del MINAET.

³⁹ En el caso de terrenos con pendientes más del 20% con laderas a orillas de cauces de agua, se deberán presentar, acompañando al anteproyecto de la urbanización, estudios geológicos de la zona a urbanizar que demuestren que los terrenos son aptos para construir.

⁴⁰ En caso que una corriente de agua permanente nazca en un área a urbanizar, el ojo de agua deberá protegerse en un radio de 50 metros como mínimo zona en que no se podrá construir ninguna obra, salvo las de aprovechamiento del agua. Esta área podrá entregarse dentro del porcentaje a ceder al Municipio para uso público y en este caso deberá destinarse a parque.

⁴¹ Los propietarios de terrenos atravesados por ríos, arroyos, o aquellos en los cuales existan manantiales, en cuyas vegas o contornos hayan sido destruidos los bosques que les servían de abrigo, están obligados a sembrar árboles en las márgenes de los mismos ríos, arroyos o manantiales, a una distancia no mayor de cinco metros de las expresadas aguas, en todo el trayecto y su curso, comprendido en la respectiva propiedad.

⁴² Se prohíben las instalaciones, edificaciones, o labores comprendidas en las zonas cercanas a fuentes de abastecimiento, plantas purificadoras, o cualquiera otra parte del sistema, que perjudiquen en forma alguna los trabajos de operación o distribución, o bien las condiciones físicas, químicas o bacteriológicas del agua; estas zonas serán fijadas por los Ministerios de Obras Públicas y Salubridad Pública.

Municipalidad: el art. 18 de la Ley de Construcciones, mandata a quien construye o reconstruye, debe sujetarse al alineamiento de la municipalidad. De igual manera, los permisos de construcción y los planos emitidos por la municipalidad deben incluir los alineamientos para las áreas de protección establecidos en el art. 33 de la Ley Forestal, debido a que toda construcción o reparación fuera del alineamiento oficial (municipalidad) se considera invasión al área protectora (art. 24 Ley de Construcción).

4.1.4.5 Medios disponibles para la protección del agua

De acuerdo a varios autores (Aguilar et al. 2001; Aguilar 2002; Monge 2004; y CEDARENA 2004, 2008) entre los medios e instrumentos legales disponibles para la protección del recurso hídrico se mencionan:

1. Pago por Servicios Ambientales (PSA): la Ley de Biodiversidad abrió la posibilidad de cobrar dentro de las tarifas de suministro de agua potable un porcentaje destinado al PSA a áreas de bosque que protejan fuentes de agua de suministro municipal.

2. Ordenamiento territorial: los instrumentos más importantes de ordenamiento territorial que establece la legislación de Costa Rica, son los planes reguladores urbanos, los planes de uso y conservación de suelos. Estos instrumentos pueden convertirse en herramientas eficientes de protección a las fuentes de agua si se plantean de manera conjunta con los autores locales.

3. Conservación de tierras privadas (servidumbres ecológicas): las servidumbres ecológicas son un gravamen que pesa sobre un bien inmueble que limita la realización de ciertas actividades de desarrollo en dicho bien, con el fin de mantener los servicios ambientales que este brinda a otro bien inmueble. Las características de una servidumbre ecológica; es un acuerdo voluntario y flexible, que inscriben en el título de propiedad, normalmente constituido a perpetuidad.

4.1.4.6 Órganos de denuncias generales para la protección del recurso hídrico

Entre los órganos competentes, están: 1) al MINAET; dentro de este órgano, y ante los cuales pueden interponerse denuncias:

Tribunal Ambiental Administrativo: esta es una figura creada por la Ley Orgánica del Ambiente que comenzó sus funciones en enero de 1997. Por ley, es un órgano desconcentrado del MINAET, con competencia exclusiva e independencia funcional en el desempeño de sus atribuciones. Sus fallos agotan la vía administrativa y sus resoluciones serán de acatamiento estricto y obligatorio (art. 105 Ley Orgánica del Ambiente).

SETENA: es un órgano de desconcentración máxima del MINAET. Una de las funciones de la SETENA es la atención e investigación de denuncias por daño ambiental (art. 84 Ley Orgánica). Para cumplir con esta disposición, el reglamento de procedimiento del SETENA ha creado una unidad de monitoreo y seguimiento que puede conocer y atender las denuncias sobre degradación o impacto ambiental en proyectos con expedientes administrativos en SETENA.

Contraloría Ambiental: el art. 102 de la Ley Orgánica del Ambiente dispone expresamente: *se crea el cargo de Contraloría del Ambiente adscrito al despacho del Ministerio del Ambiente y Energía, quien lo nombrará. Su tarea será vigilar la aplicación correcta de los objetivos de esta ley, y las que por su naturaleza le correspondan. Estará obligado a denunciar cualquier violación de esta ley y las conexas ante la Procuraduría Ambiental y de la Zona Marítima Terrestre, así como ante el Ministerio Público.*

Consejos Regionales Ambientales: la Ley Orgánica del Ambiente crea los Consejos Regionales Ambientales, adscritos al Ministerio de Ambiente y Energía, como máxima instancia regional desconcentrada, con participación de la sociedad civil para el análisis, discusión, denuncia y control de las actividades, organismos y proyectos en materia ambiental (art. 7). Estos Consejos funcionan en cada una de las áreas de conservación del MINAET.

Defensoría de los habitantes: esta institución vela por que las instituciones públicas y sus funcionarios cumplan con las obligaciones legales y morales y las responsabilidades que derivan del ejercicio de una función pública, con la consiguiente obligación de dar cuentas sobre el resultado de su gestión. La Defensoría tiene el deber de proteger los derechos e intereses de los habitantes (art. 1 de la Ley del Defensor de los Habitantes, No. 7319 del 10 de diciembre de 1992), velando porque el funcionamiento del sector público se ajuste a la moral,

la justicia, la Constitución Política, las leyes, los convenios, los tratados, los pactos suscritos por el gobierno y los principios generales del derecho.

Poder Judicial: compete a la Fiscalía Ecológica o Ambiental creada en 1993 y sus funciones son de prevención y capacitación en el ámbito nacional. Tienen jurisdicción nacional y en casos muy calificados, el fiscal adjunto es quien lleva la causa.

Sala Constitucional: es una instancia creada para garantizar a los administrados los derechos y libertades fundamentales contenidos en la Constitución Política. Por medio de norma constitucional se le otorga una serie de competencias, entre ellas, las de conocer las acciones de inconstitucionalidad y los recursos de amparo.

Municipalidad: una denuncia puede ser presentada ante la municipalidad, en los siguientes casos: 1) cuando exista incumplimiento de los planes reguladores o violación a las áreas de amortiguamiento y de las nacientes y cuencas hidrográficas, o del incumplimiento de consideraciones ambientales en los reglamentos o normas técnicas emitidos para la aplicación de un plan regulador; 2) cuando haya incumplimiento de los reglamentos o normas técnicas emitidos para la prestación de servicios públicos del Cantón (agua y desechos); 3) cuando no se cumplan los requisitos ambientales relativos a la construcción, determinando la suspensión temporal o definitiva de actividades; y 4) cuando se incumplan los requisitos ambientales relativos a los permisos de funcionamiento.

El Inspector Cantonal de Aguas: la figura del inspector cantonal de aguas, creada por la Ley de Aguas (artículos 94, 177, 180, 181, 186 y 198) y nombrados por el Ministerio de Ambiente y Energía de una terna propuesta por las respectivas municipalidades. Tiene entre sus atribuciones el proteger el recurso hídrico bajo el criterio de conservación y recuperación de los ecosistemas acuáticos y los elementos que intervienen en el ciclo hidrológico. Además, debe atender a la resolución de los conflictos que se presenten con ocasión del uso del agua y los cauces, dirimiéndolos mediante la emisión de una resolución en primera instancia. Dicho funcionario se encuentra bajo la supervisión del Departamento de Aguas del MINAET.

4.1.4.7 Regulaciones legales relacionadas a la contaminación hídrica

Se señalan las regulaciones y los entes competentes que tienen injerencia de por ley en velar por el cumplimiento de la normativa de contaminación del recurso hídrico.

Ley Orgánica del Ambiente (Ley No. 7554): en el Capítulo XV, art. 59 al 72, se establecen los lineamientos generales y específicos de las acciones preventivas y de control a la contaminación del recurso con la finalidad de garantizar la calidad y cantidad del agua. Concretamente en los art. 51 y 52 de la Ley Orgánica, se promueve la conservación y el uso sostenible del agua con un carácter de interés social. El art. 60 de la ley obliga al Estado, a las municipalidades y demás instituciones públicas que den prioridad al establecimiento y operación de servicios a la salud ambiental. Seguidamente en el art. 64 se contempla el principio de la prevención en la contaminación del agua, estableciéndose que la autoridad de las aguas deberá regular y controlar el manejo, aprovechamiento y alteraciones en la calidad y cantidad, según los límites permisibles fijados en las normas correspondientes. Por su parte, el art. 67 establece que las personas físicas o jurídicas, públicas o privadas tienen la obligación de adoptar medidas adecuadas para impedir o minimizar la contaminación o el deterioro sanitario de las cuencas hidrográficas y los art. 98 y 99 establecen las imputaciones a personas que realicen daño o contaminación al ambiente y las sanciones administrativas ante la violación a la normativa de protección ambiental.

Ley de Biodiversidad (Ley No. 7788): el art. 105 hace referencia a la acción popular y a todas aquellas infracciones relacionadas con la defensa y protección de la biodiversidad, y por ende, el recurso hídrico.

Ley General de Salud (Ley No. 5395): el art. 264⁴³ normaliza el uso del agua para consumo humano. En los art. 275 y 277 se prohíbe toda acción encaminada a producir contaminación o deterioro sanitario de las aguas o de las cuencas hidrográficas. El art. 285 enfatiza las excretas, las aguas negras, las servidas y las pluviales con el fin de evitar la contaminación del suelo y de las fuentes naturales de agua para consumo humano.

⁴³ El agua constituye un bien de utilidad pública y su utilización para el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso. Por ello en el art. 273 - Se prohíbe contaminar los abastos de agua, así como dañar, obstruir parcial o totalmente, los sistemas de abastecimiento de agua potable destinada a la población.

Ley de Conservación de la Vida Silvestre (Ley No. 7317): el art. 132⁴⁴ norma lo relativo a la protección de los recursos hídricos.

Ley Constitutiva del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (Ley No. 2726): en el art. 2, inciso c) establece que AyA debe promover la conservación de las cuencas hidrográficas y la protección ecológica, así como el control de la contaminación de las aguas.

Ley General de Agua Potable (Ley No. 1634): el art. 16⁴⁵ establece prohibición de construcción en áreas cercanas a las fuentes y sistemas de abastecimiento de agua.

Ley de Uso, Manejo y Conservación del Suelo (Ley No. 7779): el art. 12 establece que el MAG elaborará un Plan Nacional de Manejo y Conservación de suelos para las tierras de uso agroecológico, el cual contemplará la reducción a la contaminación. En el reglamento a la Ley, Decreto No. 29375 MAG-MINAET-S-HACIENDA-MOPT, se establece que quienes ejerzan actividad en los suelos deben aplicar todas las practicas que aumente la capacidad de infiltración, así como la evacuación de las aguas residuales o pluviales hacia los cauces naturales, previniendo la contaminación de acuíferos, aguas superficiales o marítimas.

Entre los reglamentos que tipifican regulaciones a la contaminación del recurso hídrico están:

- a. Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. Decreto No. 33903-MINAE-S: reglamenta los criterios y metodologías que serán utilizados para la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales, para los diferentes usos.
- b. Reglamento para la Calidad del Agua Potable. Decreto No. 32327 y No. 25991-S, hace referencia a los niveles adecuados o máximos que deben tener aquellos componentes o características del agua que pueden presentar un riesgo para la salud de la comunidad o algún inconveniente a la preservación de los sistemas de abastecimiento de agua.

⁴⁴ Se prohíbe arrojar aguas servidas, aguas negras, desechos o cualquier sustancia contaminante en manantiales, ríos, quebradas, arroyos permanentes o no permanentes, lagos, marismas y embalses naturales o artificiales, esteros, turberas, pantanos, aguas dulces, salobres o saladas. Las instalaciones agroindustriales e industriales y las demás instalaciones, deberán estar provistas de sistemas de tratamientos para impedir que los desechos sólidos o aguas contaminadas de cualquier tipo destruyan la vida silvestre. La certificación de la calidad del agua será dada por el Ministerio de Salud y Seguridad Social. De acuerdo con el artículo Quienes no cumplan con lo estipulado en este artículo, serán multados con montos que irán de cincuenta mil colones (€50000) a cien mil colones (€100000), convertibles en pena de prisión de uno a dos años.

⁴⁵ Se prohíben las instalaciones, edificaciones, o labores comprendidas en las zonas cercanas a fuentes de abastecimiento, plantas purificadoras, o cualquiera otra parte del sistema, que perjudique en forma alguna los trabajos de operación o distribución, o bien las condiciones físicas, químicas o bacteriológicas del agua; estas zonas serán fijadas por los Ministerios de Obras Públicas y Salubridad Pública.

- c. Reglamento de Vertidos y Reuso de Aguas Residuales No. 26042-S-MINAET: se establece la obligación para todo ente generador (personas física o jurídica, pública o privada, responsables del vertido de aguas residuales en un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario), de confeccionar reportes operacionales. En sus art. 32, 33, 34, 35 y 36 se contempla una serie de prohibiciones en los vertidos.
- d. Reglamento de Servicios de Riego, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (Acuerdo No. 2217).
- e. Reglamento para las Actividades de Aviación Agrícola, Decreto 15846.
- f. Reglamento sobre Granjas Porcinas, Decreto 22815-S.
- g. Reglamento sobre Registro, Uso y Control de Plaguicidas Agrícolas y Coadyuvantes, Decreto Ejecutivo No. 24112.
- h. Reglamento sobre Manejo de Basura, Decreto No. 19049-S.
- i. Reglamento sobre Rellenos Sanitarios, Decreto 22595.
- j. Reglamento para el Manejo de Lodos Procedentes de Tanques Sépticos, Decreto 21297.
- k. Reglamento sobre el Procedimiento para llevar a cabo la Prueba de Extracción para Determinar Constituyentes que hacen un Residuo Peligroso por su Toxicidad al Ambiente, Decreto 27002-MINAET.

4.1.4.8 Los entes competentes para velar por el cumplimiento de las normativas de contaminación

Municipalidad: tiene dentro de su mandato legal el velar por la protección de los intereses locales, entre ellos, el derecho constitucional a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado de los habitantes del Cantón. Los gobiernos locales tienen una función y a la vez potestad, de velar por la protección de los recursos naturales de todo orden, lo cual los vincula con la protección de nacientes y áreas de recarga acuífera (artículo 1 Ley de Construcciones).

Ministerio de Salud y Seguridad Social: es el órgano estatal a cargo de la política nacional de salud, y la organización, coordinación y dirección de los servicios de salud del país. Estas atribuciones las ejercen por medio de la Dirección de Protección al Ambiente Humano, dividida en tres unidades: Unidad de Atención al Cliente; Unidad Técnica Especializada; y la Unidad de Permisos y Controles. Esta última se encarga del control de la contaminación del agua,

sobre todo en lo que se refiere a los servicios de abastecimiento de agua potable, servicios de disposición de excretas, aguas servidas y servicios de manejo de desechos.

AyA: es la institución autónoma del Estado encargada de dirigir, fijar políticas, aplicar normas, realizar y promover el planeamiento, financiamiento y desarrollo y de resolver todo lo relacionado con el suministro de agua potable, recolección, evacuación de aguas negras y residuos industriales líquidos, lo mismo que el aspecto normativo de los sistemas de alcantarillados pluvial en áreas urbanas, para todo el territorio nacional.

SENARA: es una institución autónoma, bajo las directrices del Ministerio de Agricultura y Ganadería, encargada de: investigar, proteger y fomentar el uso de los recursos hídricos del país, tanto superficial como subterráneo. La Ley Forestal señala que le compete al MINAET, previa consulta al AYA, SENARA y cualquier otro ente competente en materia de aguas, delimitar de manera razonable, útil y oportuna las áreas de recarga acuífera, que son aquellas superficies en las cuales ocurre la infiltración que alimenta a los acuíferos y cauces de los ríos.

4.2 Delimitación, estimación y conceptualización de las zonas de protección aparente a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, en la parte alta de la subcuenca

4.2.1 Delimitación, estimación y conceptualización de la zona I

4.2.1.1 Fundamento de la metodología y justificación de la zona I

Únicamente para efecto de estudio se divide la vulnerabilidad global en distintas *vulnerabilidades*. Sin embargo, es indispensable señalar que cada una de ellas constituye apenas un ángulo particular para analizar el fenómeno global y las diferentes *vulnerabilidades*, debido a que están estrechamente interconectadas entre sí. Es decir, difícilmente podríamos entender, la vulnerabilidad física sin considerar una función de la vulnerabilidad económica y política; o esta última sin tomar en cuenta la vulnerabilidad social, cultural, entre otras (Wilches-Chaux 1993).

En definitiva la vulnerabilidad comprende una serie de ángulos desde los cuales puede ser vista, analizada y trabajada para fomentar un bienestar en las comunidades; a estos ángulos de

análisis puede llamárseles factores o tipos de vulnerabilidades, los cuales no son más que actores responsables de conformar un nivel de vulnerabilidad para una comunidad (Wilches-Chaux 1993, 1998).

Estos principios establecen el fundamento básico de la metodología desarrollada para el establecimiento de la zona I. De igual manera, la metodología está apuntada en los siguientes autores: Buch (2001); Cáceres (2001); Meléndez (2001); Rivera (2002); Gómez (2003); Parra (2003); Reyes (2003); Jiménez et al. (2004); Salgado (2006) y los conceptos y criterios de Wilches-Chaux (1989); Cardona (1993a); Villanueva (1997); y Cáceres (2001), asimismo en los aportes brindados por los actores locales, técnicos, funcionarios de instituciones y especialistas, como en los procesos de consulta, verificación, análisis, consenso y validación de las variables e indicadores, constituyendo el punto de partida sobre el cual se sustenta la delimitación, estimación y conceptualización de la zona I.

La Figura 28 esquematiza los seis ángulos de vulnerabilidades que llegan a constituir y a estimar la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I, valorada en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres.

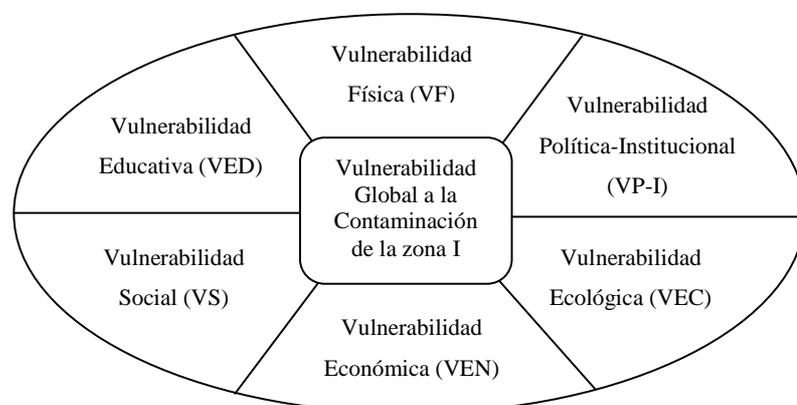


Figura 28. Ángulos de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I

Fuentes: Jiménez (2007)

La investigación parte de una iniciativa de CATIE y se constituye bajo los señalamientos continuos de algunas instituciones como: MAG, AyA, municipalidad y la organización de la sociedad civil de Siquirres a través de una propuesta llamada *Proyecto subcuenca del río Siquirres*, donde manifiestan la necesidad de definir los instrumentos legales, técnicos y

sociales para constituir el ordenamiento territorial de la parte alta de la subcuenca, debido a que el área abastece de agua para consumo humano a aproximadamente 21131 habitantes de la ciudad de Siquirres y 701 en Madre de Dios (AyA 2007). Entre los problemas señalados por las instituciones, se resaltan; 1) el fuerte impacto que actualmente sufren las nacientes y áreas de recarga por la expansión urbana; 2) la falta de un control en el uso del suelo (ordenamiento territorial); 3) la fuerte contaminación por vertidos de aguas negras y/o servidas; 4) la contaminación de agroquímicos provenientes de las actividades agropecuaria y 5) la falta de coordinación interinstitucional entre la sociedad civil, instituciones del estado y gobierno municipal en abordar temas ambientales.

Con el fin de establecer medidas a los problemas señalados desde la óptica biofísica y/o delimitar y estimar la zona I de protección aparente a la contaminación de la parte alta de la subcuenca, concretamente alrededor de las nacientes, ojos de agua, y sobre la franja ribereña, se crearon variables e indicadores, con parámetros de guía que valoraron y estimaron una vulnerabilidad actual a la contaminación. La formación del escudo o zonas de protección contra los contaminantes, será un avance significativo en el propósito de proporcionar, en forma permanente, agua de buena calidad para el consumo humano.

4.2.1.2 Delimitación de la zona I

La delimitación de la zona I parte de 200 m aguas abajo de la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano administrada por AyA llamada punto **W** hacia las nacientes, ojos de agua o límites de la parte alta de la subcuenca. Delimitada sobre la base de la Ley Forestal (Ley No. 7575) y Ley de Aguas (Ley No. 276) vigentes, las que tipifican una franja de protección de 50 m horizontales a ambos lados del río en terrenos quebrados, art. 33, inciso b) de la Ley Forestal y un radio de 100 m medidos de modo horizontal en las áreas que bordean nacientes permanentes, art. 33, inciso a) de la Ley Forestal, así como un perímetro de 200 m de radio cuando las tierras circunden los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable, art. 31 de la Ley de Aguas. La Figura 29 muestra la zona I delimitada según leyes, la cual presenta una extensión aproximada de 2,4 km² (2433 ha) representando un 29% de extensión territorial con respecto al área de estudio y 4,2% en relación a la subcuenca.

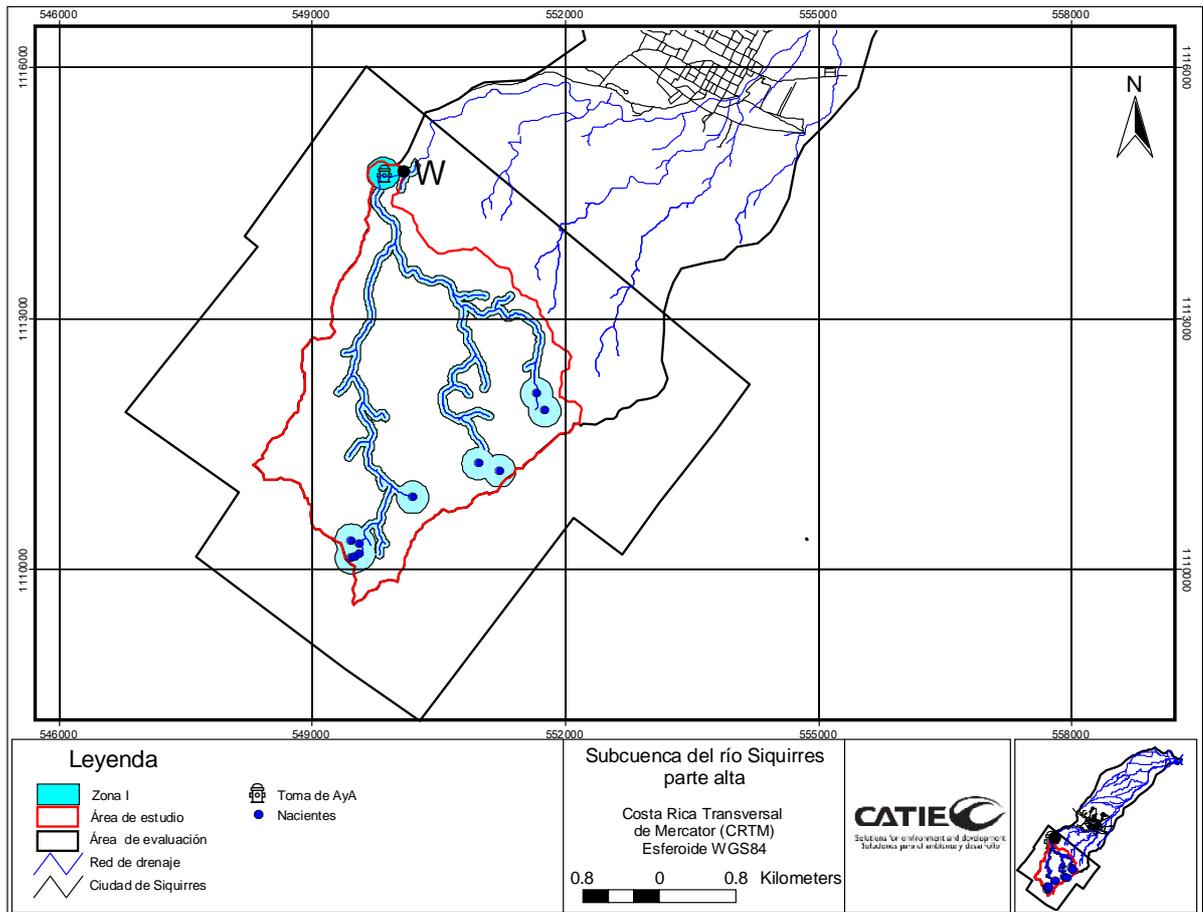


Figura 29. Zona I de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

4.2.1.3 Estimación de vulnerabilidad a la contaminación de la zona I

El presente capítulo está estructurado en tres partes: la primera trata sobre el cálculo de las variables e indicadores validados por tipo de vulnerabilidad con el objetivo de determinar la vulnerabilidad porcentual y su grado de caracterización (cuadros de resumen), hasta la selección y discusión de los indicadores con mayor nivel de prioridad o valores mayores o iguales a la media (≥ 2) del valor máximo definido (4) en la valoración de la vulnerabilidad; la segunda parte expone los resultados de la aplicación de la metodología para la estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I, como una primera opción para analizar la vulnerabilidad; y la tercera y última etapa presenta el resultado final.

4.2.1.3.1 Primera etapa

Las variables e indicadores validados pueden ayudar a revelar la contaminación puntual y difusa del área en estudio, analizando la escala de distanciamiento existente entre el escenario sin vulnerabilidad y el escenario actual. Estas variables e indicadores fueron valorados (validados) en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres, estimado para la zona I (franja ribereña) y especializado según la Ley Forestal (No. 7575) y Ley de Aguas (Ley No. 276) vigentes. A continuación, se muestran los cuadros resumen de cada tipo de vulnerabilidad y sus gráficos que representan dos escenarios de distanciamiento a la contaminación sufrida: el primero es el escenario sin vulnerabilidad (vulnerabilidad nula); y el segundo corresponde al escenario de vulnerabilidad actual. En estos diagramas la posición o valores ordinales más cercanos al vértice denotan la situación con vulnerabilidad nula y en la medida que se distancia mayor será la vulnerabilidad. Los resultados fueron los siguientes:

a) Vulnerabilidad física (VF)

Cuadro 29. Resumen de la vulnerabilidad física (VF)

Vulnerabilidad física (VF)														
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados											Vulnerabilidad* VF	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad
	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5	VF6	VF7	VF8	VF9	VF10	VF11			
Vulnerabilidad Física (VF)	4,00	1,33	2,00	3,67	4,00	0,00	1,00	1,00	3,33	2,33	4,00	2,42	60,61	Alta

*promedio. Desviación estándar de 1,45 y varianza de 2,11 de la muestra

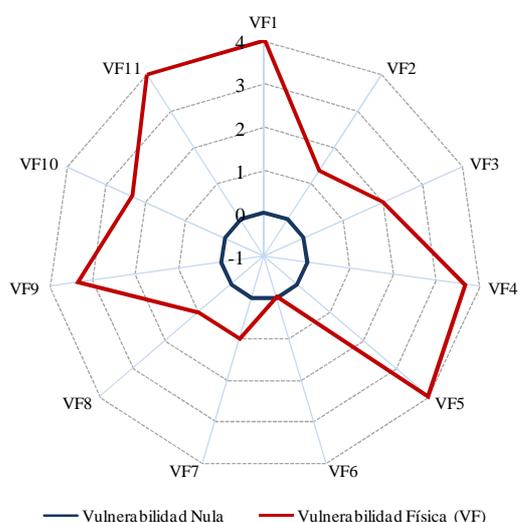


Figura 30. Distribución de los indicadores validados de la VF

El escenario actual de la VF, muestra un valor promedio de 2,42 (60,61%) caracterizada como de vulnerabilidad alta (Cuadro 29), sobresaliendo los indicadores VF1, VF5, VF11 con la máxima valoración de vulnerabilidad (4), seguido de VF4 (3,67), VF9 (3,33), VF10 (2,33) y VF3 (2,00). Esto demuestra que las acciones a priorizar deben estar dirigidas a: 1) regular el proceso de urbanización con la no autorización de más construcciones cerca de la orilla del río; se recomienda una distancia mínima horizontal de 50 m y máxima de 100 m; 2) regular la construcción de letrinas y fosas sépticas dentro del área de los 100 m al río; 3) establecer sanciones y multas fuertes a personas o empresas que se les compruebe que son parte directa de los basureros ilegales existentes; 4) priorizar la compra de camiones recolectores de basuras y establecer un calendario o tren de aseo, considerando un diagnóstico integral de la situación actual de los residuos sólidos y líquidos generados por los pobladores, además, es preciso implementar programas pilotos de reciclaje o reaprovechamiento de los residuos orgánicos e inorgánicos a nivel comunitario; 5) establecer mayor control en el tránsito terrestre (carretera Siquirres-Turrialba) para impedir accidentes y evitar en lo posible cualquier contaminación con sustancias contaminantes al río; finalmente 6) se requiere priorizar la construcción de un sistema de alcantarillado de aguas negras y/o residuales conectado entre las comunidades de Guayacán, Moravia y Coco, esto con el propósito de reducir la cantidad actual de descarga de aguas negras que se vierten en el río y al aire libre.

b) Vulnerabilidad política–institucional (VP-I)

Cuadro 30. Resumen de la vulnerabilidad política-institucional (VP-I)

Vulnerabilidad política-institucional (VP-I)												
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados									Vulnerabilidad* VP-I	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad
	VP-I1	VP-I2	VP-I3	VP-I4	VP-I5	VP-I6	VP-I7	VP-I8	VP-I9			
Vulnerabilidad Política–Institucional (VP-I)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,33	3,33	4,00	3,85	96,30	Muy alta
*promedio. Desviación estándar de 0,29 y varianza de 0,09 de la muestra												

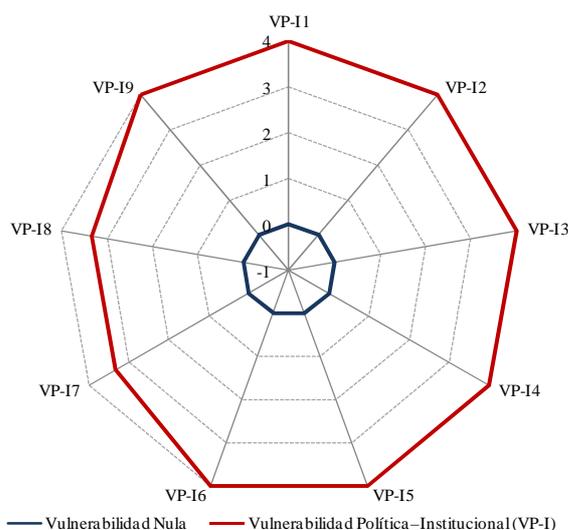


Figura 31. Distribución de los indicadores validados de la VP-I

Concerniente al escenario actual de la VP-I muestra un valor promedio de 3,85 (96,30%) caracterizada de muy alta vulnerabilidad (Cuadro 30), poniendo en evidencia que la gobernabilidad (indicadores político-institucionales) valorada de acuerdo a decisiones y medidas ambientales tomadas en los últimos diez años en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres por las distintas administraciones del gobierno municipal, las instituciones gubernamentales y no gubernamentales y en parte por la sociedad civil, pobladores, comunitarios y productores, no han sido del todo favorables, revelando una gran debilidad y concientización respecto a los temas de protección, administración y manejo del recurso hídrico existentes. Se evidencia que en los últimos cinco años ha existido una falta de trabajo interinstitucional y de voluntad por parte de las instituciones competentes en promover programas y proyectos ambientales de protección al recurso agua destinada al consumo humano. Por lo tanto, demanda de manera apremiante desarrollar esfuerzos conjuntos en promover estos programas y proyectos de concientización ambiental, más concretamente dirigido a la protección de las fuentes de aguas y a las áreas de recarga contra la contaminación actual, con acciones que involucre a todos los pobladores de Guayacán, Moravía, el Coco y de la zona urbana de Siquirres, para salvaguardar en un futuro el recurso hídrico presente.

Además, se requiere promover el liderazgo local, constituir juntas o algún comité de agua comunal o cantonal donde estén conformadas las tres comunidades de la parte alta de la

subcuenca (Guayacán, Moravia y el Coco), liderada por la municipalidad y AyA, con el apoyo técnico y financiero de las instituciones gubernamentales y no gubernamentales, entre otras. Esto con el propósito de iniciar procesos de concientización, gestión, fiscalización y planificación de acciones que conlleven a la protección del recurso hídrico.

c) Vulnerabilidad ecológica (VEC)

Cuadro 31. Resumen de la vulnerabilidad ecológica (VEC)

Vulnerabilidad ecológica (VEC)																				
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados																	Vulnerabilidad* VEC	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad
	VE C1	VE C2	VE C3	VE C4	VE C5	VE C6	VE C7	VE C8	VE C9	VE C10	VE C11	VE C12	VE C13	VE C14	VE C15	VE C16	VE C17			
Vulnerabilidad Ecológica (VEC)	2,00	2,67	3,33	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	2,67	2,67	3,67	1,33	2,00	1,00	1,61	40,20	Media

*promedio. Desviación estándar de 1,43 y varianza de 2,04 de la muestra

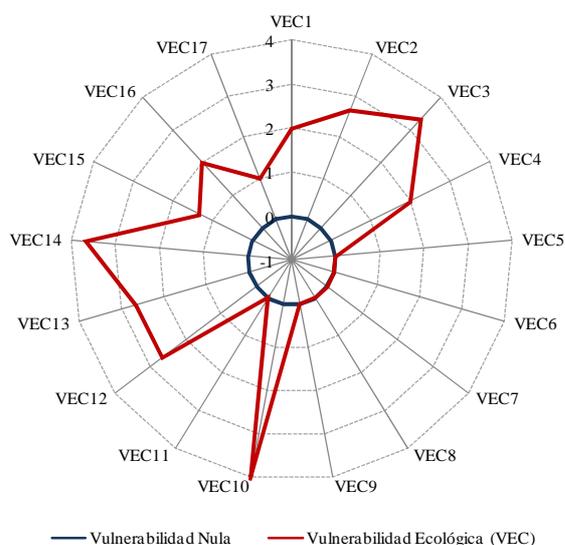


Figura 32. Distribución de los indicadores validados de la VEC

El escenario actual de la VEC presenta un valor promedio de 1,61 (40,20%) caracterizada de media (Cuadro 31), revelando una escasa intervención antrópica sobre las áreas boscosa de la parte alta de la subcuenca. Sin embargo, el escenario presenta indicadores a considerar como el VEC10 con la máxima valoración (4), seguido VEC14 (3,67), VEC3 (3,33), y VEC2, VEC12 y VEC13 con (2,67) hasta VEC1, VEC4 y VEC16 con valores de (2,00), indicando

que se debe priorizar: 1) los programas de agricultura ecológica con prácticas de conservación de suelo y agua como una prioridad, debido a la presencia de suelos frágiles de fácil erosión y pendientes escarpadas mayores de 40%; 2) establecer un mayor control y vigilancia en las porquerizas, gallineros y en los pequeños estantes de ganado menor ubicados entre la franja de los 50 m de distancia a ambos lado del río; 3) crear jornadas de limpiezas en la franja ribereña por lo menos una vez al año, con la intención de ir eliminando todo tipo de basura o desechos en el río; y finalmente 4) regular y en un futuro interrumpir la expansión de las áreas de potrero en la parte alta de la subcuenca en donde se encuentran las fuentes de agua (nacimiento, ojos de agua, áreas de recarga, entre otros) que dan origen al río Siquirres y en donde se abastece de agua para consumo humano los pobladores de la zona rural de Siquirres, y las comunidades de Guayacán, Moravia, Coco y fincas aledañas.

d) Vulnerabilidad económica (VEN)

Cuadro 32. Resumen de la vulnerabilidad económica (VEN)

Vulnerabilidad económica (VEN)								
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados					Vulnerabilidad* VEN	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad
	VEN1	VEN2	VEN3	VEN4	VEN5			
Vulnerabilidad Económica (VEN)	2,67	1,33	3,00	1,00	1,33	1,87	46,67	Media

*promedio. Desviación estándar de 0,90 y varianza de 0,81 de la muestra

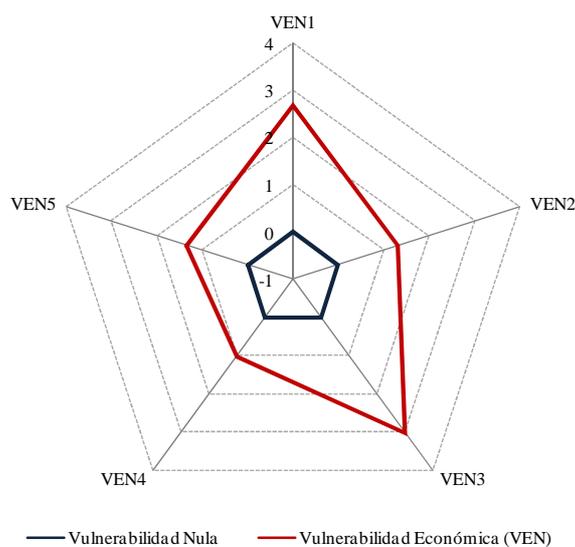


Figura 33. Distribución de los indicadores validados de la VEN

El escenario actual de la VEN muestra un valor de 1,87 (46,67%) caracterizada de media (Cuadro 32). Sin embargo, se distancian los indicadores VEN3 con valoración (3,00) y VEN1 (2,67), revelando la poca accesibilidad y oportunidades a los incentivos económicos y la falta de motivación de las instituciones para con los pobladores de la parte alta de la subcuenca, en poder suscribir incentivos económicos de conservación de áreas boscosas y fuentes de aguas. Reiteramos que la poca accesibilidad a los incentivos económicos, más la limitada capacidad económica de los pobladores de Guayacán, Moravia y el Coco va a repercutir en un futuro no muy lejano en la expansión de la frontera agrícola-pecuaria y la deforestación ilegal e indiscriminada de las áreas silvestres protegidas, tanto en la *Zona protectora cuenca río Siquirres*, como en la *Reserva forestal río Pacuare*, ambas designadas para la protección de las fuentes que abastecen de agua a las poblaciones urbanas de la ciudad de Siquirres y pueblos aledaños.

e) Vulnerabilidad social (VS)

Cuadro 33. Resumen de la vulnerabilidad social (VS)

Vulnerabilidad social (VS)											
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados							Vulnerabilidad* VS	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad	
	VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7				
Vulnerabilidad Social (VS)	4,00	2,00	4,00	4,00	2,00	4,00	1,33	3,05	76,19	Alta	

*promedio. Desviación estándar de 1,21 y varianza de 1,46 de la muestra

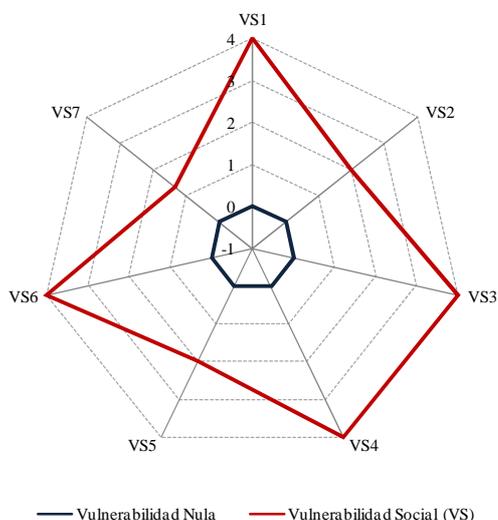


Figura 34. Distribución de los indicadores validados de la VS

El escenario actual de la VS muestra un valor de 3,05 (76,19%) caracterizada de alta vulnerabilidad (Cuadro 33), sobresaliendo los siguientes indicadores VS1, VS3, VS4 y VS6 con la máxima valoración (4), seguido de VS2 y VS5 con valores de (2,00). Esto demuestra que los indicadores sociales valorados desde óptica de las áreas de protección contra la contaminación de la franja ribereña y/o parte alta de la subcuenta, requieren de una mayor atención por parte del gobierno municipal, de las instituciones pertinentes, las organizaciones de la sociedad civil y líderes locales. La falta de estrategias ambientales y programas sociales de educación ambiental en los últimos cinco años, asimismo la deserción y el traslape de las instituciones vinculadas a la protección del recurso hídrico pueden dar inicio a nuevos cambios en el uso del suelo y repercutir negativamente en la cantidad y calidad de agua que afectaría el abastecimiento del agua para consumo humano.

f) Vulnerabilidad educativa (VED)

Cuadro 34. Resumen de la vulnerabilidad educativa (VED)

Vulnerabilidad educativa (VED)							
Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Promedio de los indicadores validados				Vulnerabilidad* VED	Vulnerabilidad (%)	Caracterización de la vulnerabilidad
	VED1	VED2	VED3	VED4			
Vulnerabilidad Educativa (VED)	4,00	4,00	4,00	0,00	3,00	75,00	Alta

*promedio. Desviación estándar de 2,00 y varianza de 4,00 de la muestra

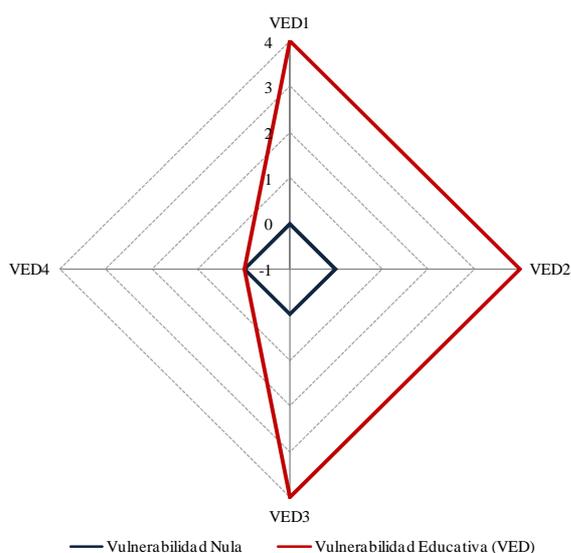


Figura 35. Distribución de los indicadores validados de la VED

El escenario actual de la VED muestra un valor promedio de 3,00 (75,00%) caracterizada de alta vulnerabilidad (Cuadro 34), resaltando los siguientes indicadores VED1, VED2 y VED3 con la máxima valoración (4). El resultado pone en evidencia una vez más la pobre educación ambiental de los pobladores de Guayacán, Moravia y el Coco, por la falta de capacitaciones, charlas, talleres, y programas radiales o escritos encaminados a promover la conservación del medio ambiente y la protección de fuentes de agua (nacientes, ojos de agua, áreas de recarga, entre otros). En ese sentido, la parte alta de la subcuenca, actualmente requiere la elaboración de un plan rector de prevención y mitigación a la contaminación de las fuentes de agua y áreas de recarga, con la participación conjunta de todos los actores cantonales. Este plan debe ser direccionado por la municipalidad, AyA y MINAET y desarrollado por una comisión comunal que deben ser constituidas bajo transcripción de acuerdo y resolución del consejo municipal en una sesión ordinaria.

4.2.1.3.2 Segunda etapa

Esta etapa presenta los resultados de la primera estimación (sin ponderar) de cada tipo de vulnerabilidad y la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I. El Cuadro 35 representa el resultado de una primera opción de análisis de vulnerabilidad, la cual no siempre resulta la más correcta, pues siempre hay factores que son más críticos que otros, dependiendo del tipo de amenazas para la cual se está haciendo el análisis (Jiménez 2007).

Cuadro 35. Primera estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I

Tipos de vulnerabilidades a la contaminación	Promedios de los tipos de vulnerabilidades						Vulnerabilidad*	Valor máximo definido	V-Global (%)	Caracterización de la V-Global
	VF	VP-I	VEC	VEN	VS	VED				
FÍSICA	2,42						2,42	4	60,61	Media
POLÍTICA-INSTITUCIONAL		3,85					3,85		96,30	Muy alta
ECOLÓGICA			1,61				1,61		40,20	Media
ECONÓMICA				1,87			1,87		46,67	Media
SOCIAL					3,05		3,05		76,19	Alta
EDUCATIVA						3,00	3,00		75,00	Alta
Promedio	2,42	3,85	1,61	1,87	3,05	3,00	2,63		65,83	Alta
Valor máximo definido	4									
V-Global (%)	60,61	96,30	40,20	46,67	76,19	75,00	65,83	65,83 corresponde al primer resultado de análisis de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I		
Caracterización de la V-Global	Media	Muy alta	Media	Media	Alta	Alta	Alta			

Donde: VF = Vulnerabilidad física; VP-I = Vulnerabilidad política-institucional; VEC = Vulnerabilidad ecológica; VEN = Vulnerabilidad económica; VS = Vulnerabilidad social; VED = Vulnerabilidad educativa.

Esta primera valoración de los tipos de vulnerabilidades a la contaminación caracteriza la parte alta de la subcuenca como de vulnerabilidad alta (Cuadro 35), con un valor promedio de 2,63 (65,83%). Aunque se resaltan las vulnerabilidades VP-I, VS y VED con los mayores valores porcentuales, se debe prestar la misma atención a los demás tipos de vulnerabilidades (VF, VEC, VEN) por presentar una caracterización media. El reto entonces está en implementar los principios, las políticas, estrategias, acciones y medidas de cómo disminuir el distanciamiento actual. La Figura 36 representa el valor porcentual de cada tipo de vulnerabilidad de la primera estimación a la vulnerabilidad global de la zona I.

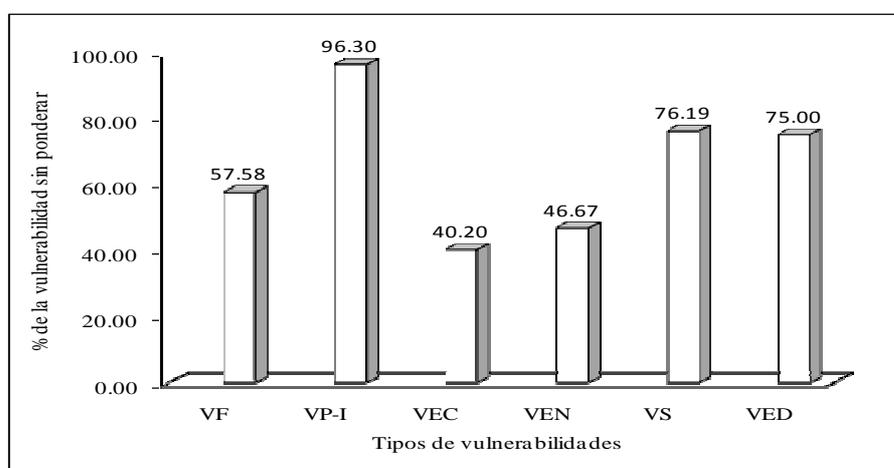


Figura 36. Primera estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I

4.2.1.3.3 Tercera etapa

La tercera etapa presenta el resultado final de la estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I, considerando los factores críticos ponderados (peso relativo). El Cuadro 36 expone el valor estimado y su caracterización.

Cuadro 36. Vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I

Estimación de la vulnerabilidad global a la contaminación de la zona I									
Zona o perímetro de la subcuenca	Promedio ponderado de los tipo de vulnerabilidad a la contaminación						V- GLOBAL	V- GLOBAL (%)	Caracterización de la V-GLOBAL
	VF	VP-I	VEC	VEN	VS	VED			
ZONA I	0,61	0,39	0,40	0,28	0,46	0,30	2,43	60,76	Alta

Donde: VF = Vulnerabilidad física; VP-I = Vulnerabilidad política-institucional; VEC = Vulnerabilidad ecológica; VEN = Vulnerabilidad económica; VS = Vulnerabilidad social; VED = Vulnerabilidad educativa.

El promedio estimado corresponde a 2,43 (60,76%) caracterizando la zona I como de vulnerabilidad alta, la cual obedece a una ecuación lineal. Esta valoración en un futuro puede ser considerada como el punto de partido de la vulnerabilidad a la contaminación en la zona I, y en base en ella, realizar evaluaciones por periodos de 5 años con el propósito de conocer la evolución o distanciamiento entre los escenarios de vulnerabilidades. El punto de partida (escenario actual) contrastado con escenarios de 5, 10 o 15 años podría ser útil para direccionar programas y proyectos ambientales en la parte alta de la subcuenca.

4.2.2 Delimitación, estimación y conceptualización de la zona II

4.2.2.1 Fundamento de la metodología y justificación de la zona II

La delimitación de zonas de protección a través del mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero (GOD), normalmente constituye el primer paso en la evaluación del riesgo a la contaminación de agua subterránea y protección de su calidad a escala municipal y provincial (Foster et al. 2002). Debido a que una vez que el agente contaminante se incorpora al flujo subterráneo, resulta difícil y costoso, tanto conocer su movimiento, como detenerlo para evitar que lleguen a las fuentes de abastecimiento y pozos de suministro de agua para consumo humano. En muchos casos es prácticamente imposible eliminar el agente contaminante, debido a las condiciones del subsuelo y a las condiciones del propio contaminante. Sobre la base de esa realidad, se deriva la necesidad de establecer zonas de protección a las aguas subterráneas de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres, pues de lo contrario sería inminente la pérdida de la calidad del recurso. En la investigación, se sirve del método GOD-S modificado con el propósito de determinar el índice de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea que junto con la metodología RAS puedan constituir y/o delimitar y las áreas críticas o zona II.

4.2.2.2 Delimitación de la zona II

Fue delimitada por medio de la metodología RAS relatada anteriormente; se realizó la estimación de la zonas potenciales de recarga hídrica subterráneas y con base en ella se delimitó la zona II que corresponden al mayor valor. El método RAS se fundamenta en la estimación del balance climático (análisis y distribución espacial de la precipitación y la

evapotranspiración real = E_{Treal}) y los coeficientes de infiltración (k_p , k_v y k_{fc}). Los resultados fueron los siguientes:

Balance climático: como se mencionó anteriormente el método de cálculo corresponde a la diferencia entre la distribución de la precipitación y E_{Treal} , por lo tanto desde la óptica de la ingeniería hidrológica, la precipitación constituye la fuente primaria del agua en la superficie terrestre y sus mediciones establecen el punto de partida en el uso, aprovechamiento y control del agua (Aparicio 1997). Asimismo, el conocimiento de la E_{Treal} en una superficie del suelo determina las pérdidas totales es decir; la evaporación directa desde el suelo y agua a la atmósfera más la pérdida de agua por transpiración de las plantas (Villón 2004).

La distribución de la precipitación y la E_{Treal} en la subcuenca o área de estudio parten de la información de las 16 estaciones meteorológicas. Concerniente a la precipitación los resultados se detallan en el índice de las características biofísicas de la subcuenca del inciso precipitación (Cuadros 24 y Figura 20). La E_{Treal} , parte del cálculo de la ETP por el método Thornthwaite, ajustado con los valores empíricos de un kg (coeficiente global de desarrollo de un cultivo) a los usos actuales de la cobertura en la subcuenca.

Los valores de la E_{Treal} interpolado por el método IDW (Inverso de la Distancia Ponderada) presentan rangos de 0 - 1287 mm/año en la subcuenca, mientras que en la parte alta los rangos varían de 770 - 1287 mm/año (Figura 37). Seguidamente, el Cuadro 37 muestra la distribución de la E_{Treal} en la subcuenca.

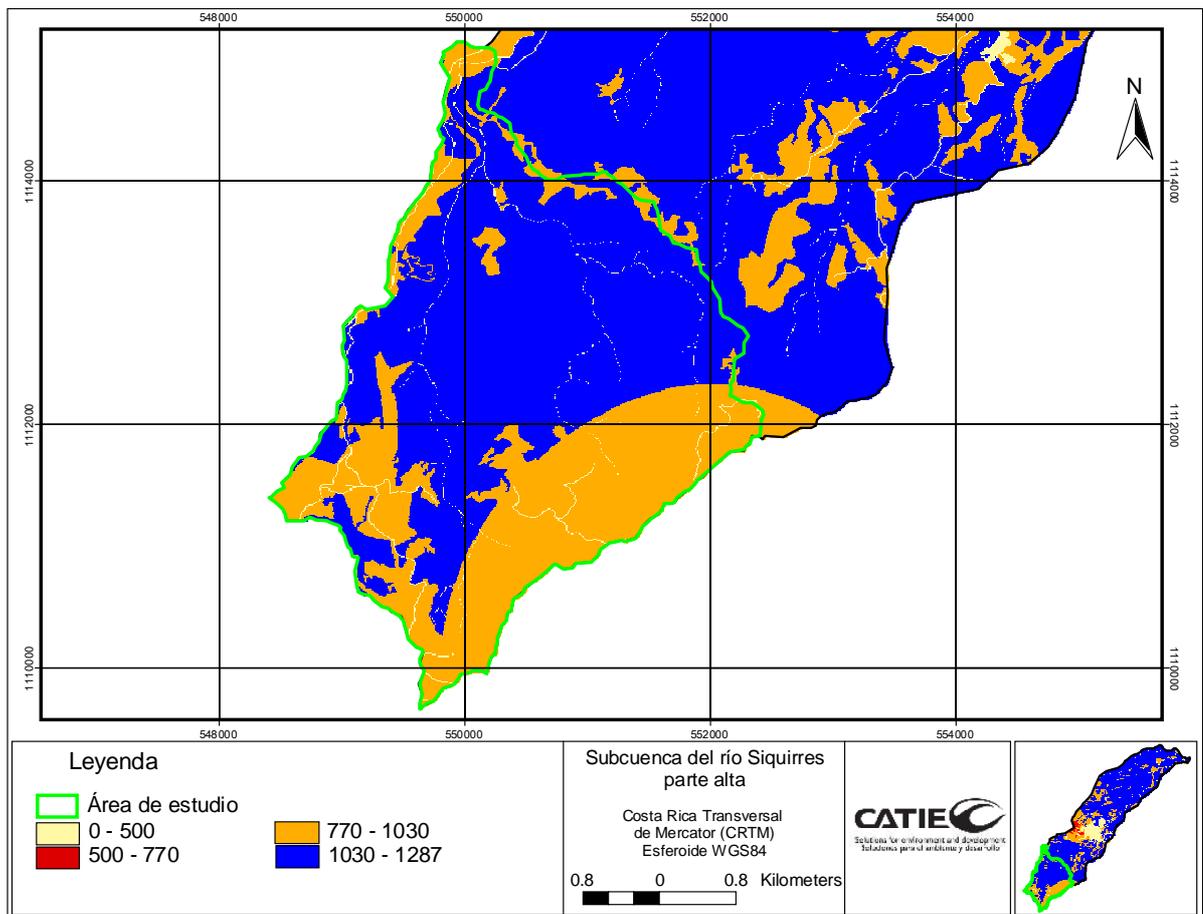


Figura 37. ETreal de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

Cuadro 37. Rangos de la ETreal en la subcuenca del río Siquirres

ETreal (mm/año)	Área de la subcuenca		Perímetro (km)	%
	km ²	ha		
menos 500	3,84	383,64	319,94	6,94
500 – 770	0,56	55,62	9,52	1,01
770 – 1030	11,57	1157,05	253,93	20,93
1030 - 1287	39,32	3932,46	380,38	71,13
Total	55,29	---	---	100,00

El resultado de la unión de las dos variables a través del programa ArcView 3,3, (precipitación menos ETreal), modela la distribución espacial del BC de la parte alta, con valores que van de 1930 - 3400 mm/año, revelando una considerable disponibilidad de agua para escorrentía e infiltración (Figura 38). Posteriormente en el Cuadro 38 se muestra la distribución del BC (agua disponible) en la subcuenca.

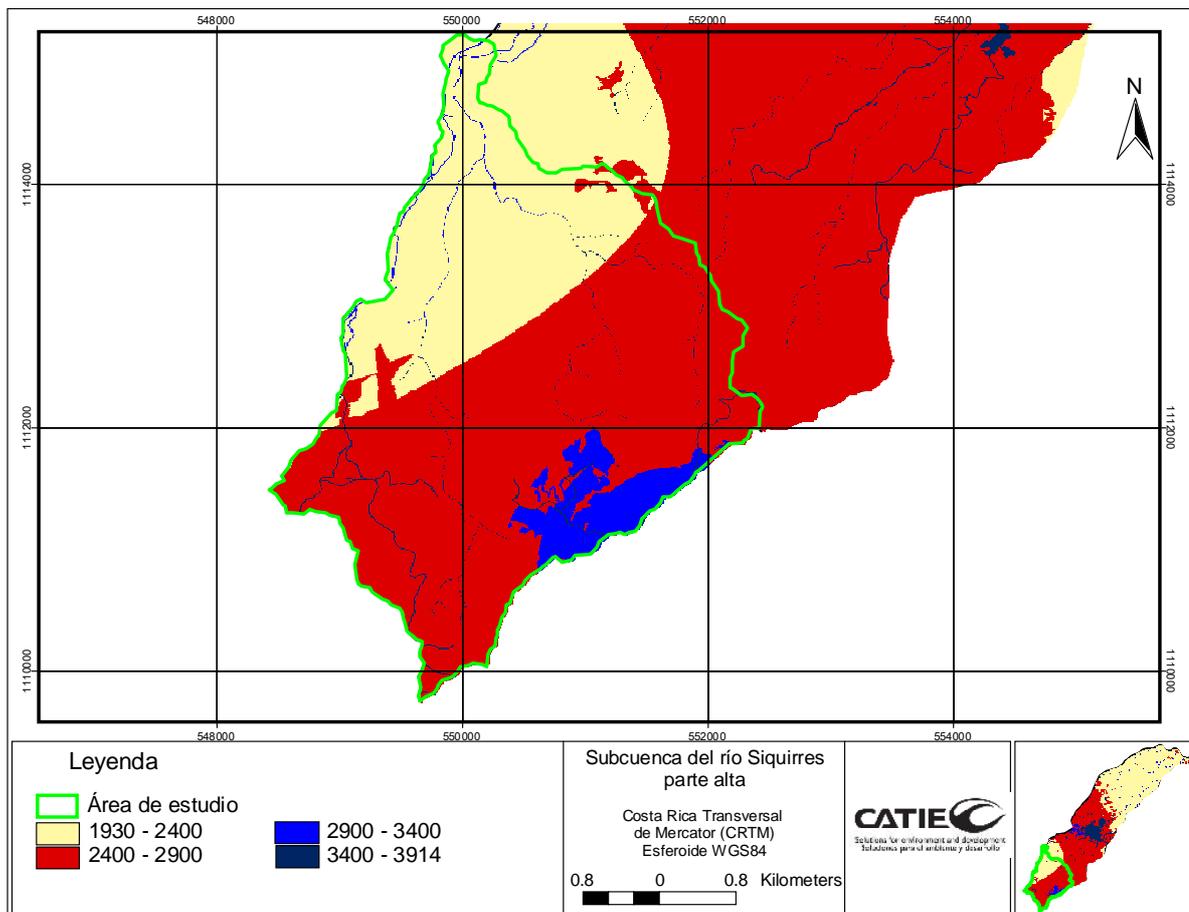


Figura 38. BC de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

Cuadro 38. Rangos del BC en la subcuenca del río Siquirres

BC (mm/año)	Área de la subcuenca		Perímetro (km)	%
	km ²	ha		
1930 – 2400	26,78	2678,35	216,32	48,44
2400 – 2900	23,55	2354,69	223,59	42,59
2900 – 3400	1,69	168,96	145,91	3,06
3400 - 3914	3,27	326,92	194,87	5,91
Total	55,29	---	---	100,00

Coeficiente de infiltración: las recargas de agua en las zonas de saturación provienen de fuentes superficiales, las que comprenden tres caminos: 1) infiltración del agua desde la superficie a la zona de suelo no saturada; 2) el movimiento descendente de agua a través de los manantiales comprendidos en la zona de aireación; y 3) la emigración de parte del agua al manto freático (Schosinsky y Losilla 2000). Para Junker (2005) el coeficiente de infiltración

(C) es un valor relativo sin dimensión, que expresa para una zona definida, la infiltración potencial basada en los coeficientes del modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000).

La subcuenca presenta diferentes rangos de infiltración de recarga. En la Figura 39 se observa una predominancia de áreas con los mayores valores de infiltración, esto prescribe al área de estudio como la zona de recarga donde se obtiene la infiltración del agua que fluye a través del río Siquirres y que brota a través de los pozos. Seguidamente, el Cuadro 39 presenta los rangos de infiltración obtenidos en la subcuenca.

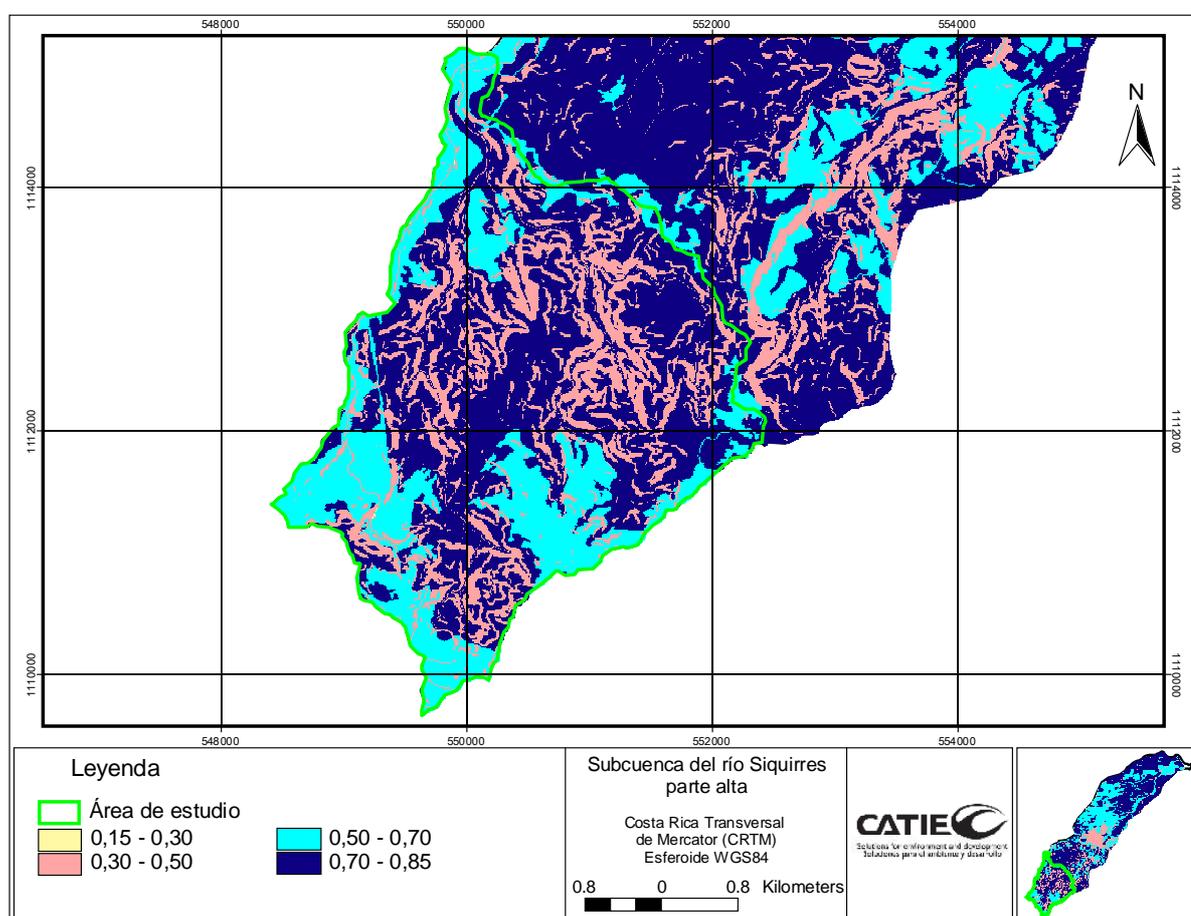


Figura 39. Coeficiente de infiltración de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

Cuadro 39. Rangos de coeficientes de infiltración en la subcuenca del río Siquirres

Coeficiente de infiltración	Área de la subcuenca		Perímetro (km)	%
	km ²	ha		
0,15 – 0,30	0,41	2069,78	2,07	0,73
0,30 – 0,50	7,93	580801,72	580,80	14,35
0,50 – 0,70	9,46	271212,03	270,21	17,12
0,70 – 0,85	37,49	672555,13	672,56	67,81
Total	55,29	---	---	100,00

Distribución de la recarga de agua subterránea (RAS): la delimitación de la zona de recarga de aguas subterráneas (zona II) en la subcuenca, parte de la necesidad de contar con un argumentos biofísico-científicos ante cualquier negociación que requiera justificar la conservación de la parte alta o más concretamente la protección de las fuentes de agua ante la contaminación puntual o difusa. Además, con el argumento se pretende dar las pautas al proceso de sensibilización (educación ambiental), hasta lograr el proceso de gestión que conlleven a la conservación del recurso hídrico. En ese sentido, se pretende crear un comité cantonal o junta de agua comunal, representados por todos los actores de base, llámese funcionario de instituciones gubernamentales y no gubernamentales, productores, comunitarios, gobierno municipal, comunitarios, dueños de fincas, entre otros, con el objetivo inmediato de plantear iniciativa u ordenanzas municipales para hacer eficiente la protección de la zona II.

Los resultados demostraron que la subcuenca presenta diferentes láminas de recarga de agua subterránea, variando desde los 521 - 2740 mm/año. De igual manera, las derivaciones expresan que a nivel de subcuenca se muestra una distribución casi homogénea referente a los rangos de 1300 - 1700 mm/año, debido a que representa el 53,35% del área total, partiendo de esta derivación se escogió las zonas más sensibles (rangos mayores a 2000 mm/año) que podrían alterar el caudal del río Siquirres de no ser protegida, la cual correspondió a la zona II o área de recarga hídrica de la subcuenca. Referente al área de estudio, predominan los mayores valores de recarga hídrica, donde el 57,44% recargas con valores mayores a los 1800 mm/año.

La Figura 40 muestra las zonas de recargas del área de estudio y la zona II, con recarga mayor a los 2000 mm/año. Los Cuadros 40 y 41 exponen la distribución porcentual del área de estudio y de la subcuenca.

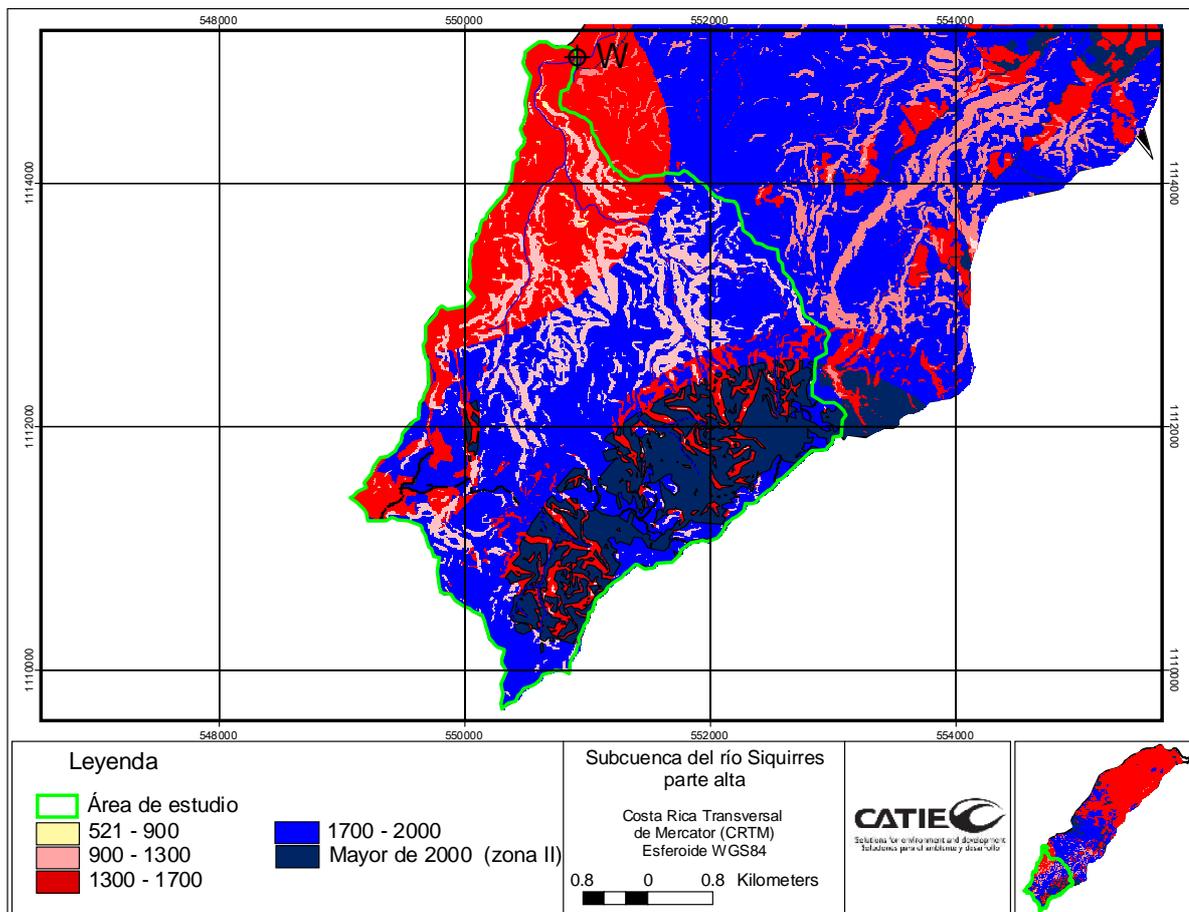


Figura 40. Zona II delimitada en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

Cuadro 40. Distribución de las áreas de recarga de agua subterránea anual en el área de estudio

Recarga (mm/año)	Rangos establecidos	Área de la subcuenca		Perímetro (km)	%	Observación
		km ²	ha			
521 – 900	Muy baja	0,02	1,77	3,50	0,17	---
900 – 1300	Baja	1,57	156,88	123,43	15,06	
1300 - 1700	Media	2,85	284,57	136,08	27,33	
1700 – 2000	Alta	4,21	420,54	140,15	40,38	
Mayor de 2000	Muy alta	1,78	177,66	75,69	17,06	Zona II
Total		10,41	---	---	100,00	---

Cuadro 41. Distribución de las áreas de recarga de agua subterránea anual en la subcuenca

Recarga (mm/año)	Área de la subcuenca		Perímetro (km)	%
	km ²	ha		
521 – 900	0,42	41,77	24,40	0,76
900 – 1300	3,10	310,25	255,35	5,61
1300 - 1700	29,50	2949,92	342,10	53,35
1700 – 2000	18,23	1822,52	409,34	32,96
Mayor de 2000	4,05	404,54	151,68	7,32
Total	55,29	---	---	100,00

4.2.2.3 Estimación de vulnerabilidad a la contaminación de la zona II

Se estimó a partir del esquema del método GOD-S modificado (Figura 13) que determina la vulnerabilidad intrínseca, por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. La zona II parte de la descripción y valoración de cada factor del método GOD-S modificado según literatura y observaciones de campo, seguido de la multiplicación de los factores GOD-S modificado de acuerdo a la geología predominante en la subcuenca.

4.2.2.3.1 Descripción y valoración de los factores del método GOD-S modificado

Factor **G** = ocurrencia del agua subterránea: la subcuenca del río Siquirres presenta un acuífero no confinado (libre) de valoración (1,0). Esta clasificación parte de tres supuestos: 1) según las características litológicas; 2) según el tipo de hueco; y 3) según la presión hidrostática del agua. Los primeros dos supuestos se detallan en el factor O (litología predominante sobre el acuífero) y el tercero (presión hidrostática), se hace evidente en la información de los pozos (profundidad y nivel estático) registrados. La descripción detallada del factor G corresponde a la literatura de los autores referidos en el factor O y D.

1. Según las *características litológicas*. Se define como un acuífero libre por su origen detrítico poco consolidado de depósitos de edades geológicamente recientes y depósitos en diferentes ambientes sedimentarios (conglomerados, areniscas) y del reciente actual del cuaternario (depósitos aluviales y coluviales). Por parte de los conglomerados y areniscas (gravas y arenas cementadas) constituidos en la formación río Banano y la formación Suretka, se establece el tipo de acuífero (libre), no obstante, se dificulta en tratar de explicar si es un acuífero bueno o malo debido a la falta de estudios detallados sobre el grado de cementación y de cohesión. Es decir, se desconoce, si se ha producido una disolución del cemento o bien, si este cemento no rellenó todos los poros intergranulares. En lo que concierne al reciente actual (cuaternario), se establece la clasificación del acuífero, por estar representado de aluviones y fluviolacustres cuyos depósitos son restrictivos a la zona costera, formando un acuífero libre de baja potencialidad cuyos depósitos están constituidos mayormente por arenas finas a medias, subredondeadas y redondeadas.

2. Según el tipo de *huecos*. Por presentar depósitos de granulometría homogénea (porosidad intergranular), cuyos intersticios están conformados por los huecos porosos que existen entre

los clastos (formación río Banano y formación Suretka) y/o por lentes de arcillas densas, arcillas limo-arenosas, arena arcillosa con lechos de guijarros, gravas y conglomerados finos (depósitos aluviales y coluviales), siendo, estos materiales altamente porosos.

3. Según la *presión hidrostática del agua contenida en los acuíferos*. Para el estudio, es el supuesto de mayor importancia en la definición del tipo de acuífero (libre) y se debe a cuatro características: 1) la existencia de la zona no saturada entre la superficie del terreno y el nivel freático, en la subcuenca la zona no saturada (Factor S) corresponde a suelos de textura mediana a media con profundidades de 40 cm a mayor de 120 cm (formación río Banano y Suretka) y suelos de textura moderadamente gruesas a mediana con profundidades generalmente mayores a 120 cm (depósitos aluviales y coluviales); 2) el nivel piezométrico real, por existir una superficie libre y real del agua encerrada, que está en contacto con el aire y a presión atmosférica, las fotos 1, 2 y 3 muestran pozos artesanales con un nivel freático superficial a presión atmosférica ubicados en la parte alta de la subcuenca; 3) la superficie libre de agua a presión atmosférica, porque el límite de saturación del acuífero coincide con la superficie piezométrica, corroborado en los datos del nivel estático de los pozos registrados por el SENARA y los verificados en campo; y finalmente 4) la recarga directa, por recibir agua de las precipitaciones, es decir, las recargas ocurren en un área de topografía más alta (demostrada en la delimitación de la zona II por el método RAS), directa del agua de lluvia.



Foto 1. Pozo artesanal a presión atmosférica en la parte alta de la subcuenca



Foto 2. Nivel estático muy superficial a presión atmosférica



Foto 3. Medición de la profundidad del pozo

En la Figura 41 se esquematiza el acuífero libre de acuerdo a la información de los pozos registrados, donde el agua alcanza el mismo nivel que tendría dentro de la formación geológica, es decir, la superficie de los niveles estáticos de cada pozo es igual a la superficie real que alcanzaría el agua a presión atmosférica o nivel freático. Igualmente, se apoyó de las características morfométricas de la subcuenca, del nivel estático de los pozos, la existencia de zona no saturada, la litoestratigrafía del área de Siquirres (Anexo 1, 2) y la presencia de zonas de recarga hídrica, que permitió esquematizar el acuífero libre de la subcuenca.

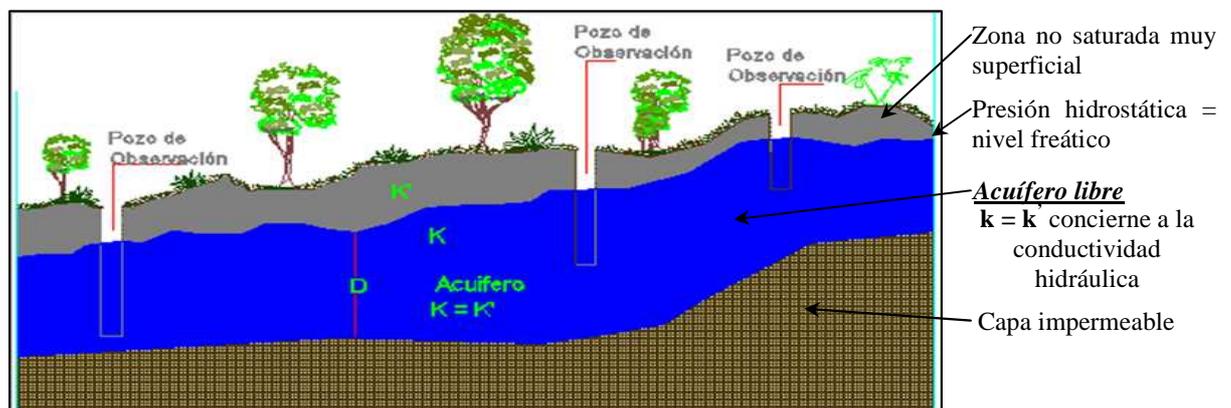


Figura 41. Acuífero libre característico de la subcuenca del río Siquirres desde el punto de vista de la presión hidrostática

Está claro que el nivel de confinamiento del acuífero en esta zona deber ser estudiado con mayor detalle. Sin embargo, considerando la bibliografía consultada y opiniones de expertos se consideró al tipo de acuífero como no confinado de valoración 1,0.

Factor **O** = litología predominante sobre el acuífero: la zona de Siquirres, al igual que la de Turrialba, han sido objeto de numerosas investigaciones de tipo geológico, neotectónico, sismológico y de amenazas sísmicas. El ICE ha patrocinado la mayoría de los estudios, como parte de los proyectos hidroeléctricos que han estado desarrollando en las zonas desde la década de 1970, entre ellos, se mencionan: Angostura, Guayabo, Palomo, Pacuare, y Siquirres. La Escuela Centroamericana de Geología, por otro lado, ha promovido el cartografiado geológico de gran parte de los cantones de Turrialba y Siquirres, contenida en dos campañas geológicas de 1986 y 1996 (Linkimer 2003).

Desde el punto de vista geológico, neotectónico y geomorfológico, el área de investigación ha sido referida en los estudio de Dondoli y Torres (1954), Malavassi (1967), Krushensky (1972), Berrangé et al. (1977), Granados et al. (1980), Madrigal et al. (1984), Sáenz (1985), Castillo (1993), Cervantes (1988, 1989), Pérez (1989), Valverde (1989), Mora et al. (1990), Escalante (1996), RECOPE-MINAET (1997), Bergoeing (1998), Alvarado y Leandro (1999), MAG (2000), Linkimer (2003), entre otros. Estos estudios en conjunto describen casi en su totalidad la columna estratigráfica de la cuenca de Limón Sur, expuesta en gran parte en las hojas cartográficas Tucurrique y Bonilla (Escala 1: 500.00 del IGN).

De acuerdo al MAG (2000), RECOPE-MINAET (1997) y Cervantes (1989), la subcuenca pertenece en su totalidad al tipo de roca sedimentaria⁴⁶, constituida geológicamente por materiales de los periodos terciario y cuaternario. Del periodo terciario correspondiente a la edad Plio-pleistoceno⁴⁷ reciente constituido por dos unidades geológicas: 1) unidad de lutitas⁴⁸ carbonosas y areniscas⁴⁹ (formación río Banano); y 2) unidad de conglomerado⁵⁰ (formación Suretka). Entre los materiales del periodo cuaternario⁵¹ reciente se constituye la unidad de

⁴⁶ Son las que se han constituidos como consecuencia de fenómenos de alteración, transporte y sedimentación, sobre cualquier tipo de roca anterior, por lo tanto los minerales que las componen pueden ser los mismos que existen en la roca anterior después de haber sufrido disgregación física, transporte y sedimentación. La clasificación se basan en los tamaño de los trozos que la componen; por ejemplo, tamaños mayor de 2 mm (conglomerados), 2 a 0,06 mm (areniscas) y menores de 0,06 mm (arcillas).

⁴⁷ El Plio-Pleistoceno: es un término que se vuelve cada vez más de uso, para describir un largo y continuo correr de fechas de capas sedimentarias. Data del periodo de la frontera entre el Plioceno y Pleistoceno.

⁴⁸ Es una roca detrítica, es decir, formada por detritos, y está integrada por partículas del tamaño de la arcilla y del limo. En las lutitas negras el color se debe a la presencia de materia orgánica. Es conocida por ser la roca madre o almacén por excelencia, dadas sus condiciones de porosidad y permeabilidad.

⁴⁹ Arenisca: es una roca sedimentaria de tipo detrítico, de color variable, que contiene clastos de tamaño de arena. Después de la lutitas, es la roca sedimentaria más abundante y constituye cerca del 20% de ellas. Las areniscas figuran entre las rocas consolidadas más porosas, aunque ciertas cuarcitas sedimentarias pueden tener menos de 1% de espacios vacíos. Esta roca se forma en el interior de la tierra formando varias capas o estratos.

⁵⁰ Conglomerados: rocas sedimentarias clásicas formadas por detritos (material de meteorización y fragmento rocosos de cualquier tipo) grandes o medianos, redondeados, de roca unidos por cementos de calizas, silicios u otros y consolidados diagenéticamente.

⁵¹ Cuaternario: la era geológica más reciente. Comienza hace un millón de años tras el Terciario y comprende la era actual. División: diluvial (pleistoceno) y aluvial (holoceno). Rocas: cantos rodeados, loes, arcillas, cenizas volcánicas, lava basáltica y toba.

depósitos aluviales⁵² y coluviales⁵³. A continuación se describen las formaciones geológicas correspondientes al terciario (formación río Banano y Suretka), y cuaternario (depósitos aluviales y coluviales) predominantes en la subcuenca.

Formación río Banano: corresponde a arenitas, lutitas y conglomerados. Para Bottazzi et al. (1994) los sedimentos de esta formación fueron depositados sobre las rocas de la formación Uscari, en un ambiente marino somero (estuarios, deltas, llanuras de marea y abanicos deltaicos) durante el Mioceno Superior - Plioceno. De acuerdo a Fernández (1987) tiene un espesor mínimo de 200 m en la región de Turrialba y Siquirres.

Según Cervantes (1989) esta formación se constituye de areniscas medias a gruesas con escasos conglomerados en el techo y lutitas carbonosas en la base, muestran diferentes facies sedimentarias⁵⁴ como conglomerados, areniscas de grano fino, limolitas⁵⁵ y lutitas carbonosas de color oscuro justo debajo del contacto, la calidad de esta formación es mala, y debe considerarse muy débil desde el punto de vista mecánico. Las muestras han revelado una evolución con una dilatación y una fuerte disgregación del material (limolitas), dando testimonio de una cierta cantidad de arcillas expansivas. La formación río Banano se define en el área de Siquirres por sedimentos deltaicos proximales, con un espesor máximo de 250 m y se encuentra sobreyaciendo por encima de la formación Uscari (flujos lávicos) (Anexo 1 correlación de secciones estratigráficas, zona de Siquirres).

Formación Suretka: el nombre se deriva de la población de Suretka (actualmente abandonada), situada a 40 km al oeste de la boca del río Sixaola. Consiste principalmente de conglomerados y brechas⁵⁶, con granos que varían en tamaño desde arcillas hasta cantos⁵⁷ de 1 m de diámetro (Castillo 1975). El espesor total es de 1500 m (Bergoeing et al. 1994), aunque en el área de la planta hidroeléctrica Angostura es de sólo 60 m (Alvarado y Leandro 1997).

⁵² Aluvial (aluvional): sedimentos debido a la erosión fluvial.

⁵³ Coluvial: depósitos de sedimentos que consiste de aluvión en parte y de fragmentos angulares de roca original (material de talus, avalancha).

⁵⁴ Facies sedimentarias: formación de los depósitos sedimentarios que guardan una clara relación física y genética entre sí. Litofacies: reflejan las características físicas y composicionales de los sedimentos y sedimentitas, se las define por su litología (textura y composición), estructuras sedimentarias y geometría.

⁵⁵ Limolitas: rocas sedimentarias constituida por un tamaño de partícula correspondiente al limo (20 – 2 micras) o tamaños entre 1/16 mm y 1/256 mm. Estas rocas presentan composiciones muy variadas.

⁵⁶ Brechas: roca constituido por fragmentos angulares de minerales distribuidos en una matriz más fina; puede ser sedimentarias, volcánicas, o calcita micro cristalina.

⁵⁷ Canto: similar al clastos, aunque atribuido a mayor grado de rodamiento.

Autores como Dengo (1962), menciona un espesor del conglomerado Suretka de 1700 m; Malavassi (1971), lo estimó entre 200 a 800 m.

Cervantes (1989) en su estudio *Base geológica para los análisis geotécnicos del proyecto hidroeléctrico Siquirres, provincia de Limón, Costa Rica*, señala que el conglomerado de la formación Suretka en el sector posee un espesor de 500 m, que incluye los depósitos aluviales continentales y flujo laháricos, al que supone una actividad volcánica activa. Manifiesta que la formación Suretka está constituida de: conglomerados aluviales de diferentes tamaños, desde partículas de arcilla hasta bloques de más de un metro de diámetro como basaltos⁵⁸ andesitas y cuarzodioritas cementadas por sílice, con intercalaciones de unos pocos estratos o lentes de areniscas y flujos laháricos, de ambiente litoral y continental, ubicados en la zona del sector Sur de la carretera que une a villa Cairo y el poblado Babilonia, hasta la ladera noreste del cerro Roca, igualmente se localizan en los márgenes de la quebrada Lajas hasta el sector aledaño al poblado Calvario; y de materiales indiferenciados, localizados en la zona comprendida por el sector sur de la ciudad Siquirres, el alto Berlín, confluencia de los ríos Rubio y Reventazón y ladera suroeste de fila Amador, hasta el límite con el Cantón de Matina. Al igual que la formación río Banano, esta formación descansa sobre flujos lávicos (lavas alcalinas).

Unidades de depósitos recientes: siendo los más característicos los depósitos aluvionales y coluviales. Referente a los *aluvionales*, corresponde a los depósitos recientes del río Reventazón, Pacuare y sus afluentes a lo largo de sus márgenes y cerca de su desembocadura. Se constituye en su mayoría por cantos de rocas volcánicas e intrusivas y en menor grado por sedimentos, de buena redondez y de regular a buena esfericidad. El diámetro máximo de los bloques es de 80 cm, y el mínimo de 1 cm, con promedio de 25 cm, intercalados con bancos de arena fina, media y gruesas de 0,5 a 1 mm de espesor. Hallándose por medio de geofísica espesores promedios de 15 a 20 m, con algunos muy localizados de 40 m relacionados al paleocauces. En los aluviones que se ubican aguas abajo de Siquirres se han obtenidos espesores promedios de 5 m (Cervantes 1989).

⁵⁸ Basalto: roca extrusiva compuesta principalmente por plagioclasa cálcica y piroxeno, con o sin olivino.

En todos estos depósitos aluvionales se observan diferentes niveles de terrazas, que manifiestan una tectónica activa en la zona, facilitando en alguna medida el desarrollo de importantes espesores (Cervantes 1989). De acuerdo a Castilla (1993) los aluvionales, están constituidos por cantos rodeados de origen ígneo, de hasta 0,5 m de tamaño, gravas gruesas a finas, subredondeadas y redondeadas y arena fina de granos subangulares; se encuentran además, lentes de arcillas pardas y gris, y limo pardo arcillo-arenoso.

Los depósitos *coluviales* están constituidos por los depósitos de pie de laderas, que se encuentran aflorando a lo largo de la parte baja de la subcuenca, no superando los 15 m de espesor. Su desarrollo se debe principalmente a movimientos de masas gravitatorias en laderas inestables. En unidades tales como la conglomerática, se hacen patentes debido a los fuertes cortes en los márgenes de los ríos y las quebradas, sumando el tectonismo sobre impuesto. Otro factor que permite la inestabilidad y por ende el depósito, es la alteración hidrotermal producto de las intrusiones de sedimentos. De acuerdo a la información descritas sobre las formaciones geológicas existentes en la subcuenca, se definió el factor O.

Cuadro 42. Factor O de la subcuenca del río Siquirres

No.	Formación geológica	Rango del factor O	Factor O
1	Formación río Banano (unidad de lutitas carbonosas y areniscas)	0,5 - 0,6 - 0,7	0,6
2	Formación Suretka (unidad de conglomerado)	0,5 - 0,6 - 0,7	0,6
3	Depósitos aluviales y coluviales (unidad de depósitos recientes)	0,8	0,8
Nota: el factor O, corresponde al valor central del rango			

Factor **D** = profundidad del agua: la determinación de la profundidad del agua subterránea a través de pozos corresponde a dos fuentes de información: 1) pozos registrados por SENARA del Cantón de Siquirres; y 2) los pozos reconocidos en campo. Del total obtenido (información de 221 pozos del Cantón de Siquirres) se seleccionaron únicamente los que ostentaban una distancia de radio horizontal menor a 4 km con respecto a la red de drenaje de la subcuenca, resultando 41 pozos. Con esta cantidad se confeccionó el mapa de profundidades del agua subterránea y permitió la valoración del factor D.

El criterio seleccionado (radio horizontal menor a 4 km) obedece a 18 mediciones realizadas desde el cauce principal del río Siquirres a los ríos Reventazón; y Pacuare. Obteniendo distancia máxima de 6,5 km y mínima de 0,4 km referente al río Reventazón, con respecto al río Pacuare se obtuvo distancia máxima de 7 km y mínima de 0,8 km. Estas distancias reflejan que para obtener una apreciación de la división hidrogeológica a través del flujo subterráneo entre el río Siquirres y los ríos Reventazón y Pacuare se pueden seleccionar distancias inferiores a 4 km o exactamente distancias con promedios menores a 3,5 km con respecto al río Reventazón y 3,3 km al río Pacuare (Anexos. 22). En seguida, se muestran los Cuadros 43 y 44 que resumen la información de los 41 pozos seleccionados (Anexo 23) con sus respectivas valoraciones del factor D y la Figura 42 muestra las profundidades de los pozos con sus niveles estáticos correspondiente al río Siquirres.

Cuadro 43. Información de los pozos seleccionados para la determinación del factor D

No. de pozos	Información de los pozos	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Varianza	Desviación estándar
41	Profundidad (m)	26,34	84	5	323,03	17,97
	Caudal (l/s)	8,24	19	0,50	26,14	5,11
	Nivel estático (m)	3,70	12	0,01	8,44	2,91
	Nota: 37 pozos corresponden al registro de SENARA y 4 reconocidos en campo					

Cuadro 44. Factor D de la subcuenca del río Siquirres

Categorías del factor D (m)	Profundidades de pozos (m)	Factor D
< 5	4 - 5	0,9
5 - 20	5 - 20	0,8
20 - 50	20 - 38	0,7

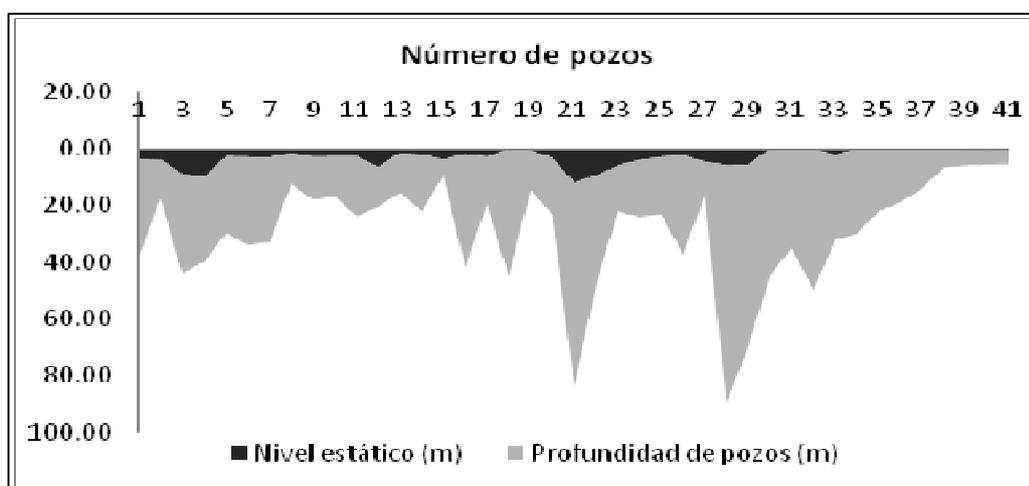


Figura 42. Profundidades de los pozos y nivel estático de la subcuenca del río Siquirres

Factor **S** = características texturales del suelo: la información de las variantes texturales (textura de superficie y subsuelo) están basadas en dos de fuentes de información: 1) levantamiento y descripción de 71 barrenas, realizadas en el 2007 por el MAG de Siquirres; y 2) del estudio de suelo y capacidad de uso de las tierras (Escala 1:500.00) para la zonificación agropecuaria de las regiones Huetar Norte, Atlántico y Brunca, elaborado por la dirección de investigación agropecuaria del departamento de suelos y evaluación de tierras del MAG.

De acuerdo a las fuentes mencionadas las texturas de superficie (profundidades de 0 - 30 cm) varían de media a mediana en la parte media y alta de la subcuenca, y en la parte baja predominan las textura moderadamente gruesa con pequeñas áreas de textura media. Concerniente a las texturas de subsuelo (profundidades > 30 cm) prevalecen las texturas medias a finas en la parte media y alta de la subcuenca y textura media en la parte baja. El Cuadro 45 muestra las variantes texturales establecida según la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras en Costa Rica (MAG 1995) con los rangos codificado del Factor S. En la Figura 43 el procedimiento realizado en la selección de la textura predominante y en el Cuadro 46 las variantes texturales de superficie y subsuelo de la subcuenca con sus valoraciones S, seleccionado a través del valor central del rango.

Cuadro 45. Variantes texturales de la metodología (MAG 1995) con los rangos del Factor S

No.	Variantes texturales	Rango del Factor S
1	Gruesas (arenosa, franco arenosa, arena franca)	1,0
2	Moderadamente gruesas (arenosa franco fina, franco arenosa media y gruesa)	0,9 - 1,0
3	Medianas (franca, franco arenosa fina, franco limosa)	0,8 - 0,9
4	Media a moderadamente finas (franco arcillosa, arcillo arenosa, limosa, franco arcillo arenosa)	0,6 - 0,8
5	Fina (arcillosa, arcillo limosa)	0,5 - 0,6
6	Muy fina (mayor 60 % arcilla)	0,5

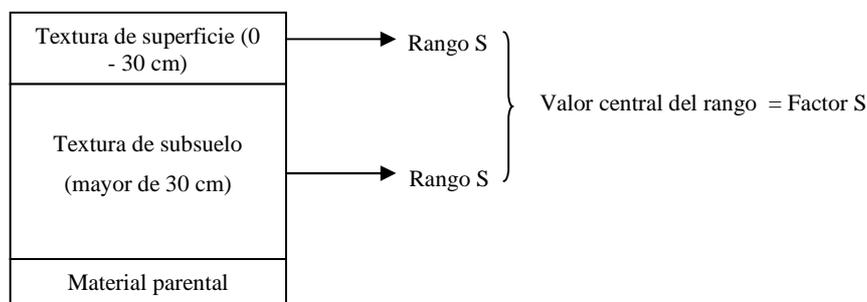


Figura 43. Selección del Factor S en la subcuenca del río Siquirres (variaciones texturas de superficie y subsuelo)

Cuadro 46. Variantes texturales y Factor S de la subcuenca de río Siquirres

No.	Textura de superficie (0 - 30 cm)	Rango S	Textura de subsuelo (> 30 cm)	Rango S	Valor central del Factor S	Factor S
1	Media	0,6 - 0,8	Fina	0,5 - 0,6	0,5 - 0,6 - 0,8	0,6
2	Mediana a media	0,6 - 0,8 - 0,9	Media	0,8 - 0,9	0,6 - 0,8 - 0,9	0,8
3	Media	0,6 - 0,8	Media	0,6 - 0,8	0,6 - 0,8	0,7
4	Moderadamente gruesa	0,9 - 1,0	Mediana a media	0,6 - 0,8 - 0,9 a	0,6 - 0,8 - 0,9 - 1,0	0,85

4.2.2.3.2 Estimación de la zona II por el método GOD-S modificado

El grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea fue estimado a partir de la geología predominante en la subcuenca; se establecieron los factores GOD-S modificado por cada formación geológica con sus respectivos rangos de valoraciones y por simple multiplicación se obtuvieron los valores mínimos y máximos de cada factor GOD-S. Resultando un nivel generalizado de vulnerabilidad media en toda la subcuenca, no obstante en la formación Suretka se obtuvo un nivel de vulnerabilidades baja a media (0,29 - 0,43) y en las unidades de depósitos recientes aluviales y coluviales, vulnerabilidades de media a alta (0,49 - 0,54). La baja vulnerabilidad en la formación Suretka, posiblemente se debió al ajuste del Factor S, debido a la predominancia de las texturas medias en la superficie y finas en el subsuelo. En el Cuadro 47 se representa el resultado de la multiplicación de los factores antes mencionado que estimó el grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la subcuenca.

Cuadro 47. Estimación del método GOD-S modificado de la subcuenca del río Siquirres

GEOLOGÍA	Formación río Banano	Formación Suretka	Depósitos aluviales y coluviales
Factor G = Ocurrencia del agua subterránea	Acuífero no confinado		
Puntuación	1,0	1,0	1,0
Factor O = Litología predominante sobre el acuífero	Areniscas medias y gruesas con escasos conglomerados en el techo y lutitas carbonosas en la base	Secuencia de conglomerados intercalados con lentes de areniscas y flujos laháricos	Coluvio – aluvión
Puntuación	0,6	0,6	0,8
Factor D = Profundidad del agua	< 5 m / 5 - 20 m	< 5 m / 5 - 20 m / 20 - 50 m	5 - 20 m / 20 - 50 m
Puntuación	0,9 / 0,8	0,9 / 0,8 / 0,7	0,8 / 0,7
Factor S = Características texturales del suelo	Media	Mediana a media / media a fina	Moderadamente gruesa, mediana a media / media
Puntuación	0,7	0,8 / 0,6	0,85 / 0,7
Rangos GOD-S	0,34 - 0,38	0,29 - 0,43	0,49 - 0,54
Vulnerabilidad	Media	Baja a media	Media a alta

4.2.2.3.3 Mapeo del índice de vulnerabilidad por el método GOD-S modificado

La espacialización del grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea GOD-S modificado sigue el procedimiento indicado en la Figura 13, basado en el esquema establecido por Agüero et al. (2006), tal proceso fue estimado manualmente (Cuadro 47). El mapa GOD-S modificado fue concebido como una primera indicación general del peligro potencial a la contaminación que representa el agua subterránea, y de esta manera, permitir a reguladores, planificadores y decisores considerar nuevas propuestas de protección y control de contaminación a las actuales.

Para el presente estudio el método GOD-S modificado, estimó y espacializó los factores antes mencionados, hasta establecer el mapeo GOD-S. Seguidamente se representan los mapas de cada factor GOD-S modificado para toda la subcuenca y el mapa GOD-S, haciendo alusión únicamente al área de estudio.

a) Factor **G**: desde el punto de vista de la representación cartográfica la *ocurrencia del agua subterránea* (tipo de acuífero) no revela mucha información debido a que constituye una sola valoración en toda la subcuenca (acuífero libre con valoración 1,0).

b) Factor **O**: la litológica en la subcuenca presenta una distribución bien definida con respecto a su morfología y periodo geológico. En ese sentido, la división parte de la zona urbana de Siquirres, donde hacia el Norte o parte baja predominan los depósitos aluviales y coluviales del cuaternario reciente y hacia el Sur o parte alta de la subcuenca las formaciones del periodo terciario (Figura 44). La distribución de cada factor es el siguiente: formación río Banano representa el 18,12% del área del total (10,02 km²), un 17,83 km de perímetro; formación Suretka el 19,4% (10,76 km²), un 24,6 km de perímetro; y los depósitos aluviales y coluviales con el 62,4% (34,52 km²), un 30,83 km de perímetro.

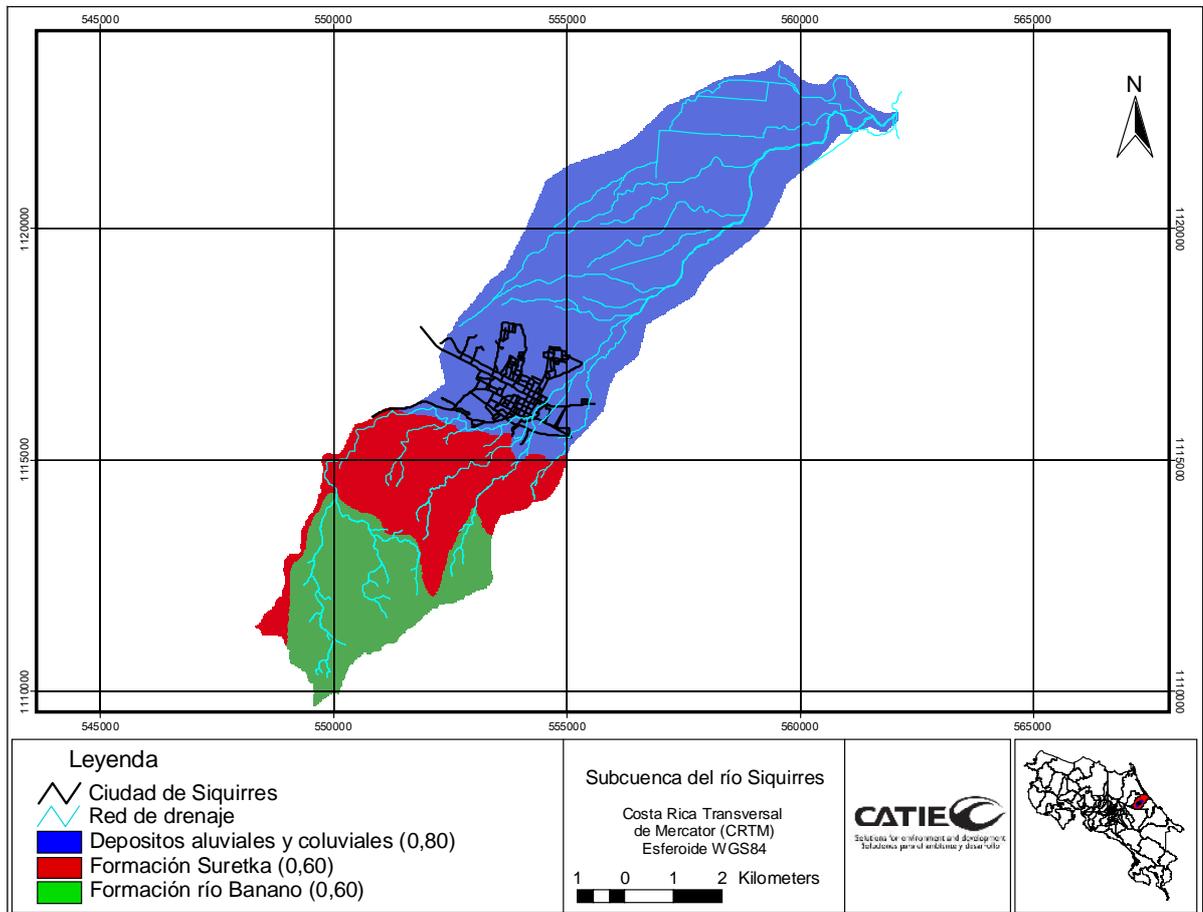


Figura 44. Mapa del factor O de la subcuenca del río Siquirres

c) Factor **D**: de acuerdo a la información de los pozos seleccionados las profundidades varían de menos de 5 m y máximas de 50 m. Profundidades menores a 5 m, generalmente se distribuyen en la parte alta de la subcuenca representando el 1% del área total ($0,54 \text{ km}^2$), un 4,47 km de perímetro; los rangos de 5 - 20 m, conforman el 45,2% ($24,9 \text{ km}^2$), un 36,15 km de perímetro y profundidades de entre 20 - 50 m con el 53,8% ($29,76 \text{ km}^2$), un 34,89 km de perímetro predominando en las parte baja de la subcuenca o desembocadura del río Siquirres (Figura 45).

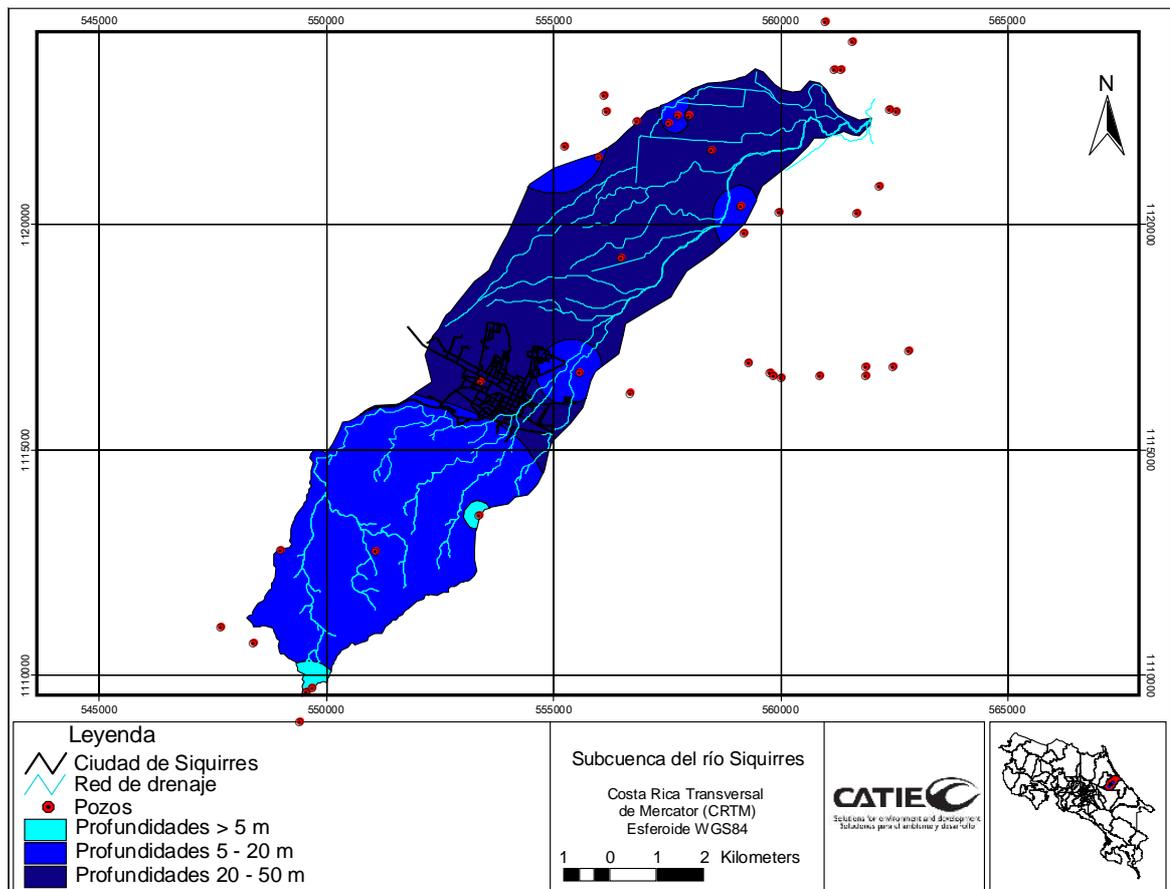


Figura 45. Mapa del factor D de la subcuenca del río Siquirres

d) Factor S: los resultados muestran pequeñas superficies con variaciones texturales de media a fina, representando el 0,64% del área total ($0,35 \text{ km}^2$), valorado con un factor $S = 0,60$; las superficies de texturas que varían de moderadamente gruesa, mediana a media constituyen el 13,12% ($7,25 \text{ km}^2$) con un factor $S = 0,85$; las texturas media abarcan el 14,35% ($7,94 \text{ km}^2$) con un factor $S = 0,70$; y finalmente las variaciones texturales de mediana a media representan el 71,89% ($39,75 \text{ km}^2$) con un factor $S = 0,80$, esta última define la predominancia textural en la subcuenca (Figura 46).

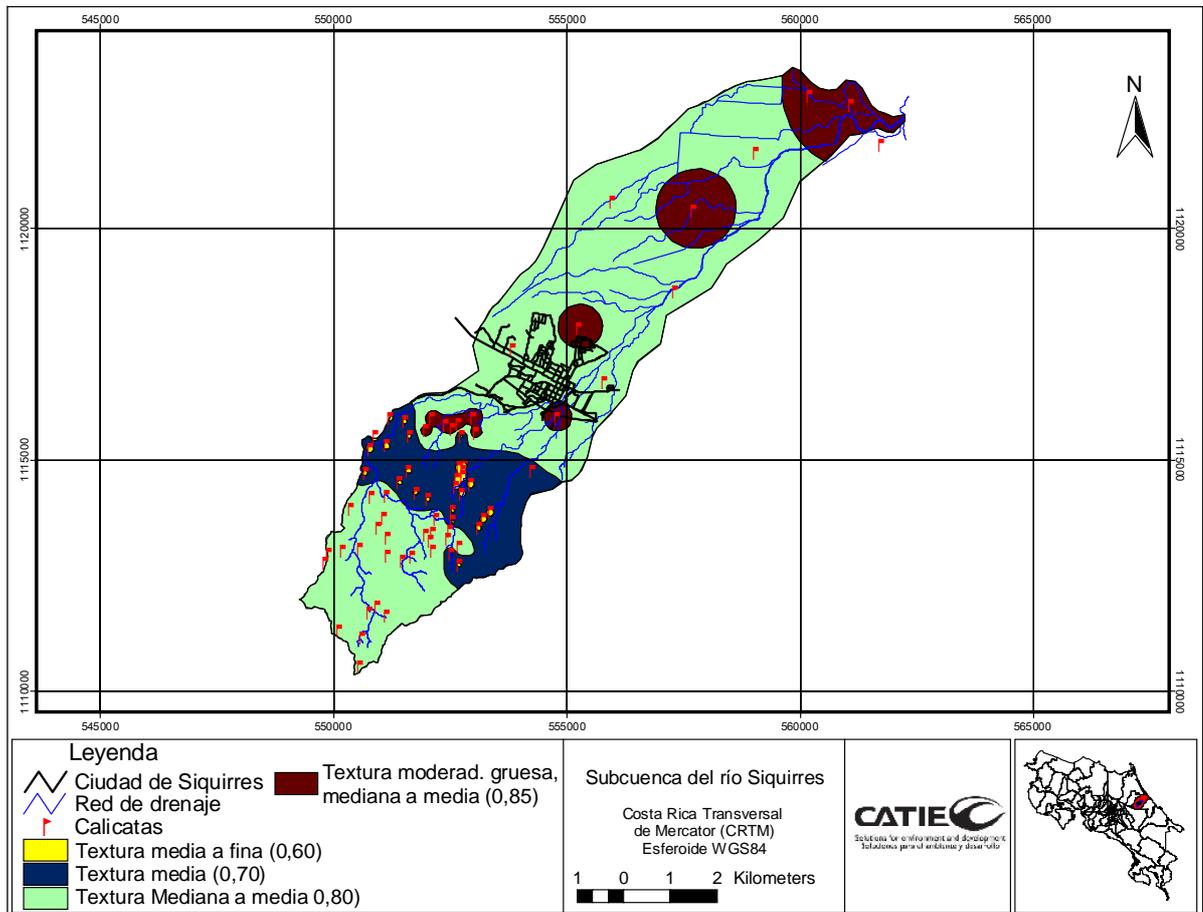


Figura 46. Mapa del factor S de la subcuenca del río Siquirres

A partir de la aplicación del esquema metodológico para la espacialización (mapeo) del método GOD-S modificado (Figura 13) y haciendo uso del programa ArcView 3,3, se obtuvo el mapa GOD-S. Los resultados exponen tres grados de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, de la misma manera como fue estimado en el Cuadro 47. En los resultados se evidenció la predominancia de la vulnerabilidad media en la subcuenca con el 90,6% del área total, asimismo áreas focalizadas de vulnerabilidad alta en los depósitos aluviales y coluviales abarcando el 8,74% y pequeñas superficies de baja vulnerabilidad (0,64%), localizados en la formación Suretka. Concerniente a la parte alta de la subcuenca, esta presenta una vulnerabilidad media en su totalidad (Figura 47).

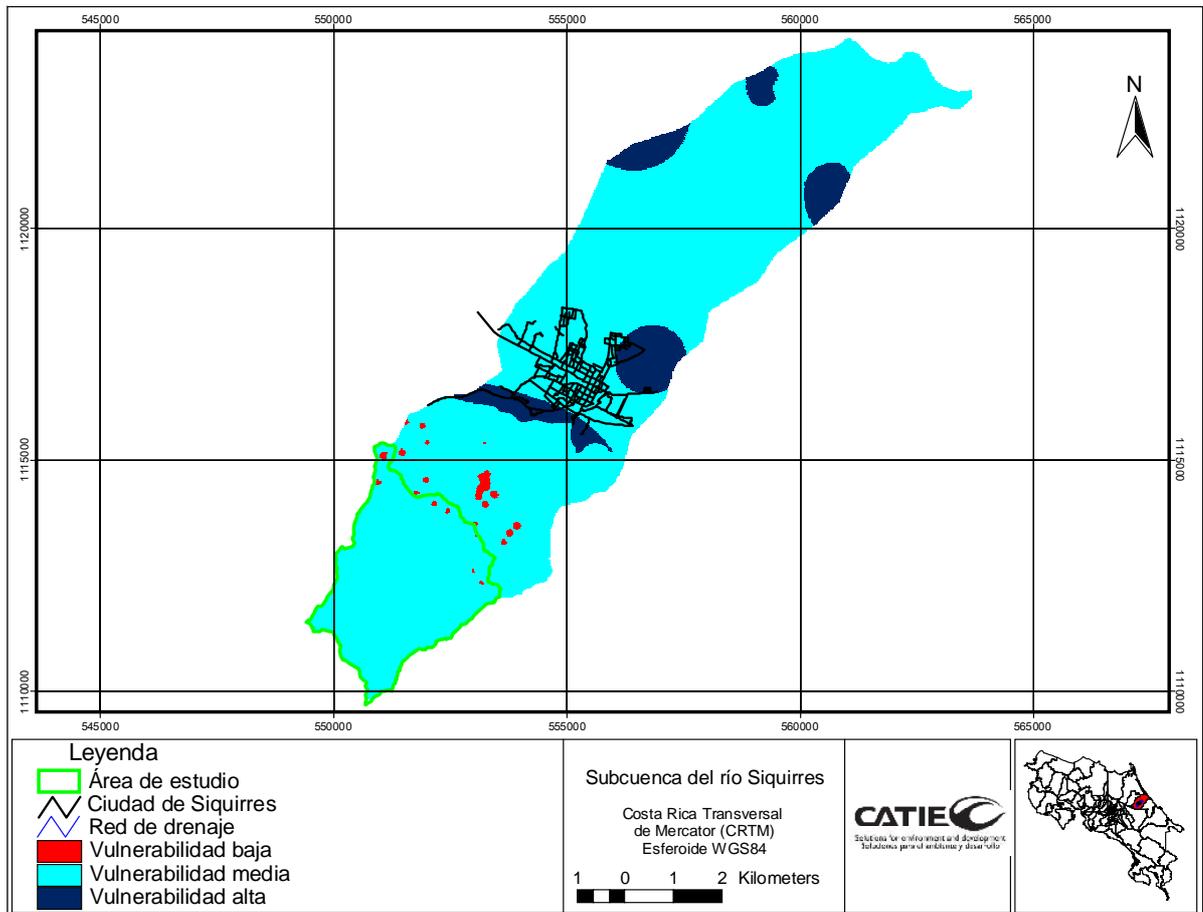


Figura 47. Mapa GOD-S de la subcuenca del río Siquirres

Finalmente para el presente estudio, la zona II se define como la zona de protección a la contaminación del agua subterránea, fundamentada sobre la base de las metodologías RAS (recarga de aguas subterráneas) y GOD-S modificado (vulnerabilidad a la contaminación del acuífero o vulnerabilidad intrínseca del acuífero).

4.3 Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente (zonas I y II)

El objetivo concierne al análisis biofísico y social de las zonas I y II, con el fin de obtener una percepción de las relaciones existentes. Se parte del supuesto siguiente: una característica que define el área de influencia de una cuenca, es que en teoría cualquier gota de agua que caiga en cualquier parte dentro de ella, tarde o temprano llega al mismo cauce principal (Jiménez 2005). Principio que demuestra una característica dinámica dentro de la cuenca, y es que todas las actividades que se desarrollen dentro de ella, están interrelacionadas entre sí.

4.3.1 Caracterización del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA)

La caracterización del agua superficial utilizando ICA parte de la selección de la época de muestreo clasificada de acuerdo a la Figura 14 que expone el promedio mensual del caudal (l/s) con datos de 29 años y la precipitación de la estación Las Lomas con datos de 30 años, ubicada en la zona II (área de recarga). La justificación en la agregación de la variable precipitación para la selección de la época a muestrear, obedece a una regresión lineal positiva entre ambas variables (caudal y precipitación). Seguidamente, se muestra el análisis de regresión lineal simple entre el caudal (variable dependiente) y precipitación (variable regresora) con el propósito de evidenciar como los cambios en la variable predictora afecta a la variable respuesta mediante el modelo para la relación funcional (Figura 48).

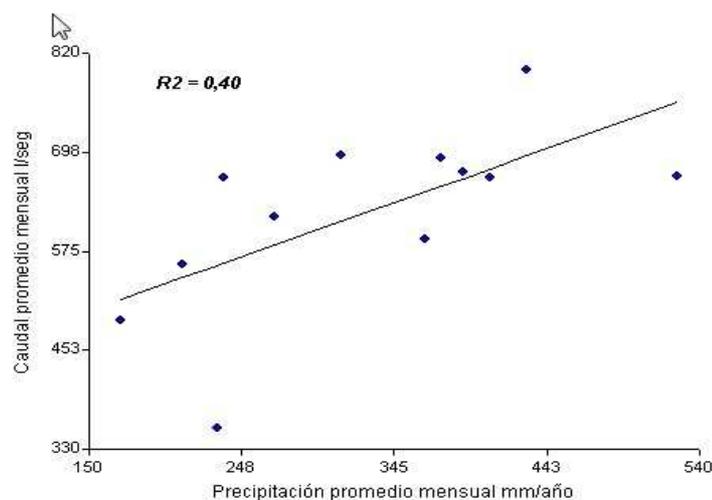


Figura 48. Regresión lineal entre el caudal y precipitación

Como se puede observar, el diagrama indica que existe una relación positiva entre el caudal y la precipitación de la estación Las Lomas ($p=0,0263$). La ecuación del modelo (caudal = $398,36 + 0,36 \cdot \text{precipitación}$), puede ser usado con fines predictivos, ya sea en el aumento o disminución de las precipitaciones en relación al caudal. Basado en la relación positiva de las variables y de acuerdo a la Figura 14 se definieron los meses de muestreo (abril, mayo, junio y julio), clasificados en periodos seco, de transición y lluvioso, a partir del cual se estiman los ICA para caracterizar el agua cruda superficial del río Siquirres.

Con base en los resultados de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos realizados en el agua cruda (agua sin tratamiento) superficial del río Siquirres, ubicada en la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano por AyA, los Cuadros 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 y 55 presentan los valores de cada parámetro ICA para los meses muestreados y su valor ICA estimado. Asimismo la comparación de los parámetros con los valores recomendados para Costa Rica, según Decreto No. 32327 (*Reglamento para la Calidad del Agua Potable*) y para Centroamérica, según la norma CAPRE (*Agua para consumo humano*), realizado con la finalidad de seleccionar los parámetros de cada mes muestreado que sobrepasan los valores máximos admisibles (VMA) o valores mínimos tolerables (VMT) para luego poder analizar la relación entre los indicadores del dinamismo antrópico actual con los parámetros ICA. Aunque el Decreto No. 33903-MINAE-S publicada el 17 de septiembre del 2007 (*Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*), establece que concentraciones < 20 NMP/100 mL de coliformes fecales son permisibles, según la clase 1, definida para uso de abastecimiento de agua para consumo humano.

Cuadro 48. Estimación ICA para el mes de abril del 2008

	Parámetros	Unidades	Peso asignado (w_i)	Valor medido (a)	Valor (Sub_i) (b)	(a) x (b)
1	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0,15	206,2	43	1,76
2	pH	Unidades de pH	0,12	7,24	91	1,72
3	DBO ₅	mg/L	0,10	15,55	20	1,35
4	Nitrato	mg/L	0,10	0,10	96	1,58
5	Fosfato	mg/L	0,10	0,24	89	1,57
6	Temperatura	°C	0,10	^4,40	50	1,48
7	Turbidez	UNT	0,08	0,63	98	1,44
8	Sólidos disueltos totales	mg/L	0,08	175,8	76	1,41
9	Oxígeno disuelto	% saturación	0,17	8,06	92	2,16
Valor ICA (promedio multiplicativo ponderado)						65,60
^:4.40 Temp. a interpolar = 28.20 Temp. ambiente – 23.80 Temp. muestra						

Cuadro 49. Comparación de los parámetros ICA (abril) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE

Parámetros / Unidades		Valor de abril	Valor superado	Decreto No. 32327		Norma CAPRE	
				VR	VMA	VR	VMT
1	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	206,2	*, [⊙]	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
2	pH (unidades)	7,24	Ns	6,5	8,5	6,5 – 8,5	≤ 8,5
3	DBO ₅ (mg/L)	15,55	[⊙]	Sd	Sd	≤ 2	2,5 - 4
4	Nitrato (mg/L)	0,10	Ns	25	50	≤ 5	≤ 10
5	Fosfato (mg/L)	0,24	Ns	Sd	Sd	≤ 0,01	≤ 5
6	Temperatura (°C de la muestra)	23,8	Ns	18	30	18 - 30	≤ 30
7	Turbidez (UNT)	0,63	Ns	<1	5b	≤ 1	≤ 3
8	Sólidos disueltos totales (mg/L)	175,8	Ns	Sd	1000	≤ 300	≤ 1000
9	Oxígeno disuelto (% saturación)	8,06	Ns	Sd	Sd	≥ 5	≤ 4

VR = valor recomendado. VMA = valor máximo admisible. VMT = valor mínimo tolerable.
 * = valor superado según Decreto No. 32327 de Costa Rica. [⊙] = valor superado según norma CAPRE.
 Ns = valor no superado según Decreto No. 32327, ni por norma CAPRE. Sd = sin datos.

La estimación ICA para el mes seco (abril) muestra una calidad de agua de categoría regular (65,60). Según SNET (2002) esta categoría indica menos diversidad de organismos acuáticos en comparación con el agua de categoría buena a excelente y un aumento significativo en el crecimiento de algas, la cual obedece a mayores indicios de contaminaciones del río, desde el punto de vista del uso del agua para consumo humano requiere tratamiento potabilizador necesario. De los nueve parámetros, solamente dos superan los valores del Decreto No. 32327 y norma CAPRE para agua para consumo humano (coliformes fecales y DBO₅). Los demás parámetros; pH, nitrato, fosfato, temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto no sobrepasan los valores. Por lo tanto, para el periodo muestreado (seco) los parámetros a considerar conciernen a coliformes fecales y DBO₅.

Cuadro 50. Estimación ICA para el mes de mayo del 2008

Parámetros		Unidades	Peso asignado (w_i)	Valor medido (a)	Valor (Sub_i) (b)	(a) x (b)
1	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0,15	1033,5	21	1,58
2	pH	Unidades de pH	0,12	7,06	90	1,72
3	DBO ₅	mg/L	0,10	24,9	8	1,23
4	Nitrato	mg/L	0,10	0,12	94	1,58
5	Fosfato	mg/L	0,10	0,74	57	1,50
6	Temperatura	°C	0,10	^4,70	46	1,47
7	Turbidez	UNT	0,08	2,47	92	1,44
8	Sólidos disueltos totales	mg/L	0,08	167	78	1,42
9	Oxígeno disuelto	% saturación	0,17	8,62	100	2,19
Valor ICA (promedio multiplicativo ponderado)						51,38
^:4.70 Temp. a interpolar = 28.70 Temp. ambiente – 24.00 Temp. Muestra						

Cuadro 51. Comparación de los parámetros ICA (mayo) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE

Parámetros / Unidades		Valor de mayo	Valor superado	Decreto No. 32327		Norma CAPRE	
				VR	VMA	VR	VMT
1	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1033,5	* , [©]	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
2	pH (unidades)	7,06	Ns	6,5	8,5	6,5 – 8,5	≤ 8,5
3	DBO ₅ (mg/L)	24,9	[©]	Sd	Sd	≤ 2	2,5 - 4
4	Nitrato (mg/L)	0,12	Ns	25	50	≤ 5	≤ 10
5	Fosfato (mg/L)	0,74	Ns	Sd	Sd	≤ 0,01	≤ 5
6	Temperatura (°C de la muestra)	24	Ns	18	30	18 - 30	≤ 30
7	Turbidez (UNT)	2,47	Ns	<1	5b	≤ 1	≤ 3
8	Sólidos disueltos totales (mg/L)	167	Ns	Sd	1000	≤ 300	≤ 1000
9	Oxígeno disuelto (% saturación)	8,62	Ns	Sd	Sd	≥ 5	≤ 4

VR = valor recomendado. VMA = valor máximo admisible. VMT = valor mínimo tolerable.
 * = valor superado según Decreto No. 32327 de Costa Rica. [©] = valor superado según norma CAPRE.
 Ns = valor no superado según Decreto No. 32327, ni por norma CAPRE. Sd = sin datos.

La estimación del ICA para el periodo de transición (mayo) muestra una calidad de agua del río de categoría regular (51,38). Al igual que abril, son dos los parámetros (coliformes fecales y DBO₅) que sobrepasan los VMA (valores máximos admisibles) o VMT (valores mínimos tolerables), manifestando una vez más que los indicadores a considerarse corresponden a aquellos que están provocando el aumento en las concentraciones de coliformes fecales y DBO₅.

Cuadro 52. Estimación ICA para el mes de junio del 2008

Parámetros	Unidades	Peso asignado (w _i)	Valor medido (a)	Valor (Sub _i) (b)	(a) x (b)	
1	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0,15	5788,05	16	1,52
2	pH	Unidades de pH	0,12	7,35	92	1,72
3	DBO ₅	mg/L	0,10	27,3	5	1,17
4	Nitrato	mg/L	0,10	0,15	91	1,57
5	Fosfato	mg/L	0,10	0,27	81	1,55
6	Temperatura	°C	0,10	^5,60	41	1,45
7	Turbidez	UNT	0,08	1,08	93	1,44
8	Sólidos disueltos totales	mg/L	0,08	83	85	1,43
9	Oxígeno disuelto	% saturación	0,17	8,25	95	2,17
Valor ICA (promedio multiplicativo ponderado)						48,11
^ = 5.60 Temp. a interpolar = 29.20 Temp. ambiente – 23.60 Temp. muestra						

Cuadro 53. Comparación de los parámetros ICA (junio) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE

Parámetros / Unidades		Valor de junio	Valor superada	Decreto No. 32327		Norma CAPRE	
				VR	VMA	VR	VMT
1	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	5788,05	* y [©]	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
2	pH (unidades)	7,35	Ns	6,5	8,5	6,5 – 8,5	≤ 8,5
3	DBO ₅ (mg/L)	27,3	[©]	Sd	Sd	≤ 2	2,5 - 4
4	Nitrato (mg/L)	0,15	Ns	25	50	≤ 5	≤ 10
5	Fosfato (mg/L)	0,27	Ns	Sd	Sd	≤ 0,01	≤ 5
6	Temperatura (°C de la muestra)	^5,60	Ns	18	30	18 - 30	≤ 30
7	Turbidez (UNT)	1,08	Ns	<1	5b	≤ 1	≤ 3

8	Sólidos disueltos totales (mg/L)	83	Ns	Sd	1000	≤ 300	≤ 1000
9	Oxígeno disuelto (% saturación)	8,25	Ns	Sd	Sd	≥ 5	≤ 4
VR = valor recomendado. VMA = valor máximo admisible. VMT = valor mínimo tolerable. * = valor superado según Decreto No. 32327 de Costa Rica. © = valor superado según norma CAPRE. Ns = valor no superado según Decreto No. 32327, ni por norma CAPRE. Sd = sin datos.							

La estimación ICA para el segundo mes de transición (junio) muestra una calidad de agua de categoría mala (48,11), correspondiendo a un aumento en las concentraciones de coliformes fecales en el río. Según SNET (2002) la categoría solamente puede apoyar una diversidad baja de la vida acuática, debido a problemas de contaminación, en relación al uso como agua para consumo humano requiere un tratamiento especial con inspecciones de calidad continuo. Probablemente el aumento en las concentraciones de coliformes fecales y en parte al aumento significativo de DBO₅ se deba al inicio de la época lluviosa que provoca el arrastre de desechos sólidos y líquidos acumulada en la época seca.

Cuadro 54. Estimación ICA para el mes de julio del 2008

Parámetros		Unidades	Peso asignado (w _i)	Valor medido (a)	Valor (Sub _i) (b)	(a) x (b)
1	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0,15	919,45	23	1,60
2	pH	Unidades de pH	0,12	7,11	91	1,72
3	DBO ₅	mg/L	0,10	18	6	1,20
4	Nitrato	mg/L	0,10	0,14	90	1,57
5	Fosfato	mg/L	0,10	0,26	80	1,55
6	Temperatura	°C	0,10	^3,80	59	1,50
7	Turbidez	UNT	0,08	9,99	78	1,42
8	Sólidos disueltos totales	mg/L	0,08	66,7	87	1,43
9	Oxígeno disuelto	% saturación	0,17	8,12	95	2,17
Valor ICA (promedio multiplicativo ponderado)						52,81
^ = 3.80 Temp. a interpolar = 27.50 Temp. ambiente – 23.70 Temp. muestra						

Cuadro 55. Comparación de los parámetros ICA (julio) con el Decreto No. 32327 y norma CAPRE

Parámetros / Unidades	Valor de Abril	Valor superada	Decreto No. 32327		Norma CAPRE	
			VR	VMA	VR	VMT
1 Coliformes fecales (NMP/100 mL)	919,45	* y ©	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
2 pH (unidades)	7,11	Ns	6,5	8,5	6,5 – 8,5	≤ 8,5
3 DBO ₅ (mg/L)	18	©	Sd	Sd	≤ 2	2,5 - 4
4 Nitrato (mg/L)	0,14	Ns	25	50	≤ 5	≤ 10
5 Fosfato (mg/L)	0,26	Ns	Sd	Sd	≤ 0,01	≤ 5
6 Temperatura (°C de la muestra)	^3,80	Ns	18	30	18 - 30	≤ 30
7 Turbidez (UNT)	9,99	* y ©	<1	5b	≤ 1	≤ 3
8 Sólidos disueltos totales (mg/L)	66,7	Ns	Sd	1000	≤ 300	≤ 1000
9 Oxígeno disuelto (% saturación)	8,12	Ns	Sd	Sd	≥ 5	≤ 4
VR = valor recomendado. VMA = valor máximo admisible. VMT = valor mínimo tolerable. * = valor superado según Decreto No. 32327 de Costa Rica. © = valor superado según norma CAPRE. Ns = valor no superado según Decreto No. 32327, ni por norma CAPRE. Sd = sin datos.						

El ICA estimado para el mes lluvioso (julio) muestra una calidad de agua del río de categoría regular (52,81). Como es de esperarse la turbidez sobrepasó los VMA o VMT, debido a que las lluvias producen un escurrimiento superficial considerable que causa arrastre de suelo en las laderas de la parte alta de la subcuenca, provocando un aumento de sólidos y partículas en suspensión en el cuerpo de agua del río, asimismo, se aprecia una disminución significativa en las concentraciones de coliformes fecales, mas no en los valores de DBO₅ que se mantiene relativamente constante.

En síntesis el promedio estimado del ICA basado en los meses muestreado permite caracterizar al agua cruda superficial del río Siquirres de regular (Cuadro 56). Además, el proceso de categorización de los meses muestreado, permitió seleccionar los parámetros ICA que sobrepasan los VMA o VMT, los cuales serán analizados con los indicadores del dinamismo antrópico actual.

Cuadro 56. Caracterización ICA del agua cruda superficial del río Siquirres

Meses estimados	Periodos	ICA	Categorías	Observación
Abril	Seco	65,60	Regular	Durante todo el año el agua cruda superficial del río Siquirres requiere tratamiento potabilizador necesario y en algunos periodos (lluviosos) un tratamiento especial con inspecciones de calidad continua.
Mayo	Transición	51,38	Regular	
Junio	(seco a lluvioso)	48,11	Mala	
Julio	Lluvioso	52,81	Regular	
Promedio ICA		54,47	Caracterizada de regular	

Seguidamente se hace referencias a los parámetros que sobrepasan los VMA o VMT del Decreto No. 32327 y norma CAPRE, los cuales son; coliformes fecales, DBO₅ y Turbidez.

1. Coliformes fecales: de acuerdo a las concentraciones de coliformes fecales, en los meses muestreados el agua cruda del río Siquirres no calificaría para ser apta al consumo humano, la cual demandaría para los tres periodos un tratamiento potabilizador necesario con monitoreo de calidad continuo, debido a que los rangos mínimos y máximos de los valores del parámetros durante todo el año sobrepasan el VMA o VMT. En ese sentido la Figura 49 con datos de 1997 - 2007, y con frecuencias de muestreos de dos veces por mes para un total de 528 datos (informe de laboratorio central de AyA) muestran los valores del promedio anual y sus rangos mínimos y máximos obtenidos.

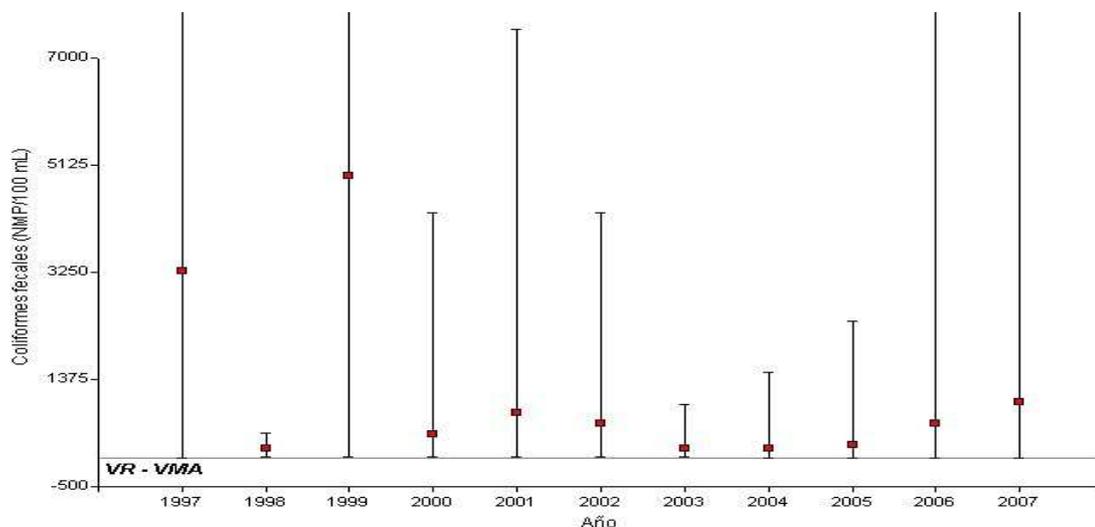


Figura 49. Distribución de coliformes fecales en el agua cruda del río Siquirres

La Figura 49 muestra los promedios anuales, que sobrepasan el VR y VMA, al igual sus rangos mínimos y máximos. Si observamos a partir del 2003 - 2007, tanto los promedios anuales como sus rangos, tienen una tendencia ascendente en las concentraciones. Lo preocupante se observa en los años (2006 - 2007) donde sus rangos máximos aventajan fácilmente los 10000 NMP/100 mL, revelando que en ciertos meses del año existen concentraciones considerables de todos los bacilos Gram-negativos, aeróbicos o anaeróbicos facultativos no esporulados típicos del parámetros. Para dar respuesta a esta interrogante se graficó el promedio mensual de los valores de coliformes fecales (Figura 50). Los resultados demuestran un repunte del rango máximo en los meses de junio y febrero.

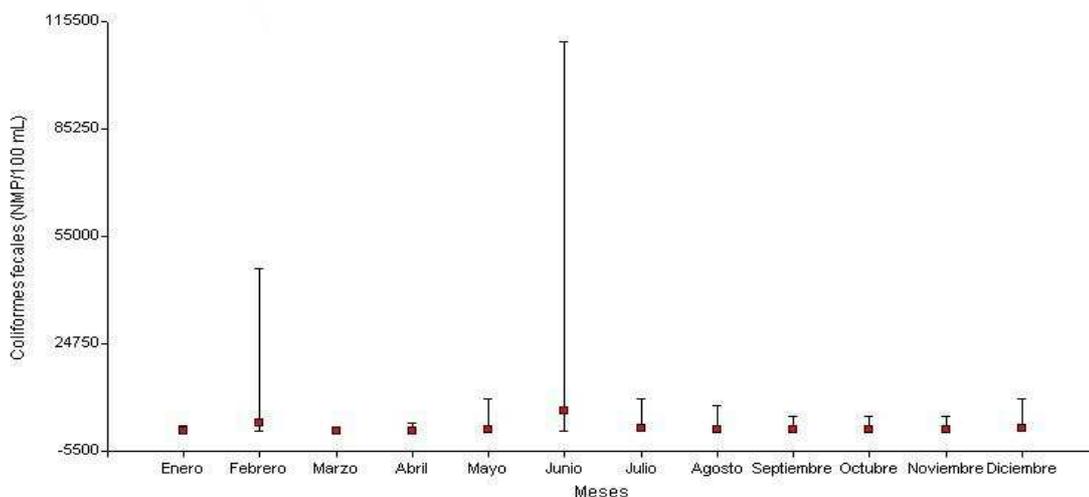


Figura 50. Promedio mensual de coliformes fecales del agua cruda del río Siquirres

2. DBO₅: en los cuatro meses muestreado las concentraciones DBO₅ sobrepasan el VMT (de la norma CAPRE), las cuales probablemente se deban a los vertidos continuos de desechos sólidos y líquidos generados por las casas ubicadas en la parta alta de la subcuenca, así como por la presencia de basureros ilegales, ya que cuando un cuerpo de agua presenta valores mayores o cercanos a 10 mg/L de DBO₅, se define como un cuerpo de agua altamente contaminado por productos orgánicos biodegradables.

3. Turbidez: el parámetro de turbidez únicamente sobrepasa los VMA o VMT en el mes de julio, con un incremento significativo en relación a los otros meses muestreados. El incremento tiene una concordancia directa con la presencia del invierno que arrastra sedimento de las laderas y que posiblemente su origen provenga de las áreas de potreros ubicados en la zona ribereña de la parte alta de la subcuenca y de las zonas urbanas en crecimiento. El parámetro, indica que se deben limitar todas aquellas actividades que provoquen cambio en el uso del suelo y que vayan a aumentar el escurrimiento superficial en laderas inclinadas. La Figura 51 expone los promedios anuales de turbidez (UTN) y sus rangos mínimos y máximos obtenidos, con datos del 2003 - 2007 (informe de laboratorio central de AyA).

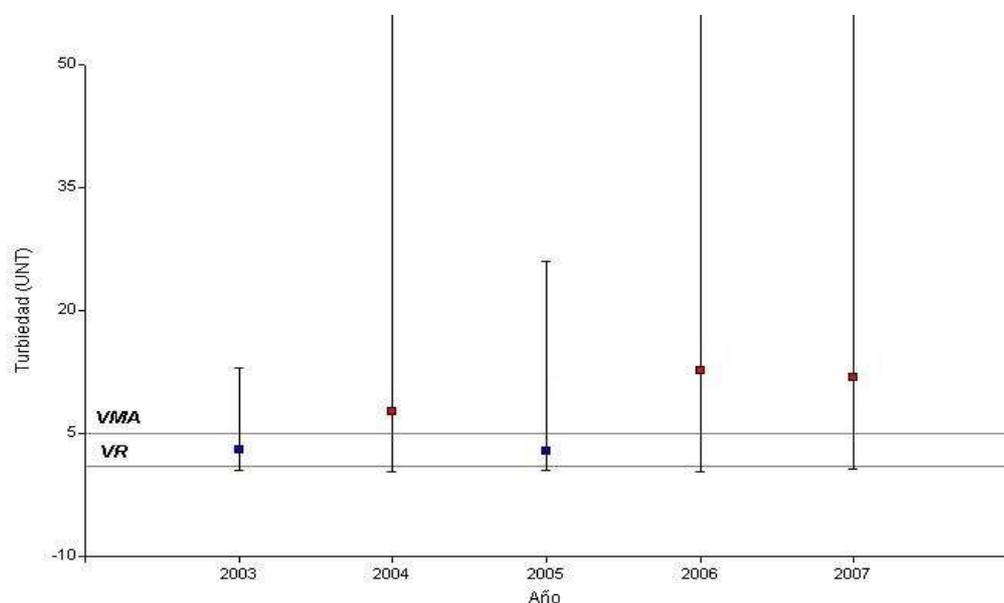


Figura 51. Distribución de turbidez en el agua cruda superficial del río Siquirres

En la Figura 51 se observa que en el año 2003 - 2005 el promedio anual de turbidez no sobrepasó el VMA, mostrando poca presencia de sólidos y/o partículas en suspensión en la columna de agua de la parte alta del río Siquirres para dichos periodos. Sin embargo, en los

años 2004, 2006 y 2007 los promedios anuales sobrepasan el VMA y sus rangos máximos excedieron en más del 1000% al VMA, esto supone que a partir del año 2006 ha existido una disminución de la cobertura vegetal con un cambio significativo en el uso del suelo de las áreas cercanas a la ribera del río, por actividades que eliminan casi en su totalidad la cobertura vegetal existente, ya sea por la ganadería o la expansión urbana. De esta manera, queda en el vacío saber a ciencia cierta, cuál sería el escenario de predicción si la vegetación actual se redujera un 20% o un 70% en relación al efecto que ocasionaría la turbidez con la flora y fauna de la zona ribereña.

La Figura 52 expone los valores promedios mensuales, y sus rangos mínimos y máximos. Los resultados ponen en manifiesto que los meses de julio, agosto, noviembre y diciembre son meses a considerar en el proceso de tratamiento del agua para consumo humano.

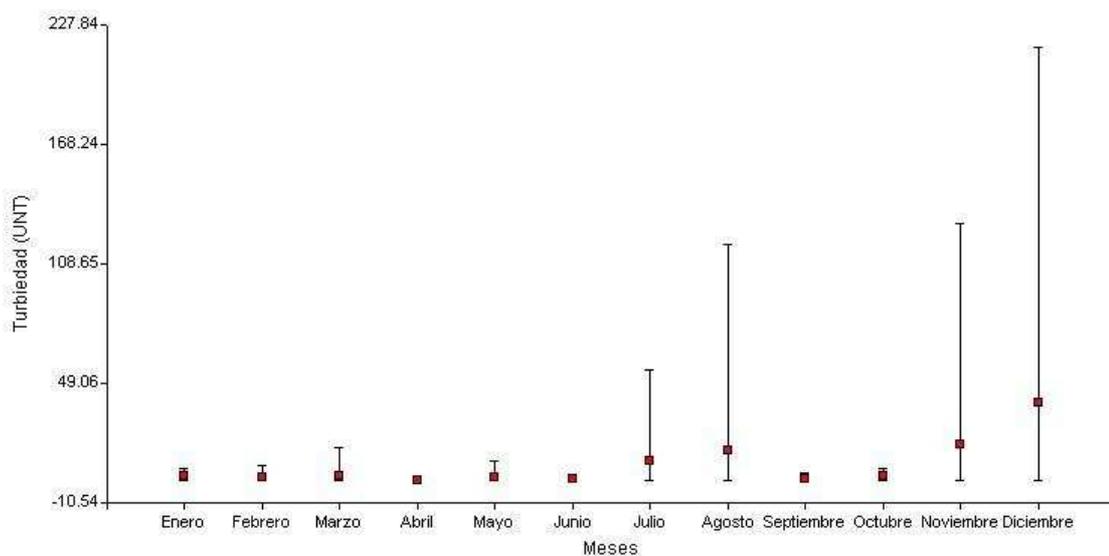


Figura 52. Promedio mensual de turbidez del agua cruda del río Siquirres

4.3.2 Modelación del flujo subterráneo en la parte alta de la subcuenca a través del mapa de líneas equipotenciales (isopiezas)

De la superficie piezométrica o nivel freático obtenida a partir de la información de los pozos registrados y sistematizada en el programa SIG (ArcGIS 9,2), se obtuvo el mapa esquemático de isopiezas y red de flujos subterráneo de la subcuenca (Anexo 24) y área de

estudio (Figura 53). El trazo de las líneas isopiezas en el acuífero libre de la subcuenca, realizado mediante interpolación geométrica cumplió con los dos requisitos básicos: 1) los valores del nivel freático = piezométrico medidos corresponden a un mismo acuífero; y 2) los pozos están expresado en cotas absolutas (elevaciones en msnm). Una vez interpoladas las líneas isopiezas se procedió a establecer las direcciones de flujo en toda la subcuenca apoyadas con las Figuras 7 que representan las relaciones entre las líneas de drenaje (flujo de aguas subterráneas) del acuífero y las curvas isopiezas. Es necesario recalcar que las direcciones de flujo subterráneo (mapa de isopiezas), solo muestran el componente horizontal.

4.3.2.1 Mapas de líneas equipotenciales o isopiezas en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres

Las líneas de flujo subterráneo presentan una tendencia general de nor-oeste a nor-este en la subcuenca siguiendo el curso de las redes de drenajes del río Siquirres, revelando un río ganador en relación río-acuífero. La Figura 53 demuestra dos direcciones de flujo de agua subterránea: la primera dirección, se ubica en la parte interna de la subcuenca, representada por líneas isopiezas con cierre predominante de forma cóncava en relación al afluente principal, indicando así una relación existente entre la dirección del flujo subterráneo con la red de drenaje superficial, la cual es regulada por los sedimentos (conglomerados y areniscas); la segunda dirección, localizada en las partes externas o parte agua de la subcuenca, predominan las formas convexas no pronunciadas, definiendo un sentido de dirección del flujo subterráneo fuera del cauce principal al río Siquirres con dirección a los ríos Reventazón y Pacuare. En definitiva, el resultado exploratorio del componente horizontal de flujo de agua subterránea, revela una división hidrogeológica relativamente bien definida en la subcuenca del río Siquirres.

Con base en la interpretación de las direcciones del flujo de agua subterránea podemos argumentar en un sentido generalizado que todas actividades que se lleve a cabo dentro de la parte alta de la subcuenca producen un efecto directo en las aguas superficiales y subterráneas de la parte media y baja. En ese sentido, se justifica el análisis de la relación entre los indicadores del dinamismo antrópico actual valorado en la metodología de la vulnerabilidad global a la contaminación con los parámetros ICA que sobrepasan los VMA o VMT.

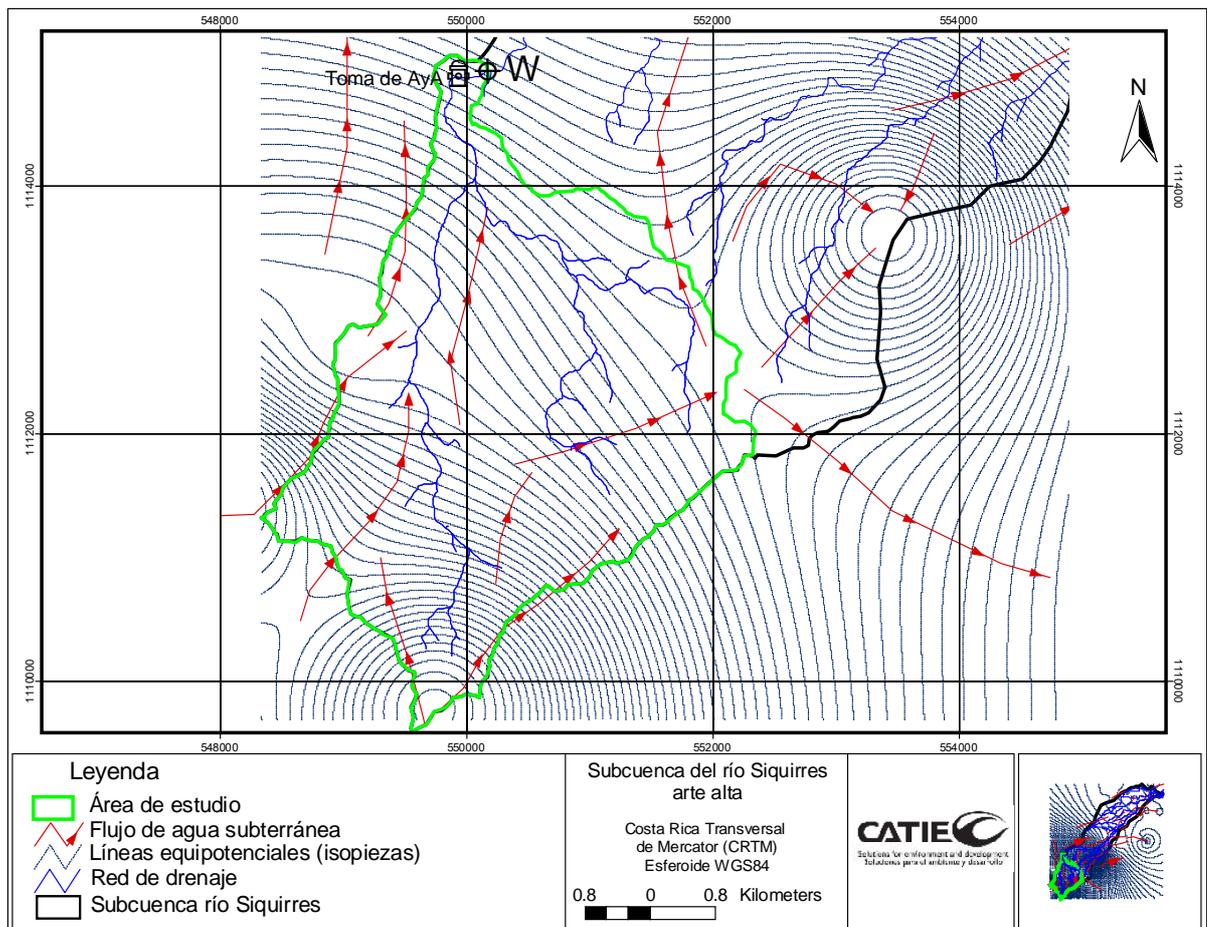


Figura 53. Mapa de isopiezas y direcciones de flujo en parte alta de la subcuenca del río Siquirres

4.3.3 *Análisis de relación entre el dinamismo antrópico actual con los parámetros ICA, considerando las direcciones de flujo subterráneo a través del mapa de líneas isopiezas*

El análisis de la relación (dinamismo antrópico actual y parámetros ICA) se concibe con el propósito de identificar los indicadores que están incidiendo directamente en el aumento de las concentraciones de los parámetros ICA que han sobrepasado los VMA o VMT (coliformes fecales, DBO₅ y turbidez), teniendo siempre presente, las direcciones del flujo de agua subterránea como una medida real en la relación existente río–acuífero. Estos indicadores formarán parte de las medidas adaptativas a establecerse en los primeros cinco años.

aproximadamente el 40% de esas casas vierten directamente sus aguas residuales al río. Si fuera poco se suma la existencia de 4 basureros ilegales (Foto 5), uno ubicado en las nacientes y tres en la ribera del río (VF5), sumado la falta de un tren de aseo permanente (VF11).



Foto 4. Fosas sépticas construidos con materiales inadecuados en Moravia



Foto 5. Basurero ubicado en la naciente del río Siquirres

Referente al indicador VF9 la poca distancia entre la carretera Siquirres-Turrialba, respecto al río (tramos < 50 m) hace que personas que transitan tiren basuras sobre la carretera y estos con las primeras lluvias se incorporan al río incidiendo en el aumento de parámetros. El VEC12 aporta mucho en el aumento de las concentraciones, por la existencia de seis pequeños establos de porquerizas, gallineros y ganadería menor (Foto 6), ubicados en la franja de los 100 m de distancia al río, en el indicador VEC13 se valoró un ancho máxima de 20 m y mínima de 5 m de bosque ribereño entre el río y las áreas de potreros o urbanas (Foto 7). Sin embargo, en algunas partes el bosque está ausente, debido a las áreas de potreros.



Foto 7. Ganadería menor en la franja de los 100 m de distancia al río Siquirres



Foto 6. Áreas de potrero en la franja de los 100 m de distancia al río Siquirres

b) DBO₅: son 7 los indicadores que influyen en los valores estimados de DBO₅ para los meses de abril, mayo, junio y julio. De la misma manera como fue abordado en el parámetro anterior (coliformes fecales), los indicadores VF1, VF5, VF10, VEC12 y VEC13 intervienen en las concentraciones de DBO₅, no obstante, el VF11 tiene una influencia significativa debido a la falta de un tren de aseo permanente en las comunidades del Coco, Moravia y Guayacán, que hace que la población deposite sus residuos domésticos (materiales biodegradables y sólidos residuales) directamente al cauce principal del río y a cielo abierto. El VEC16 evidenció una presencia de residuos sólidos y líquidos de la parte alta del río.

c) Turbidez: son 9 los indicadores seleccionados para este parámetro, aún cuando solo sobrepasa el VMA o VMT en la época de invierno. Los indicadores VF1, VF5, VF11 y VEC16 influyen de igual forma como fueron abordados anteriormente. En la parte alta de la subcuenca, las concentraciones de turbidez están relacionadas al uso y manejo del suelo; en ese sentido, la valoración del VEC2 evidenció una erosión laminar en surcos, clasificada debido a la apreciación de pequeños canales en el terreno por donde circula el agua que escurre hacia aguas abajo luego de un aguacero. Del mismo modo se evidenció poca tierra negra en las áreas de potreros con pendientes pronunciadas, cárcavas superficiales (pequeñas zanjas) y capas de suelo rojizo, debido a la pérdida de la tierra fértil o capa negra.

Se suma al aumento en las concentraciones del parámetro, el VEC3 con predominancia de suelos de textura frágil (en la capa superficial predominan las texturas franco arenosas a franco y en el subsuelos los arcillo arenosos o arcillo limosos), el VEC4 demostrando que aproximadamente un 50% del bosque ribereño se encuentra intervenido y en muchos casos deforestados casi es su totalidad, por la expansión ganadera; y el indicador VEC10 revela la ausencia de prácticas de conservación de suelo y agua, al igual el VEC14 con predominancia de pendientes mayores al 40% en la franja ribereña de la parte alta de la subcuenca, factores que favorecen el escurrimiento durante las lluvias y que producen un arrastre considerable de sedimentos al río.

4.3.4 Consideraciones sociales

La etapa social está asentada en dos ángulos de observaciones: la primera corresponde al sondeo institucional y poblacional realizado a funcionarios de instituciones del Cantón de

Siquirres y a pobladores de las comunidades del Coco, Moravia Guayacán y zona urbana de Siquirres; la segunda a los apuntes del taller de vulnerabilidad del recurso hídrico: calidad, salud pública y ambiente, en el marco de la Red Ambiental Nacional en Agua y Saneamiento (RANAS), realizado 12 de mayo del 2008, en Limón, Costa Rica.

4.3.4.1 Análisis del sondeo institucional y poblacional

Para ajustar las medidas adaptativas a la visión social se realizó el sondeo exploratorio general a grupos poblacionales con la finalidad de obtener una percepción general por edades de la situación hídrica ambiental de la parta alta de la subcuenca. La metodología y formulario utilizado para el sondeo institucional y poblacional (social) procede de la tesis titulada *Análisis de la calidad del recurso hídrico superficial en la subcuenca del río Turrialba, Cartago, Costa Rica* (Cuadra Jirón, 2006), no obstante, el formulario se ajustó a las condiciones propias del lugar sin perder el concepto de las preguntas establecidas.

4.3.4.1.1 Sondeo institucional

Instituciones consultadas y la cantidad de funcionarios fueron: municipalidad (3), AyA (2), MAG (2), MINAET (2), Ministerio de Salud y Seguridad Social (2) SENARA (2), ICE (2), ASADA Coco-Moravia (1), JAPDEVA (1), Ministerio de Educación (1), IDA (1) para un total de 19.

Todos coinciden que las instituciones a las que ellos representan deben participar en las soluciones integrales de la situación ambiental de la subcuenca, de igual manera el 100% de los consultados afirman que la institución en la cual laboran, trabajan en conjunto con otras instituciones en pro de la mejora de la situación ambiental, de igual manera, con el mismo porcentaje se pronunciaron que la mejor manera de considerar el tema ambiental, es a través de una visión integral al tema. Sin embargo, cuando se les preguntó si conocían el decreto No. 24785 – MIRENEM que *Crea la Zona Protectora Cuenca Río Siquirres*, bajo la función principal de la protección del suelo, la regulación del régimen hidrológico, la conservación del medio ambiente (inciso 1 del considerando) el 57% afirma no conocerla, asimismo cuando se examinó que la protección, administración y manejo de los recursos naturales, en especial del recurso hídrico de la subcuenca, debe ser de competencia de un sector, el resultado fue una visión relativamente dividida, debido a que el 61% manifestó que no, con el 39% afirmó que sí debería ser de un solo sector.

Entre los problemas que hacen mención los funcionarios consultados, sobresalen; la deforestación, aprobación de planes de manejo a gran escala, uso irracional del suelo, excesiva burocracia del MINAET en dar respuestas a problemas ambientales, desconocimiento de la población sobre la situación actual del agua para consumo humano (en muchos casos ni siquiera conocen de donde proviene el agua que consumen), problema de contaminación por la presencia de basureros, falta de planes de desarrollo local, escasa cultura ambiental de la población, falta de fiscalización por parte de las instituciones del Estado, urbanización no planificada en todo el Cantón de Siquirres, falta de voluntad en la ejecución del plan de desarrollo, falta de sistemas de alcantarillados de aguas negras y servidas, no existe un comité de agua que se encargue de la protección y vigilancia de las áreas de recarga y nacientes en el Cantón, contaminación del río por heces fecales de animales, invasión de terrenos, entre otros.

Entre las propuestas mencionadas por los funcionarios para la protección del recurso hídrico de la parte alta de la subcuenca se mencionan: crear estrategias y actividades concretas y dirigida a la protección de las zonas de recarga y nacientes del río Siquirres, realizar una campaña fuerte y continua de educación ambiental a la población rural y urbana de Siquirres (comunidades del Coco, Moravia, Guayacán y pobladores de la zona rural), establecer un comité de agua comunal e institucional, crear conciencia de la importancia de proteger las fuentes de agua y áreas de recarga del río Siquirres, fomentar la participación de la población y líderes comunales del Coco, Moravia y Guayacán, crear programas anuales y muy concretos para reducir la contaminación actual, someter a las fincas al programa de PSA, ofrecer alternativas de nuevos ingresos a las familias que están ubicadas en la parte alta de la subcuenca, promover la agricultura orgánica, prohibir el cambio de uso del suelo, establecer planes de prevención y mitigación, crear un plan de ordenamiento territorial, realizar un estudio de valoración económica de la parte alta del río Siquirres con el propósito de definir la tarifa o canon de agua, frenar el crecimiento urbano y establecer ordenanzas municipales dirigidas a proteger las áreas de recarga y nacientes.

Referente al nivel de interés y participación que tendría la población del distrito de Siquirres a cualquier iniciativa institucional ambiental, los funcionarios manifiestan un nivel de interés bajo, aducen falta de educación ambiental y un desconocimiento del problema actual.

4.3.4.1.2 Sondeo poblacional

El sondeo a grupos poblacionales constó de 11 preguntas con una población meta de 150 personas, distribuidas en las comunidades de Guayacán, Moravia, Coco y zona urbana de Siquirres (diferentes barrios de la ciudad de Siquirres). El Cuadro 58 muestra los resultados obtenidos por medio del programa Infostat del análisis chi-cuadrado.

Cuadro 58. Prueba chi-cuadrado del sondeo poblacional

Preguntas	Rangos de edades	Dinámica de la población				Probabilidad Pr > X ²
		Respuesta (Frecuencia)		Porcentaje de conocimiento y percepción		
		SI	NO	SI	NO	
P1	≤ 18	5	15	25	75	0,5819
	18 – 50	35	66	34,65	65,35	
	≥ 50	11	17	39,29	60,71	
P2	≤ 18	3	17	15	85	0,3765
	18 – 50	29	72	28,71	71,29	
	≥ 50	6	22	21,43	78,57	
P3	≤ 18	8	12	40	60	0,9064
	18 – 50	44	57	43,56	56,44	
	≥ 50	13	15	46,43	53,57	
P4	≤ 18	3	17	15	85	0,3681
	18 – 50	25	76	24,75	75,25	
	≥ 50	4	24	14,29	85,71	
P5	≤ 18	10	10	50	50	0,5182
	18 – 50	49	52	48,51	51,49	
	≥ 50	17	11	60,71	39,29	
P6	≤ 18	17	3	85	15	0,8538
	18 – 50	82	19	81,19	18,81	
	≥ 50	22	6	78,57	21,43	
P7	≤ 18	11	9	55	45	0,3755
	18 – 50	50	51	49,50	50,50	
	≥ 50	18	10	64,29	35,71	
P8	≤ 18	12	8	60	40	0,4333
	18 – 50	45	56	44,55	55,45	
	≥ 50	14	14	50	50	
P9	≤ 18	17	3	85	15	0,0095
	18 – 50	66	35	65,35	34,65	
	≥ 50	12	16	42,86	57,14	
P10	≤ 18	4	16	20	80	0,8420
	18 – 50	23	78	22,77	77,23	
	≥ 50	5	23	17,86	82,14	

- Análisis de la percepción poblacional

P1: ¿Conoce la situación ambiental de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres? De acuerdo a los datos del Cuadro 58, las edades ≤ 18 años, dicen desconocer (75%), de igual manera los individuos con edades entre 18 - 50 y ≥ 50 años expresan no conocer. A nivel general, el 65,7% manifiesta no tener conocimiento, contrario al 34,23%. Categorizando de

esta manera a los individuos con un nivel de conocimiento bajo, referente a la situación ambiental de la parte alta de la subcuenca. Esta categorización probablemente se deba a la poca cultura ambiental existente en el Cantón de Siquirres, a causa de la falta de educación ambiental.

P2: ¿Conoce la situación higiénica-sanitaria de la planta de tratamiento de AyA que le abastece de agua para consumo humano? Los resultados demostraron que los tres rangos de edades prácticamente desconocen la situación higiénica-sanitaria de la planta de tratamiento, ya que sus rangos porcentuales tienen la misma tendencia a la respuesta de no conocer. De acuerdo al porcentaje total únicamente el 25,5% que representan 38 individuos de los 150 encuestados, expresaron si conocer, contrario a un 74,5%; esto implica una categorización en el nivel de conocimiento bajo. Además, en la pregunta se revela que AyA no ha hecho hincapié en divulgar toda la información correspondiente al proceso de tratamiento que se realiza al agua destinada al consumo humano.

P3: ¿Usted o alguno de su familia ha tenido problemas de salud o alguna enfermedad a causa de consumir agua proveniente de la tubería? Los resultados muestran que el 43,62% manifiestan que en alguna ocasión han tenido algún problema de salud a causa del agua para consumo humano. Sin embargo, esto supone que el 56,38% de la población en caso de enfermarse se enteran por medio de la asistencia médica.

P4: ¿Tiene conocimiento si la municipalidad, el Ministerio de Salud y Seguridad Social, y AyA, realizan con frecuencia análisis a la calidad del agua? Al observar el Cuadro 58, se expone la no existencia de relación entre edades y conocimiento de la situación ($p = 0,3681$). De manera general el 78,52% de la población no saben, si realizan algún análisis al agua que consumen.

P5: ¿Estaría dispuesto (a) a pagar una tarifa o costo ambiental para contribuir a la conservación y manejo adecuado de la parte alta del río Siquirres en donde nace el agua que usted consume? Los individuos con edades ≤ 18 años presentan una disposición dividida (50%) al pago adicional, mientras las edades entre 18 - 50 años no están dispuestas a pagar con un 51,49%, y las personas con edades ≥ 50 años, el 60,71% manifiestan su disponibilidad

a un pago adicional. De manera general, un 51,01%, está dispuesto al pago, contrario a un 48,9%.

P6: ¿Sabe usted que los productos químicos usados en la agricultura y la ganadería, así como los desechos sólidos, las basuras y otros desechos que la población deposita, contaminan el agua y pone en peligro su salud? De los 150 individuos, el 81,21% dijo tener conocimiento al respecto, mientras que un 18,79% dijo desconocerlo.

P7: ¿En alguna ocasión ha tenido problemas de mal sabor, color y olor del agua que proviene de la tubería? De los resultados generales el 53,02% de la población manifestó haber tenido en algún momento problemas de mal sabor, color y olor del agua que consumen; por el contrario, un 46,98% expresó no haber tenido problema alguno con el agua que consume. De los porcentajes presentados se podría asumir que la calidad del agua es relativamente buena.

P8: ¿Sabe si en las escuelas o colegios imparten materiales o charlas relacionadas a la protección y manejo de las aguas? Los resultados revelaron que el 52,35% señalan no conocer, mientras que un 47,65% indicó que sí. De manera general, expresan que si imparten temas ambientales en los colegios, pero abordados de maneja muy general.

P9: ¿Usted sabe que el agua que consume proviene de la parte alta del río Siquirres? Los resultados por edades revelan que los individuos con edades ≤ 18 años son los que más conocen con un 85%, igualmente las edades comprendidas entre 18 - 50 años con un 65,35%, no obstante, las edades ≥ 50 años en general dicen desconocer (57,14%). De los 150 individuos, el 63,76% indican conocer la procedencia del agua que consumen.

P10: ¿Conoce o sabe de ideas de proyectos para mejorar el servicio de agua, o programas que ayuden al manejo, conservación y protección de la parte alta del río Siquirres? Los resultados demostraron que el 78,52% no tiene idea alguna sobre la existencia de proyectos o programas que vayan enfocados a mejorar en cantidad y calidad las aguas que consumen. Además, manifiestan desconocimiento alguno que se estuviese haciendo algo al respecto, debido a que la municipalidad, el Ministerio de Salud y Seguridad Social, y AyA no informan a la población.

P11: ¿Qué recomendaría a la municipalidad y AyA, para mejorar la calidad del agua que usted consume? Las recomendaciones, se resumen en: proteger las áreas de las nacientes y áreas de recarga, realizar muestreos de agua en las casas y divulgar la información, reducir las áreas de las piñeras (en el Cairo), renovar la planta de tratamiento de AyA, crear comisiones para proteger las nacientes y áreas de recarga, prohibir la ganadería en la comunidades Moravia y Guayacán, sembrar árboles cerca del río, crear programas de limpiezas por lo menos cada año en la parte alta del río Siquirres, establecer un proyectos de aguas negras y/o servidas en las comunidades del Coco, Moravia y Guayacán (sistema de alcantarillados), instaurar programas de educación ambiental, hacer activa la comisión creada para dar seguimiento a la zona protectora cuenca río Siquirres, compra de terrenos alrededor de las nacientes y áreas de recarga para su protección, mover la toma de agua de AyA en un lugar donde sea menos vulnerable a la contaminación por los desechos de las casas, mejorar el tratamiento de las aguas de consumo humano por parte de AyA, establecer programas comunales de viveros forestales y frutales, programas pilotos y charlas ambientales, separar un porcentaje del pago de las tarifas de agua y destinarlas a la protección del río Siquirres (un canon de agua), instaurar programas radiales y televisivos para promover la no contaminación del río Siquirres, crear un comité cantonal de defensa y protección a la subcuenca, realizar planes conjuntos de prevención y mitigación a la contaminación y comprar camiones recolectores de basuras para las comunidades del Coco, Moravia y Guayacán.

4.3.4.1.3 Problemas planteados en el taller: vulnerabilidad del recurso hídrico

Taller, realizado en Limón, Costa Rica el 12 de mayo del 2008. El Cuadro 59 corresponde a los apuntes en el momento de la discusión (trabajo en grupo) por parte de los líderes de ASADA del Cantón de Siquirres, funcionarios de instituciones y empresario (dueño de bananeras) sobre los problemas de calidad, salud pública y ambiente en materia del recurso hídrico.

Cuadro 59. Problemas y soluciones en materia del recurso hídrico del Cantón de Siquirres

	Infraestructura	Soluciones plateadas
PROBLEMATICA GENERAL	Ubicación de casas cerca de los ríos, zonas de recarga, nacientes, ojos de agua.	⇒ Promover en los municipios el plan regulador.
	Falta de tratamientos de aguas servidas y/o aguas negras.	⇒ Compra de terrenos en las zonas de nacientes.
	Mal manejo del bosque (negligencia del MINAET).	⇒ Estudios de recarga acuífera.
	Falta de apoyo, coordinación de las instituciones.	⇒ Inventarios y caracterización de aguas superficiales y subterráneas.
	Falta de financiamiento de proyectos de protección a las fuentes de aguas y áreas de recargas.	⇒ Estudio economicos de bienes y servicios ambientales de las áreas de recarga.
	Falta de organización de las comunidades en actividades de protección y manejo de las fuentes de aguas.	⇒ PSA.
	No se captan los recursos establecidos por ley.	⇒ Reciclaje de plásticos, aluminios, vidrios, papel cartón, entre otros.
	Falta de alcantarillados sanitarios.	⇒ Promover en las escuelas de cada comunidad el acumular materiales de reciclaje a través de una bodega que servirá como depósito temporal.
	Acueductos viejos colapsados.	⇒ Búsqueda de financiamiento para programas educativos ambiental, compra de terrenos y construcción de sistemas de alcantarillados.
	Falta de inventarios de las fuentes de agua.	⇒ Promover capacitaciones o proyectos pequeños sobre tratamiento natural de aguas negras o servidas y biodigestores.
	Falta de estudios de mantos acuíferos (falta conocer la procedencia del agua).	⇒ Construir un proyecto piloto de humedad.
Falta de estudios técnicos para gestionar proyectos.		
	Debilidades de las instituciones rectores del agua por falta de recursos.	
CONTAMINACION	Falta de sistemas de alcantarillados de aguas negras y residuales.	⇒ Promover una organización local en función del agua. ⇒ Protección a las zonas de las orillas de los ríos. ⇒ Involucrar a bananeras en el proyecto de reciclaje, a colegios de cada comunidad, instituciones del estado y municipalidad.
	Presencia de agroquímicos en las bananeras y piñeras.	
	Contaminación fecales causado por el depósito directo de las aguas negras o domesticas sobre los ríos.	
	Deforestación de las fuentes de aguas (nacientes, áreas de recarga y franja ribereña provocando sedimentación en los ríos.	
	Aumento de las áreas de potrero.	
	Presencia de basurereros en los ríos.	
ENFERMEDADES	Diarrea.	⇒ Construir un sistema de alcantarillados. ⇒ Establecer programas educativos permanentes. ⇒ Educación con acciones dirigidas a políticos y decisores. ⇒ Biodigestores en fincas con cerdos.
	Dengue.	
	Malaria.	
	Anemia.	
	Dolores estomacales.	
	Disentería.	
	Alergias.	
	Asma.	
	Gastritis.	
Problemas de salud dental.		

4.4 Proponer medidas adaptativas (mitigación) a la vulnerabilidad a la contaminación, sobre la base de la normativa vigente del recurso hídrico, resultado del análisis biofísico y social

Las propuestas de medidas adaptativas, se constituyó de la normativa legal vigente de las áreas de protección y regulaciones legales relacionadas a la contaminación del recurso hídrico; de los resultados del análisis de vulnerabilidad a la contaminación de las zonas de protección aparente (zona I y II) y de las consideraciones y/o planteamientos sociales realizados por los actores claves, funcionarios de instituciones gubernamentales y no gubernamentales, empresarios bananeros, autoridad municipal, sociedad civil, actores claves, líderes cantonales, distritales y comunales, productores, población de la zona urbana de Siquirres y de las comunidades del Coco, Moravia y Guayacán.

Las medidas adaptativas correspondientes a 5 años (de corto plazo) fueron definidas como diligencias y las de 10 a 15 años (de mediano y largo plazo) como planes y proyectos. A continuación se definen las medidas adaptativas para las zonas I y II y parte alta de la subcuenca (área de estudio).

Los planes y estrategias tienen como propósito: el desarrollo de una conciencia a la población sobre la importancia que implica para ellos la protección de las zonas I y II, a través de estrategias integrales de comunicación y educación ambiental; la promoción de la organización comunal y con base en ellos establecer iniciativas de gestión integral en coordinación con la municipalidad y las comunidades del Coco, Moravia y Guayacán; la motivación para el desarrollo de una cultura ambiental hídrica donde se integren valores positivos que logren el fomento de medidas de protección al recurso hídrico, así como la educación y participación colectiva.

Como ejes transversales de las medidas adaptativas, en los diferentes lazos de tiempo se debe considerar: 1) la concientización a la población de la parte alta de la subcuenca y zona urbana de Siquirres; 2) la colaboración técnica por parte de la municipalidad, AyA, MINAET, Ministerio de Salud y Seguridad Social, Ministerio de Educación, Sociedad civil, Centros de investigación (CATIE), entre otros; 3) la consolidación de la estructura organizativa del comité local de la subcuenca en la parte alta, la cual mediante la gestión compartida y colaborativa gestionar los recursos económicos para llevar a cabo el ajuste de las medidas adaptativas propuesta en un inicio; y en último lugar 4) la capacitación de las actividades a realizarse y considerando siempre la supervisión de expertos.

Se recalca que para lograr el éxito de las medidas adaptativas, se debe hacer partícipe del apoyo técnico a través de las diferentes instituciones gubernamentales y no gubernamentales, universidades, colegios, entre otros y financiero de parte del gobierno municipal, AyA y empresa privada (sector comercio, bananeras, piñeras, entre otros) y por supuesto el trabajo concientizado de los pobladores de las comunidades de la parte alta de la subcuenca; para la cual se hace necesario una buena organización con un objetivo común (proteger la parte alta del río Siquirres contra los contaminantes) en la búsqueda de soluciones a las problemáticas que afectan al río Siquirres.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Referente a la caracterización biofísica, socioeconómica y legal, con énfasis en el recurso hídrico:

1. Los parámetros biofísicos y socioeconómicos tales como; el parámetro de forma (1,67), la morfometría (elevación media = 189,2), la inclinación del perfil longitudinal del cuace principal de la parte alta (ciudad de Siquirres - alto de Guayacán), las altas precipitaciones (3464 mm/año) y humedad relativa (85 - 90%) y la proyección demográfica del distrito, constituyen los componentes básicos sobre los cuales se debe empezar a proyectar toda la planificación del recurso hídrico en la subcuenca.
2. La Ley Forestal (Ley No. 7575), en su Capítulo IV, art 33, inciso a) y b) y la Ley de Aguas (Ley No. 276), art. 31, constituyó la normativa vigente que creó la zona I y la Ley de Biodiversidad habre la posibilidad de crear la zona II, como área de protección de fuente de agua a traves del PSA.

Referente a la delimitación, estimación y conceptualización de la zona I y II:

1. El proceso de consulta, discusión, análisis, consenso y validación (valoración) constituyó los tipos de vulnerabilidades, variables e indicadores de vulnerabilidad global a la contaminación de aguas superficiales y permitió caracterizar la zona I como de vulnerabilidad alta (60,76%).
2. La metodología de vulnerabilidad global a la contaminación de aguas superficiales (zona I), permite identificar los indicadores que influyen en la contaminación actual. Además, ofrece dos escenarios de vulnerabilidad con distanciamiento medibles (vulnerabilidad nula o ideal y actual), que en un futuro pueden ser utilizados como los puntos de referencia a las nuevas estimaciones de vulnerabilidades, los cuales permitirán monitorear la dinámica evolutiva entre el distanciamiento de escenarios, y de esta forma ir ajustando y direccionando los proyectos y programas de protección al recurso hídrico.

3. El procedimiento propuesto para delimitar y estimar la zona II a través de las metodologías RAS y GOD-S modificado, supone la mejor elección de aplicación porque ambos métodos presentan una estructura de cálculo simple y requieren de información básica disponible en el país.
4. Las zonas potenciales con mayores láminas de recarga de agua, se distribuyen en la parte alta de la subcuenca (áreas de nacientes y ojos de agua) con láminas que sobrepasan los 2000 mm/año (zona II), ubicada dentro del perímetro del área protegida según Decreto No. 24785-MIRENEN, por lo tanto cualquier intervención antrópica no solo repercutiría significativamente en la cantidad y calidad del agua superficial (río Siquirres) y subterránea, sino que infringirían la ley.
5. La parte alta de la subcuenca presenta un grado de vulnerabilidad media del acuífero, con una distribución homogénea en toda la subcuenca, no obstante, considerando las características físicas y biofísicas, las secciones estratigráficas, las variaciones texturales, la poca profundidad de la zona no saturada y la superficie del nivel estático, la parte alta de la subcuenca supone una vulnerabilidad alta a la lixiviación de cualquier contaminante químico.
6. La delimitación de la zona II, ofrece una alternativa técnica y legal (Ley de Biodiversidad) que debe ser considerada por las instituciones gubernamentales y no gubernamentales del Cantón de Siquirres, para implementar un programa de PSA que pueda cobrarse a través de las tarifas de suministro de agua de consumo humano, con el fin de protegerla.

Referente al análisis de vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en las zonas de protección aparente:

1. En función de los resultados del índice de calidad de agua (ICA) para los periodos establecidos (seco, de transición y lluvioso) se puede concluir que la calidad del agua cruda superficial del río Siquirres es "regular" (54,47), siendo los parámetros que

representan los valores inadmisibles o intolerables los de coliformes fecales y DBO₅ para los tres periodos y la turbidez en el periodo lluvioso.

2. La concentraciones de coliformes fecales y DBO₅ en el agua cruda del río Siquirres se debe a la expansión urbana no planificada, la falta de sistemas de alcantarillados de aguas negras y/o servidas, a las letrinas y/o tanques sépticos con materiales no adecuados, ganadería a orillas del río, existencia de pequeños establos de porquerizas, existencia de basureros ilegales y la falta de un tren de aseo.
3. Aunque los niveles no tolerables de turbidez de agua para consumo humano, son solamente estacionales, estos reflejan que en la zona estudiada existen problemas de erosión por el inadecuado uso y manejo del suelo, principalmente por la ganadería.
4. De acuerdo a la modelación de las direcciones de flujo del agua subterránea en la subcuenca del río Siquirres, la misma posee una división hidrogeológica relativamente bien definida, revelando un río afluyente (ganador) en la relación río-acuífero. Esta relación afluyente implica que todas aquellas acciones que están afectando la cantidad y calidad del agua subterránea se reflejan en el agua del río, principalmente en las épocas de verano (secas) cuando el acuífero es el que mantiene los caudales de estiaje.
5. Aunque la mayor parte de los pobladores de la subcuenca del río Siquirres tienen conciencia de la importancia en disponer de agua de calidad y las consecuencias del deterioro del recurso por inadecuadas prácticas de manejo (exceso de agroquímicos y arrojar desechos sólidos y líquidos al río), paradójicamente la mayor parte tiene un nivel bajo de conocimiento acerca de la situación ambiental de la parte alta de la subcuenca (donde se encuentra las fuentes de agua), desconocen de dónde proviene el agua que consumen y cuál es la situación de las plantas de tratamiento y por ende su calidad, situación que refleja el poco conocimiento de la población en la gestión del recurso hídrico y en el poco interés en involucrarse en actividades de conservación de los recursos, en general.

6. Existe poco conocimiento de la situación hídrico ambiental, por parte de los funcionarios de las instituciones que tienen vínculo por ley con recurso hídrico del Cantón, asimismo, un bajo interés en plantear iniciativas ambientales y de coordinación interinstitucional encaminadas a la protección, administración y manejo adecuado del recurso hídrico de la parte alta de la subcuenca.

Referente a las propuestas de medidas adaptativas de la zona I y II:

3. La metodología plateada a través del estudio de la normativa vigente, el análisis de vulnerabilidad a la contaminación y las consideraciones y/o planteamientos sociales, permitió proponer acciones de mitigación o medidas adaptativas a la contaminación puntual y difusa para periodos de corto, mediano y largo plazo.
4. Las medidas adaptativas propuestas en la investigación presentan un conjunto de actividades graduales que atacan directamente la contaminación actual y las causas de los problemas de gestión del recurso hídrico en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres, e involucra a todos los actores y permite su sostenibilidad en el corto y largo plazo.

Recomendaciones

1. Continuar validando los indicadores de la vulnerabilidad global a la contaminación actual de la zona I por periodos de tres o cinco años, con la finalidad de monitorear la evolución de los escenarios de vulnerabilidad, asimismo, ir ajustando, direccionando y actualizando las acciones de los planes, proyectos y programas encaminados a la protección del río Siquirres.
2. La municipalidad y AyA en conjunto con todos los habitantes de las comunidades, deben gestionar los recursos técnicos y financieros necesarios, para diseñar y construir el sistema de alcantarillado de aguas negras y servidas, desde Guayacán, pasando por las comunidades Moravia y el Coco, hasta hacer conexión con la ciudad de Siquirres. Además, deberán promover la organización comunal y financiar un programa de educación ambiental.

3. Establecer y consolidar una estructura comunal llámese comité de cuencas o juntas de agua, liderada por la municipalidad y AyA, con el involucramiento del MINAET, MAG, SENARA, empresas bananeras y piñeras, para que a través de una gestión compartida y direccionada puedan buscar los recursos necesarios (técnicos y económicos), en la aplicación de las medidas adaptativas propuestas a cada zona.
4. Declarar la zona I y II como zonas de protección a la contaminación a través de una reforma al Decreto No. 24785-MIRENEM y dejar entre dicho que el comité de cuencas o junta de agua sea la encargada de fiscalizar, promover, gestionar y ejecutar los recursos técnicos y económicos para las actividades, proyectos o programas de protección a las zonas.
5. Considerar la propuesta de medidas adaptativas en todos los programas y proyectos que vayan a efectuarse en la parte alta del río Siquirres. Además, la municipalidad y AyA deben difundirlas a los funcionarios de las instituciones, colegios de primaria, secundaria y universidades, a productores, empresarios del sector agrícola (bananeros y piñeros), al sector comercio y a los pobladores del distrito de Siquirres.
6. La municipalidad y AyA deben difundir el concepto de manejo integrado de cuencas a los comunitarios y pobladores de la zona rural de Siquirres. Igualmente AyA deberá divulgar los análisis de laboratorio correspondiente al agua cruda del río Siquirres y del agua distribuida por la planta de tratamiento.
7. Se recomienda hacer estudios catastrales de ordenamiento territorial y un estudio de valoración económica de los bienes y servicios ambientales (BSA) de la parte alta de la subcuenca que incluya la cuantificación de su aporte a la economía local y cantonal, con el objetivo de implementar un programa de PSA.

6. LITERATURA CITADA

- Agüero, VJ. 2000. Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Tesis Lic. Ing. Civil. San José, CR, UNA. 195 p.
- _____; Pujol Mesalles, R. 2006. Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. 15 p. Consultado el 4 jul. 2008 Disponible en: http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm
- Aguilar Schramm, A; Jiménez, MS; Cruz Álvarez, M. 2001. Manual de regulación jurídica para la gestión del recurso hídrico en Costa Rica. 1^a ed. San José, CR, CEDERENA. 116 p.
- _____. 2002. Guía para la protección del recurso hídrico. Programa de incidencia política en manejo integrado del recurso hídrico. San José, CR, CEDARENA. 29 p.
- Aguilar, E; Ballesteros, M; Echeverría, J; Espinoza, C; Oreamuno, R; Villalta R. 2004. Primera etapa del plan de manejo integrado del recurso hídrico: una estrategia nacional para el MIRH. San José, CR. 153 p.
- Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings. EPA-600/2-87-0305. Washington, DC. USA. 87 p.
- Alvarado, GE; Leandro, CE. 1997. Actualización geológica-geofísica de los sitios en donde se construirán las grandes obras del P. H. Angostura: un enfoque hacia los problemas ingenieriles conexos. San José, CR, ICE. 88 p.
- Aparicio Mijares, FJ. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. 6 ed. ME, Limusa. 303 p.
- Arumí, JL; Martín, DL; Watts, DG. 2001. Modelación del impacto de prácticas de manejo agrícola en aguas subterráneas (en línea). III Encuentro de las Aguas: Agua, Vida y Desarrollo. Professors. University of Nebraska-Lincoln. USA. Consultado 2 may. 2008. Disponible en: www.aguaboliivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/TC-012.htm
- Astorga, Y. 2007. Materiales de referencias en curso de gestión integrada del recurso hídrico. Turrialba, CR, CATIE. 61 p.
- Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos: conceptos y Métodos (en línea). Universidad de Buenos Aires del CONICET, Argentina. Consultado 10 maz. 2008. Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>
- AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados). 2003. Informe presidencia ejecutiva PRE-2008-0417. 7 p.

- _____, Siquirres. 2007. Resumen de calidad según código de colores Región Huerta - Atlántica. III y IV Trimestre. 5 p.
- Báez, VA. 2001. Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos (en línea). Instituto de Geodesia - Universidad Nacional Autónoma de México D.F. Consultado 23 jul. 2008. Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html>
- Barrantes, G; Jiménez, L; Maldonado, T. 2005. Disponibilidad del recurso hídrico y sus aplicaciones para el desarrollo en Costa Rica: artículo elaborado para el XI informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, CR, IPS. p. 3-22.
- Bergoeing, JP. 1998. Geomorfología de Costa Rica. 1ª. Ed. San José, CR, IGN. 409 p.
- Berrangé, JP; Whittaker, J.E. 1977. Reconnaissance geology of the Tapanti quadrangle, Talamanca cordillera, CR, Report 37, Londres. p. 5-16.
- Briefing, 2005. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Europa (en línea). ISSN 1830-2254. Agencia Europea de Medio Ambiente. Consultado 8 abr. 2008. Disponible en: http://reports.es.eea.europa.eu/briefing_2005_3/es/Briefing_3_2005_ES.pdf
- BROWN, R. 1970. A Water Quality Index - Do We Dare? Water Sewage Works 11. p. 339-343.
- Bosch, JM; Hewlett, JD. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Hydrol. no. 55:3-23.
- Buch, MW. 1988. Degradation of ignimbrite soils and the destruction of pine forest in Honduras. Plant Research and Development, Biannual Collection. no. 28:32-46.
- Buch Texaj, MS. 2001. Evaluación del riesgo a deslizamientos en la subcuenca Matanzas, Río Polochic, Guatemala. Tesis MSc. Turrialba, CR, CATIE. 152 p.
- Cáceres Johnson, K. 2001. Metodología para estimar degradación y vulnerabilidad a desastres naturales: aplicación a la microcuenca Los Naranjos, Lago de Yojoa, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 124 p.
- CAPRE. (Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana). 2003. Norma técnica nacional para agua de uso agrícola y pecuaria, recreativo, preservación de la flora y fauna y abastecimiento de poblaciones. República de Honduras, Secretaría de Salud. p. 5-9.
- _____. 1994. Normas de calidad del agua para consumo humano. San José, CR. 27 p.
- Cardona, OD. 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. In maskrey, A. comp. Los desastres no son naturales. Bogotá, CO. La Red. p. 40-76.

- Castro, E; Jiménez L. 2000. Degradación del recurso hídrico: análisis de políticas ambientales. San José. CR, CINPE / UNA. p. 2-19.
- Castro, R; Monge, E; Rocha, C; Rodríguez H. 2004. Gestión local y participativa del recurso hídrico en Costa Rica. San José, CR, CEDARENA. 72 p.
- Castillo, RM, 1993. Geología de Costa Rica: una sinopsis. 2ed. San José, CR, UCR. 188 p.
- Castillo Muñoz, R. 1993. Geología de Costa Rica. 2 ed. San José, CR. UCR. 188 p.
- Calvo, L. 2005. Métodos de riego: un enfoque práctico para el diseño. San José, CR, Colorgraf. 168 p.
- Chaves, M. 2002. Análisis de la vulnerabilidad del recurso hídrico y opciones de manejo sostenible en la cuenca del río San Carlos. San José, CR. p. 5-22.
- CEDARENA (Centro de Derecho Ambiental y de los Recursos Naturales). 2008. Guía para la protección del recurso hídrico. San Jose, CR. 29 p.
- _____. 2004. Herramientas para la protección del recurso hídrico. San José, CR. 22 p.
- CEPAL. 2005. Objetivos de desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. Santiago, CL, CEPAL. 335 p.
- Censo Nacional de Población y de Vivienda. 2000. CR. s.p.
- Cervantes, JF. 1988. Proyecto hidroeléctrico Siquirres: estudio geológico geotécnico de la zona del embalse. Informe de avance 3. San José, CR, ICE. 64 p.
- _____; Soto, GJ. 1988. Sedimentación y volcanismo tras-arco, Plio-Cuaternario en el área de Siquirres. Ciencia y Tecnología, San José, CR. 12 p.
- _____. 1989. Base geológico para los análisis geotécnicos del proyecto hidroeléctrico Siquirres, provincia de Liman, Costa Rica. San José, CR, UCR. 105 p.
- Civita, MV; De Maio, M. 1999 Mapping Groundwater vulnerability in areas impacted by flash flood disasters, internet site ESRI. p. 3-17.
- Córdobas, N. 2002. Calidad del agua y su relación con los usos actuales en la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 158 p.
- Cortes, JJ; Moreno, LS; Nieto, AM; Méndez, AL. 2005. Vulnerabilidad de acuífero a la contaminación (en línea). Depto. de Riego y Drenaje UAAAN, Comisión Nacional del agua en Coahuila. Consultado 14 maz. 2008. Disponible en: http://www.uaaan.mx/DirInv/Resul_PI-04/MEMORIA_2004/IngAgricola/JJCortesBracho-2.doc
- Custodio, G. 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero (109-4). p. 13-29.

- Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, ES, Ediciones Omega. v. 1-2. 2350 p.
- _____ y Llamas, MR. 1983. Hidrología subterránea: explotación de aguas subterráneas. v. 2, Barcelona, ES. Omega. 45 p.
- Dourojeanni, A. 1994. Políticas públicas para el desarrollo sustentable: la gestión integrada de cuencas. Santiago, CL, CEPAL. 238 p.
- Domínguez del Agula, S. 2008. Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca bimunicipal del río Aguas Calientes, Nicaragua. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 165 p.
- Dondoli, C; Torres, JA. 1954. Estudio geoagronómico de la región oriental de la meseta central. San José, CR, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Industria. 180 p.
- Escalante, G. 1996. Geología de la cuenca superior del río Reventazón. San Jose, CR, Publicaciones Geológicas del ICAITI. p. 59-69.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1991. Guide for conducting contaminant source inventories for public drinking water supplies: technical assistance document. Washington, DC. USA, EPA. 34 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1981. Contaminación de las aguas subterráneas. Madrid, ES. 191 p.
- Faustino, J. 2007. Curso protección de fuentes de agua: documento técnico para el curso. Organización por la Oficina Técnica Nacional del CATIE. Managua, NI, CATIE. 98 p.
- _____. 2006. Notas de clase para el curso identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. ES, CATIE. 217 p.
- _____; García, S. 2001. Enfoques y criterios prácticos para aplicar el manejo de cuencas. San Salvador, ES, Visión Mundial. 125 p.
- Foster, S; Hirata, R; Gomes, D; D'Elia, M; Paris, M. 2002. Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de aguas, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial 1818H Street, N.W. Washington, DC. 115 p. Consultado 25 jun. 2008. Disponible en www.worldbank.org
- _____; Hirata, R. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Lima, PR, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS/OPS/OMS). 189 p.

- _____ ; Hirata, R. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: CEPIS/PAHO-WHO Technical Report. Lima (Perú). (en línea). Consultado 28 oct. 2008. Disponible en: <http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/vulnerabilidad.pdf>
- Hernández, G. 2005. Mapa climatológico digital de Costa Rica. Heredia, CR, UNA. 16 p.
- Herrera, W. 1988. Análisis climático de siete variantes del balance hídrico aplicado a Costa Rica. Tesis Lic. Geográfica Física, Escuela de Geografía Universidad Nacional. Heredia, CR, UNA 65 p.
- _____. 1985. Clima de Costa Rica. EUNED, San José, CR. p. 4-12.
- Huguet, JM. 2005. Hidrogeología: tipos de acuíferos. Sevilla, ES. 45 p.
- Infostat. 2004. Infostat, versión 2004. Manual del usuario. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. 1 ed. Editorial Brujas Argentina. 314 p. www.infostat.com.ar
- INEC (Censos de Población). 1950, 1963, 1973, 1984, 2000.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, Cambridge University Press. p. 3-76.
- Gomáriz, E. 1999. Género y desastre: introducción conceptual y criterios operativos. La crisis del huracán Mitch en Centroamérica. San José, CR, Fundación Género y Sociedad. 245 p.
- Gómez Rivera, SN. 2003. Análisis de vulnerabilidad con énfasis en sequía en la subcuenca del río Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 91 p.
- Guerrero, E; Keizer, O; Córdoba R. 2006. La aplicación del enfoque ecosistémico en la gestión de los recursos hídrico: un análisis de estudios de caso en América Latina (en línea). UICN-sur, PNUMA, San José, CR, Consultado 15 oct. 2008. Disponible en: <http://www.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2006-003.pdf>
- Guevara, WH. 2005. Contaminación ambiental urbana por vertidos líquidos. Universidad Sergio Arboleda: especialización en gerencia para el manejo de los recursos naturales, del medio ambiente y riesgo a desastre con énfasis en gestión ambiental urbana. Bogotá, CO. 32 p.
- Granados, R; Morera, JF; Guendel, F; Ávila, G. 1980, Informe geológico preliminar a la fase de viabilidad proyectos Angostura. San José, CR, ICE. 103 p.
- Grupo Técnico del Agua. 2004. El proceso hacia una nueva Ley de Aguas en Costa Rica. San José, CR. 26 p.
- GWP (Asociación Mundial para el Agua); TAC (Comité de Consejo Técnico). 2000. Manejo Integrado de Recursos Hídricos. Santiago, CL. 80 p.

- Jiménez, F. 2007. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Material de referencia en curso de maestría en Manejo de Cuencas Hidrográficas I. Turrialba, CR, CATIE. 20 p.
- _____. 2007. Estudio de caso y ejercicio sobre análisis de vulnerabilidad ante amenazas siconaturales en cuencas hidrográficas. CATIE, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Grupo Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 6 p.
- _____; Velásquez, S; Faustino, J. 2004. Análisis integral de la vulnerabilidad a amenazas naturales en cuencas hidrográficas de América Central. *In* VI Semana Científica (Resúmenes). Turrialba, CR, CATIE. 93 p.
- _____. 2002. Apuntes de clase del curso Manejo de Desastres Naturales. Turrialba, CR, CATIE. 288 p.
- Junker, M. 2005. Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea. FORGAES. S. 40 p.
- Krushensky, R. 1972. Geology of the Istaru quadrangle Costa Rica. Geol. ofical Survey Bulletin 1358. 46 p.
- Lavell, A. 1993. Ciencias sociales y desastres naturales en América Latina: un encuentro inconcluso. *In* Los desastres no son naturales. Marskey, A. comp. Bogotá, CO. La Red. p. 111-127.
- Linkimer Abarca, L. 2003. Neotectónica del extremo oriental del cinturón deformado del centro de Costa Rica. Tesis Lic. San José, CR, UCR. 144 p.
- León, LF. 1991. Índice de Calidad del Agua, ICA, Inf. # SH-9101/01. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ME. 36 p.
- Losilla, M. 1986. Aguas subterráneas: generalidades, ocurrencia, tipos de acuíferos. *In* Curso bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Mayo 1987. Turrialba, CR, CATIE. 9 p.
- _____. 1986. Protección de las zonas de recarga de los acuíferos. *In* Curso bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Mayo 1987. Turrialba, CR, CATIE. 8 p.
- Lucke, O. 1980. Estudio de la cuenca del río Siquirres. San José, CR. 41 p.
- MAG. 2000. Estudios de suelos y capacidad de uso de las tierras: escala 1:50000 para la zonificación agropecuaria de las regiones Huetar Norte, Atlántico y Brunca. Informe final. San José, CR. 253 p.
- MAG-MIRENEM. 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de la tierra en Costa Rica. San José, CR, SEPSA. p. 3-12.
- Malavassi, E. 1967. Reseña geológica de la zona de Turrialba. San José, CR, Ministerio de Industria y Comercio. 12 p.

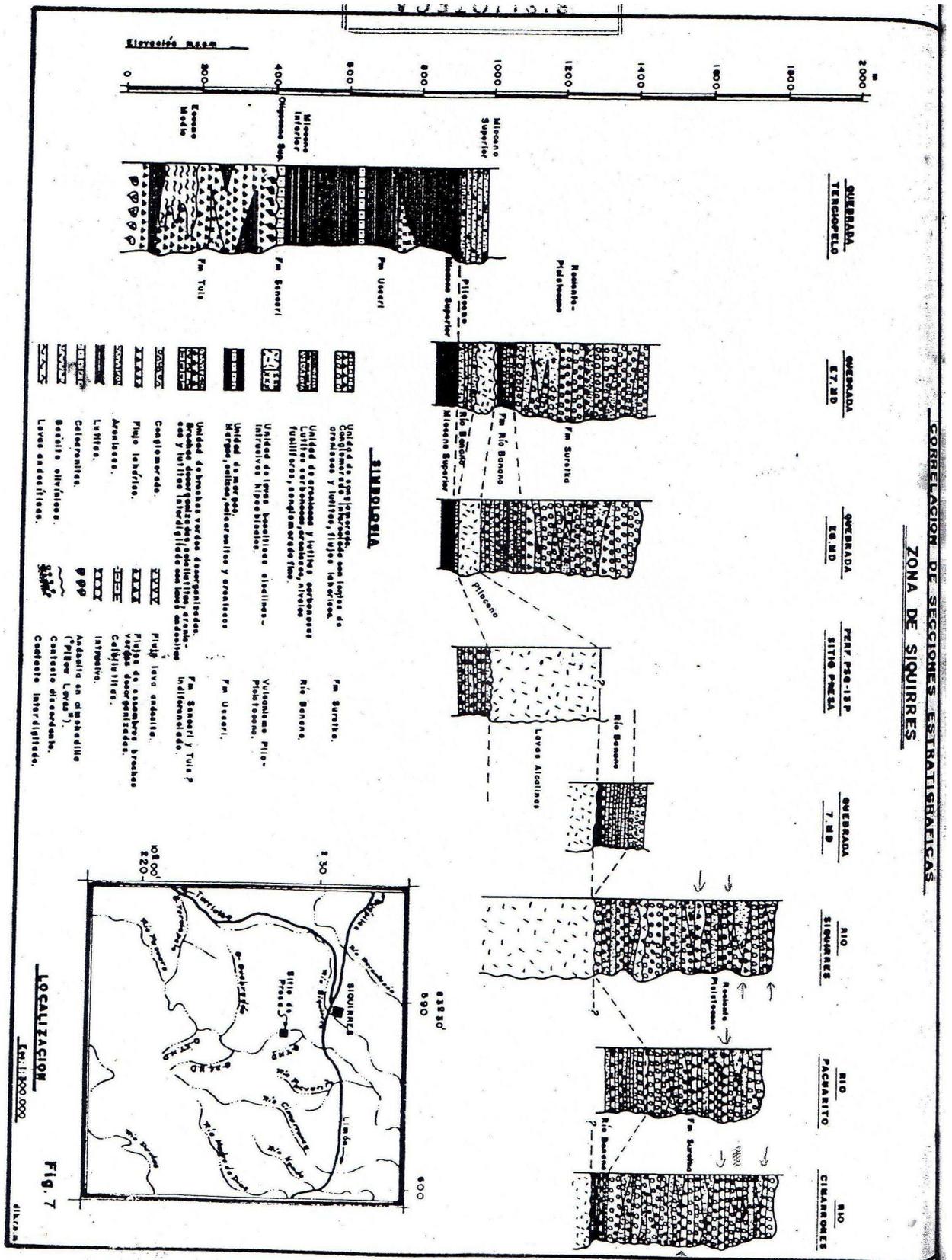
- Meléndez Valle, BA. 2001. Uso de los recursos naturales y su relación con la vulnerabilidad a inundaciones y deslizamientos en la cuenca del río Tuis, Costa Rica. Tesis MSc. Turrialba, CR, CATIE. 93 p.
- Mitchell, M; Stapp, W; Bixby, K. 1991. Manual de campo de proyecto del río: una guía para monitorear la calidad del agua en el río Bravo. Proyecto del río New México, USA. 200 p.
- Ministerio de Salud y Seguridad Social. 2006. Dirección de compras de servicios de salud: área de salud de Siquirres. Huetar Atlántico, Siquirres, Limón, CR. 3 p.
- Mora, R; Cerdas, A; Molina, F; Vega, E. 1990, Caracterización geológica del deslizamiento de Chiz (Turrialba, provincia de Cartago, CR. no. 11:59-68.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1988. Guías para la calidad del agua potable: vigilancia y control de los abastecimientos de aguas a la cantidad. 2 ed. OMS, Ginebra. 3:1-235.
- Ongley, ED. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio de la FAO. Riego y Drenaje 55. Roma, Italia. FAO. 116 p.
- ONU (Organización de Naciones Unidas). 1972. Manual de instrucciones, estudios hidrológicos. no. 70. San José, CR, ONU. p. 1-140.
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2000. Control de contaminación de recursos hídricos. 2 ed. Lima, PR, OPS. 130 p.
- _____. 1987. Guías para la calidad del agua potable: criterios relativos a la salud y otra información de base. Washington, DC. USA, OPS. 20:350.
- Orozco, E; Padilla, T; Salguero, M. 2003. Manual técnico: metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. GU. 105 p.
- Parra Pichardo, YK. 2003. Análisis de vulnerabilidad a deslizamientos y avalanchas en la zona de Orosi, Costa Rica. Proyecto de Tesis MSc. en Manejo de Cuencas Hidrográficas, Turrialba, CR, CATIE. 40 p.
- Pérez, CL. 1989. Caracterización geológica geotécnica del macizo rocoso del sitio de presa del proyecto hidroeléctrico Siquirres, provincia de Limón, Costa Rica. San José, CR, UCR. 54 p.
- Pérez, W. 1996. Estudio geológico y de amenazas naturales, corredor Turrialba-Siquirres, poliducto RECOPE, Sector Laguna Bonilla-Guayacán. San José, CR, UCR. 71 p.
- Pérez, CJ. 2007. Adaptación al cambio climático. Curso BB 507. Proyecto TROFCCA. 15 p.
- Peter, A. 1998. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, U.K. USA, Oxford University Press. 210 p.

- Pierre, R. 1971. Recarga de los acuíferos subterráneos. In Seminario sobre las aguas subterráneas. Granada, ES, FAO. p. 79-86.
- Prins, C. 2007. Innovación, manejo adaptativo y gobernabilidad: tres nociones claves en conservación de RRNN y desarrollo humano. TC-503. Curso consideraciones económicas, ecológicas y sociales en el desarrollo humano. Turrialba, CATIE, CR. 45 p.
- Radulovich, R. 1997. Sostenibilidad en el uso del agua en América Latina. Revista Forestal Centroamericana. 18:13-17.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategia de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. Serie investigación y educación en desarrollo sostenible. San José, CR, IICA. 338 p.
- Reyes Sandoval, WM. 2003. Vulnerabilidad a desastres naturales, determinación de áreas críticas y propuesta de mitigación en la microcuenca del río Talgua, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 118 p.
- Reyes; Virginia; Olman, S; Gámez, L. 2003. Régimen del recurso hídrico: el caso Costa Rica. Centro. San José, CR, CINPE-GWO. 28 p.
- Resumen ejecutivo. 2004. Situación del agua en Costa Rica. 20p (en línea). San José, CR, Consultado 17 feb. 2008. Disponible en: <http://www.una.ac.cr/campus/ediciones/otros/agua.pdf>
- Rivera Torres, LH. 2002. Evaluación de la amenaza y vulnerabilidad a inundación en la microcuenca La Soledad, valle de Ángeles, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 176 p.
- Sáenz, LF. 1985. Estudio geofísico para la factibilidad del proyecto hidroeléctrico Angostura. Tesis Lic. San José, CR, UCR. 21 p.
- Sáenz, F; Schultz, S; Hyman, G. 1997. Uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la identificación de degradación de tierras y recursos hídricos. Revista Forestal Centroamericana. 18:16-22.
- Salgado Montoya, RA. 2005. Análisis integral del riesgo a deslizamiento e inundaciones en la microcuenca del río Gila, Copán, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 172 p.
- Samboni, NE; Carvajal Y; Escobar JC. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 27 No.3. 172-181p.. Consultado 12 oct. 2008. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n3/v27n3a19.pdf>

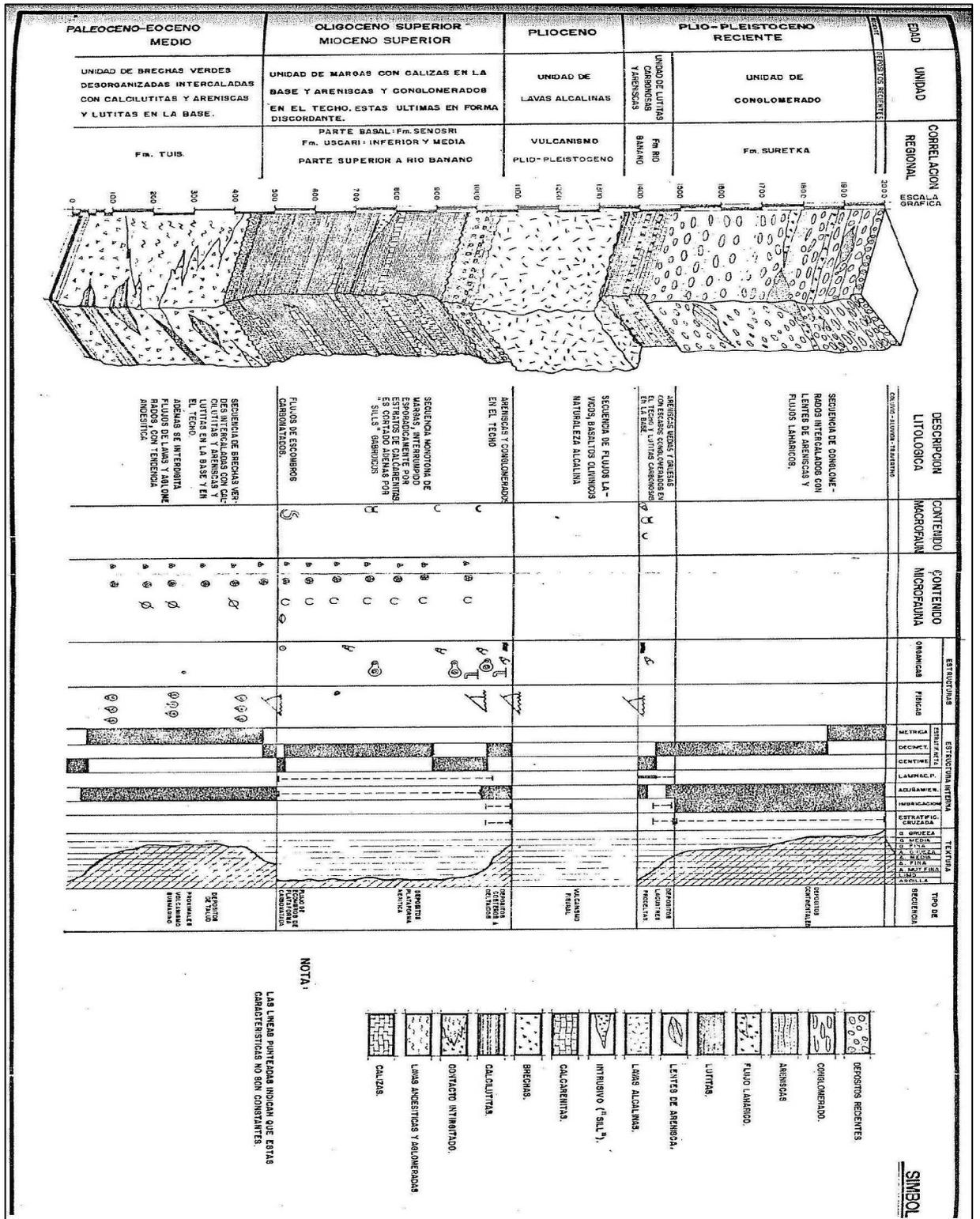
- Sánchez San Román, FJ. (2008). Hidráulica subterránea: principios básicos. Departamento de geología de la universidad Salamanca, España. 8 p. Consultado 8 oct. 2008. Disponible en: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T090.pdf>
- Salazar, R. 1998. Base de la legislación sobre recursos hídricos en Costa Rica. San José, CR. Consultado 8 jul. 2008. Disponible en: http://www.mideplan.go.cr/sinades/Proyecto_SINADES/sostenibilidad/armonizacion/index-5.html
- Schosinsky, G; Losilla, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. 23: 43-55.
- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). 2002. Índice de Calidad del Agua General ICA. Centro de Gobierno. San Salvador, El Salvador, Centro América. 14p. Consultado abr. 2008. Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculoICA.pdf>
- Stadtmuller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Una revisión bibliográfica. Turrialba, CR, CATIE. 62 p.
- TRAGSA; TRAGSATEC; Ministerio del Medio Ambiente. 1998. Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, Mundi prensa, ES. 945 p.
- UNA (Universidad de Costa Rica). 2008a. Plan regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico físico ambiental del Cantón de Siquirres. Proyecto en el marco de la carta de intenciones UNA-municipalidad de Siquirres firmado 8-11 / 7-12-2005. Heredia, CR, UNA. 112 p.
- _____. 2008b. Plan regulador del Cantón de Siquirres: síntesis del diagnóstico socioeconómico del Cantón de Siquirres. Proyecto en el marco de la carta de intenciones UNA-municipalidad de Siquirres firmado 8-11 / 7-12-2005. Heredia, CR, UNA. 112 p.
- Valverde, R. 1989. Investigación geológica-ambiental del proyecto túnel de pejibaye, Cartago, Costa Rica. Tesis Lic. San José, CR, UCR. 138 p.
- Villón, M. 2004. Hidrología. Cartago, CR, ITCR. 386 p.
- Wilches-Chaux, G. 1998. Auge, caída y levantamiento de Felipe Pinillo, mecánica y soldador o yo voy a correr el riesgo. Quito, EC, ITD / La Red. 153 p.
- _____. 1993. La vulnerabilidad global. In Maskrey, A. (Comp). Los desastres no son naturales. Bogotá, CL, La Red. p. 9-50.
- _____. 1988. La vulnerabilidad global. Los desastres no son naturales. Comp. A. Maskrey. Bogotá, CL, La Red. p. 9-47.

ANEXOS

Anexo 1. Secciones estratificadas de la zona de Siquirres (Cervantes 1989)



Anexo 2. Litoestratigrafía del área de Siquirres (Cervantes 1989)



Anexo 3. Valoración de la vulnerabilidad física (VF)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Indicadores validados			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	FÍSICA	Asentamiento humano	Número de casas ubicadas dentro de la franja de los 100 m a ambos lado del río (VF1)	Más de 57	4	Muy alta	4	4	4	4,00
				42 a 57	3	Alta				
				26 a 41	2	Media				
				10 a 25	1	Baja				
				Menos de 10	0	Muy baja				
		No aplica		NA						
		Sistema séptico.	Número de viviendas sin letrinas y/o tanques sépticos dentro de los 100 m al río (VF2)	Más de 9	4	Muy alta	1	2	1	1,33
				7 a 9	3	Alta				
				4 a 6	2	Media				
				1 a 3	1	Baja				
				Ninguno	0	Muy baja				
		No aplica		NA						
		Infraestructura de fosa séptica	Porcentaje de letrinas y/o fosa séptica construidas con materiales adecuados (VF3)	No aplica		NA	2	2	2	2,00
				88 a 100	0	Muy baja				
				76 a 87,9	1	Baja				
				64 a 75,9	2	Media				
				52 a 63,9	3	Alta				
		Menos de 52	4	Muy alta						
		Sistema de alcantarillado sanitario	Porcentaje de casas con sistema de alcantarillado sanitario (VF4)	No aplica		NA	4	3	4	3,67
				88 a 100	0	Muy baja				
				76 a 87,9	1	Baja				
				64 a 75,9	2	Media				
				52 a 63,9	3	Alta				
		Menos de 52	4	Muy alta						
		Basureros ilegales	Número de basureros ilegales existente en la parte alta de la subcuenca (VF5)	Más de 3	4	Muy Alta	4	4	4	4,00
				3	3	Alta				
				2	2	Media				
				1	1	Baja				
				Ninguno	0	Muy baja				
		No aplica		NA						
		Vertedero de residuos sólidos y líquidos urbanos	Distancia del vertedero municipal a la parte alta de la subcuenca (VF6)	No aplica		NA	NA	NA	NA	NA
				Más de 1321 m	0	Muy baja				
				902 a 1320,9 m	1	Baja				
501 m a 901,9 m	2			Media						
100 a 500,9 m	3			Alta						
Menos de 100 m	4	Muy alta								
Fábricas o manufacturas	Distancia en m de las fábricas al río Siquirres (VF7)	No aplica		NA	NA	NA	NA	NA		
		Más de 263	0	Muy baja						
		192 a 262,9	1	Baja						
		121 a 191,9	2	Media						
		50 a 120,9	3	Alta						
Menos de 50	4	Muy Alta								
Comercio	Distancia del mercado municipal a la toma de agua de AyA (VF8)	No aplica		NA	0	0	0	0,00		
		Más de 1000 m	0	Muy baja						
		700 m a 999,9 m	1	Baja						
		400 a 699,9 m	2	Media						
		100 a 399,9 m	3	Alta						
Menos de 100 m	4	Muy Alta								
Pequeños talleres de carpintería, automotrices, pintura y esmaltes, entre otros	Número de talleres dentro de los 100 m al río (VF9)	Más 3	4	Muy alta	1	1	1	1,00		
		3	3	Alta						
		2	2	Media						
		1	1	Baja						
		Ninguno	0	Muy baja						
No aplica		NA								
Gasolinera	Número de gasolineras	Más de 3	4	Muy alta	1	1	1	1,00		

	ubicadas a 150 m al río (VF10)	3	3	Alta	3	4	3	3,33	
		2	2	Media					
		1	1	Baja					
		Ninguna	0	Muy baja					
		No aplica		NA					
	Carretera asfaltada	Distancia en m entre el río y la carretera principal asfaltada (VF11)	No aplica						NA
			Más de 263	0					Muy baja
			192 a 262,9	1					Baja
			121 a 191,9	2					Media
			50 a 120,9	3					Alta
	Clínicas y farmacia cerca del río	Distancia en m de las farmacias y clínicas con respecto al río (VF12)	Menos de 50	4					Muy alta
			No aplica						NA
			Más de 223	0					Muy baja
			162 a 222,9	1					Baja
			101 a 161,9	2					Media
	Industria minera	Cantidad de pequeñas industrias minera (lavado o extracción de oro) dentro de los 150 m al río (VF13)	40 a 100,9	3					Alta
			Menos de 40	4					Muy alta
			Más 3	4					Muy alta
			3	3					Alta
			2	2					Media
	Aguas residuales	Porcentaje de casas que vierten sus aguas residuales o servidas al río (VF14)	1	1					Baja
			Ninguna	0					Muy baja
			No aplica						NA
			Más 61	4					Muy alta
41 a 60,9			3	Alta					
Tren de aseo	Número de pasadas del tren de aseo por semana (VF15)	21 a 40,9	2	Media					
		1 a 20,9	1	Baja					
		Menos de 1	0	Muy baja					
		No aplica		NA					
		Más de 5	0	Muy baja					
		4 a 5	1	Baja					
		3 a 4	2	Media					
		1 a 2	3	Alta					
		Ninguna	4	Muy alta					

Anexo 4. Valoración de la vulnerabilidad política-institucional (VP-I)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Validación de indicadores			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	POLÍTICA-INSTITUCIONAL	Apoyo de la municipalidad en proyectos y programas de protección, administración y manejo ambiental	Número de proyectos y programas ambientales ejecutados por año (VP-I1)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 3	0	Muy baja				
				3	1	Baja				
				2	2	Media				
				1	3	Alta				
		Ninguno	4	Muy alta						
		Apoyo de las instituciones estatales y privadas en la protección, administración y manejo ambiental	Número de proyectos y programas ejecutados por año (VP-I2)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 3	0	Muy baja				
				3	1	Baja				
				2	2	Media				
	1			3	Alta					
	Ninguno	4	Muy alta							
	Participación de productores y comunitarios	Porcentaje de productores y comunitarios que participan en la protección del río, nacientes, ojos de agua, pozos y áreas de recargas	No aplica		NA	4	4	4	4,00	
			Más de 80	0	Muy baja					
			60 a 79,9	1	Baja					
40 a 59,9			2	Media						
20 a 39,9			3	Alta						
Menos de 20	4	Muy alta								

		(VP-13)							
	Existencia de liderazgo en las comunidades de la parte alta de la subcuenca	Porcentaje de la población que reconoce a sus líderes comunitarios y/o productores (VP-14)	Más de 80	0	Muy baja	4	4	4	4,00
			60 a 79,9	1	Baja				
			40 a 59,9	2	Media				
			20 a 39,9	3	Alta				
			Menos de 20	4	Muy alta				
	Fiscalización por las instituciones cantonales en la protección del río, nacientes, ojos de agua, pozos y áreas de recargas	Porcentaje de la población que considera eficiente la fiscalización de las instituciones nacionales y cantonales (VP-15)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
			Más de 80	0	Muy baja				
			60 a 79,9	1	Baja				
			40 a 59,9	2	Media				
			20 a 39,9	3	Alta				
	Aplicación de la Ley de aguas (No. 276) y Ley Forestal (No. 7575), en la protección de la franja ribereña del río (50 m a ambos lados)	Apreciación en la aplicación de las leyes (VP-16)	Ninguna	4	Muy alta	4	4	4	4,00
			Muy poca	3	Alta				
			Poca	2	Media				
			Regular	1	Baja				
			Mucha	0	Muy baja				
	Criterios del marco legal	Porcentaje de la población que conocen las leyes que tipifican la protección y manejo adecuado de las nacientes y áreas de recargas (VP-17)	No aplica		NA	3	4	3	3,33
			Más de 80	0	Muy baja				
			60 a 79,9	1	Baja				
			40 a 59,9	2	Media				
			20 a 39,9	3	Alta				
Plan de prevención y mitigación de riesgo a la contaminación del río, nacientes, ojos de agua, pozos, durante los últimos 5 años	Número de planes elaborados por las instituciones gubernamentales, ONG's y/o gobierno municipal (VP-18)	No aplica		NA	4	3	3	3,33	
		Más de 3	0	Muy Baja					
		3	1	Baja					
		2	2	Media					
		1	3	Alta					
Coordinación interinstitucional sobre el tema de contaminación del agua del río Siquirres	Número de actividades coordinadas por año (VP-19)	No aplica		NA	4	4	4	4,00	
		Más de 3	0	Muy Baja					
		3	1	Baja					
		2	2	Media					
		1	3	Alta					
		Ninguna	4	Muy alta					

Anexo 5. Valoración de la vulnerabilidad ecológica (VEC)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Indicadores validados			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	ECOLÓGICA	Manejo de agroquímicos	Porcentaje de productores que hacen un buen manejo en la aplicación de agroquímicos (VEC1)	No aplica		NA	NA	NA	NA	NA
				Más de 90	0	Muy baja				
				65 a 89,9	1	Baja				
				40 a 64,9	2	Media				
				15 a 39,9	3	Alta				
		Menos de 15	4	Muy alta						
		Tiendas de agroquímicos	Número de tiendas de agroquímicos existentes en la subcuenca o en la ciudad de Siquirres (VEC2)	Más de 3	4	Muy alta	2	2	2	2,00
				3	3	Alta				
				2	2	Media				
				1	1	Baja				
Ninguna	0			Muy baja						
No aplica		NA								
Erosión de	Tipo de erosión	Cárcavas profundas	4	Muy alta	3	2	3	2,67		

suelos en la franja ribereña (50 m de distancia a ambos lado al río)	predominante (VEC3)	Surco/carcavas superficiales	3	alta				
		Laminar o surcos (moderada)	2	Media				
		Surcos ligeros (baja)	1	Baja				
		Sin evidencia	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
Tipo de suelo	Propiedades texturales superficial y sub-superficial predominante en los 50 m de distancia al río (VEC4)	Arenoso/franco arenoso	4	Muy alta	4	3	3	3,33
		Franco arenoso/arcillo arenoso	3	Alta				
		Franco arcilloso/arcillo limoso	2	Media				
		Arcilloso limoso/arcilloso	1	Baja				
		Arcilloso	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
Deforestación	Porcentaje de área deforestada en los 50 m de distancia al río (VEC5)	Más de 90	4	Muy alta	2	2	2	2,00
		65 a 89,9	3	Alta				
		40 a 64,9	2	Media				
		15 a 39,9	1	Baja				
		Menos de 15	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
Agricultura	Porcentaje de productores con prácticas agrícolas en la franja ribereña (50 m de distancia al río) (VEC6)	Más de 50	4	Muy alta	0	0	0	0,00
		35 a 49,9	3	Alta				
		20 a 34,9	2	Media				
		5 a 19,9	1	Baja				
		Menos de 5	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
	Porcentaje de productores que utilizan agroquímicos (VEC7)	Más de 52	4	Muy alta	0	0	0	0,00
		31 a 51,9	3	Alta				
		10 a 30,9	2	Media				
		Menos de 10	1	Baja				
		Ninguno	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
	Tipos de cultivos con uso de agroquímicos (VEC8)	Hortalizas	4	Muy alta	0	0	0	0,00
		Cultivos anuales	3	Alta				
		Semiperennes	2	Media				
		Perennes	1	Baja				
		Ninguno	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
	Cantidad de aplicaciones de agroquímicos por año (VEC9)	Más de 3	4	Muy alta	0	0	0	0,00
		3	3	Alta				
		2	2	Media				
		1	1	Baja				
		Sin aplicación	0	Muy baja				
		No aplica		NA				
Tipo de riego utilizado en cultivos ubicados dentro de la franja ribereña (VEC10)	Surcos o de bordes	4	Muy alta	0	0	0	0,00	
	Por gravedad	3	Alta					
	Aspersión o micro aspersión	2	Media					
	Goteo	1	Baja					
	Sin riego	0	Muy baja					
	No aplica		NA					
Porcentaje de agricultores con prácticas de conservación de suelos y agua (VEC11)	No aplica		NA	4	4	4	4,00	
	Más de 83	0	Muy baja					
	57 a 82,9	1	Baja					
	31 a 56,9	2	Media					
	5 a 30,9	3	Alta					
	Menos de 5	4	Muy alta					
Distancia en m de las áreas agrícolas con respecto al río	No aplica		NA	0	0	0	0,00	
	Más de 118	0	Muy baja					
	82 a 117,9	1	Baja					

		Ganadería	(VEC12)	46 a 81,9	2	Media	3	2	3	2,67
				10 a 45,9	3	Alta				
				Menos de 10	4	Muy alta				
			Número de porqueriza y gallineros existentes en la franja de los 100 m al río (VEC13)	Más de 6	4	Muy alta				
				5 a 6	3	Alta				
				3 a 4	2	Media				
				1 a 2	1	Baja				
				Ninguno	0	Muy baja				
			Distancia de las áreas de potrero con respecto al río (VEC14)	No aplica		NA				
				No aplica		NA				
				Más de 43	0	Muy baja				
				32 a 42,9	1	Baja				
		21 a 31,9		2	Media					
		Biofísico	Porcentaje de pendiente predominante en la franja ribereña de la parte alta de la subcuenca (VEC15)	10 a 20,9	3	Alta	4	3	4	3,67
				Menos de 10	4	Muy Alta				
				Más de 40 (Muy escarpado)	4	Muy alta				
				28 a 39,9 (Fuertemente inclinado)	3	Alta				
				16 a 27,9 (Inclinado)	2	Media				
				4 a 15,9 (Ligeramente inclinado)	1	Baja				
		Contaminación al río	Cantidad de desechos sólidos y líquidos generados en lb/día/casas ubicadas a 100 m de distancia al río (VEC16)	Menos de 4 (Plano)	0	Muy baja	2	1	1	1,33
				No aplica		NA				
				Más de 53	4	Muy alta				
				37 a 52,9	3	Alta				
				21 a 36,9	2	Media				
Evidencia de basuras y residuos sólidos en el río (VEC17)	5 a 20,9		1	Baja						
	Menos de 5		0	Muy baja						
	No aplica			NA						
	No aplica			NA						
	Sin evidencia		0	Muy baja						
Áreas de las nacientes	Porcentaje de áreas intervenida por el hombre en un rango de 200 m (VEC18)	Muy poca	1	Baja	1	1	1	1,00		
		Poca	2	Media						
		Regular	3	Alta						
		Mucha	4	Muy alta						
		Más de 83	4	Muy alta						
62 a 82,9	3	Alta								
41 a 61,9	2	Media								
20 a 40,9	1	Baja								
Menos de 20	0	Muy baja								
No aplica		NA								

Anexo 6. Valoración de la vulnerabilidad económica (VEN)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Indicadores validados			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	ECONÓMICA	Capacidad económica	Ingreso promedio mensual en colonos de los productores y/o pobladores establecidos en la parte alta de la subcuenca (VEN1)	No aplica		NA	2	3	3	2,67
				Más de 380003	0	Muy baja				
				275002 a 380002,9	1	Baja				
				170001 a 275001,9	2	Media				
				65000 a 170000,9	3	Alta				
Menos de 65000	4	Muy alta								

		Fuentes de empleo	Porcentaje de la población dedicada a las actividades agropecuarias dentro de los 100 m de distancia al río (VEN2)	Más de 73	4	Muy alta	1	2	1	1,33
				52 a 72,9	3	Alta				
				31 a 51,9	2	Media				
				10 a 30,9	1	Baja				
				Menos de 10	0	Muy baja				
				No aplica		NA				
		Instrumentos económicos	Accesibilidad a incentivos económicos que motivan la conservación y manejo sostenible del recurso hídrico en la parte alta de la subcuenca (VEN3)	No aplica		NA	3	3	3	3,00
				De fácil acceso	0	Muy baja				
				Acceso al PSA	1	Baja				
				Poco accesible	2	Media				
				Acceso restringido	3	Alta				
				No accesible	4	Muy alta				
		Desempleo	Porcentaje de la población desempleada de la parte alta de la subcuenca (VEN4)	Más de 68	4	Muy alta	1	1	1	1,00
				47 a 67,9	3	Alta				
				26 a 46,9	2	Media				
				5 a 25,9	1	Baja				
				Menos de 5	0	Muy baja				
				No aplica		NA				
		Dependencia económica de actividades agropecuaria por familia	Número de actividades agropecuarias por familia en la parte alta de la subcuenca (VEN5)	Más de 3	4	Muy alta	2	1	1	1,33
				3	3	Alta				
2	2			Media						
1	1			Baja						
Ninguna	0			Muy baja						
No aplica				NA						

Anexo 7. Valoración de la vulnerabilidad social (VS)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Validación de indicadores			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	SOCIAL	Instituciones y organizaciones comunales	Número de Inst. y organizaciones vinculadas a la protección y manejo adecuado de la franja ribereña y/o parte alta de la subcuenca (VS1)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 3	0	Muy baja				
				3	1	Baja				
				2	2	Media				
				1	3	Alta				
				Ninguna	4	Muy alta				
		Población de la ciudad de Siquirres	Porcentaje de la población de Siquirres enferma a causa del agua para consumo humano abastecido por AyA durante los últimos 5 años (VS2)	Más del 53	4	Muy alta	2	2	2	2,00
				37 a 52,9	3	Alta				
				21 a 36,9	2	Media				
				5 a 20,9	1	Baja				
				Menos de 5	0	Muy baja				
				No aplica		NA				
		Participación de productores	Porcentaje de productores que han participado en talleres de cambio de uso del suelo, protección de la franja ribereña y conservación de las nacientes (VS4)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más del 83	0	Muy baja				
				57 a 82,9	1	Baja				
				31 a 56,9	2	media				
				5 a 30,9	3	Alta				
				Menos de 5	4	Muy alta				
		Apoyo de la sociedad civil en proyectos comunales de protección	Número de proyectos ambientales ejecutados durante los últimos 5 años en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres (VS5)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 3	0	Muy baja				
3	1			Baja						
2	2			media						
1	3			Alta						
Ninguno	4			Muy alta						
Salud	Porcentaje de menores de 10 años con enfermedades	Más del 53	4	Muy alta	2	2	2	2,00		
		37 a 52,9	3	Alta						
		21 a 36,9	2	Media						

			gastrointestinales en la ciudad de Siquirres en los últimos 5 años (VS6)	5 a 20,9	1	Baja	4	4	4	4,00
				Menos de 5	0	Muy baja				
				No aplica		NA				
		Organización social	Número de organizaciones civiles, comunitarias y asociaciones de productores vinculados a la protección del río Siquirres (VS7)	No aplica		NA				
				Más de 3	0	Muy baja				
				3	1	Baja				
				2	2	media				
				1	3	Alta				
				Ninguno	4	Muy alta				
		Servicios públicos	Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca con exceso a los servicios básicos (VS8)	No aplica		NA				
				Más del 83	0	Muy baja				
				57 a 82,9	1	Baja				
				31 a 56,9	2	media				
				5 a 30,9	3	Alta				
				Menos de 5	4	Muy alta				

Anexo 8. Valoración de la vulnerabilidad educativa (VED)

Zona de protección aparente	Tipo de vulnerabilidad a la contaminación	Variables respuestas	Indicadores	Ponderación de las variables	Valoración	Caracterización de la vulnerabilidad	Validación de indicadores			Valoración del promedio
							MAG	Ministerio de Educación	Verificación de campo	
Zona I	EDUCATIVA	Talleres educativos	Número de talleres realizados en los últimos 5 años a pobladores en tema de protección y manejo de las fuentes de agua, nacientes y áreas de recarga (VED1)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 9	0	Muy baja				
				7 a 9	1	Baja				
				4 a 6	2	Media				
				1 a 3	3	Alta				
				Ninguno	4	Muy alta				
		Educación ambiental orientada a productores y comunitarios	Número de programas radiales o escritos por año orientados a la protección y manejo de la subcuenca del río Siquirres (VED2)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 3	0	Muy baja				
				3	1	Baja				
				2	2	Media				
				1	3	Alta				
				Ninguno	4	Muy alta				
		Educación orientada a la prevención y mitigación de la contaminación del río Siquirres	Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca que han sido capacitadas en estos temas (VED3)	No aplica		NA	4	4	4	4,00
				Más de 88	0	Muy baja				
				62 a 87,9	1	Baja				
				36 a 61,9	2	Media				
				10 a 35,9	3	Alta				
				Menos de 10	4	Muy alta				
		Escolaridad	Porcentaje de analfabetismo en la parte alta de la subcuenca (VED4)	Más de 53	4	Muy alta	0	0	0	0,00
				37 a 52,9	3	Alta				
21 a 36,9	2			Media						
5 a 20,9	1			Baja						
Menos de 5	0			Muy baja						
No aplica				NA						

Anexo 9. PARÁMETROS DE GUIA A CONSIDERAR PARA VALIDAR Y VALORAR LOS INDICADORES DE VULNERABILIDAD GLOBAL A LA CONTAMINACION DE LA ZONA I

Indicadores Físicos (VF):

Número de casas ubicadas dentro de la franja de los 100 m a ambos lado del río:

- ⇒ Se contarán las casas que se encuentran dentro de una franja horizontal de 100 m de distancia a ambos lado del río Siquirres, iniciando a partir de los 200 m agua abajo de la toma de AyA hasta las nacientes y ojos de agua.
- ⇒ Si la cantidad sobrepasa el número de las 40 casas, se considera una vulnerabilidad alta con valoración (4).

Número de viviendas sin letrinas y/o tanques sépticos dentro de los 100 m al río:

- ⇒ Del total de casas, se verificará el número de casas que cuentan con letrinas o tanques sépticos.
- ⇒ Si el número sobrepasa la cantidad de 7 se considerará de muy alta vulnerabilidad a la contaminación.

Porcentaje de letrinas y/o fosa séptica construidas con materiales adecuados:

- ⇒ De las casas que poseen letrinas y/o fosas sépticas verificar las condiciones de construcciones, por ejemplo:
 1. Si la fosa séptica cuenta con dos compartimientos de concreto (uno de excreta y otro de orina) y un dispositivo de ventilación. Además, si cuenta con pozos de oxidación, sedimentación o absorción o si manejan los desechos a través de una abonera. Se anotar la cantidad _____. Se considera como una construcción ideal:
 2. Si la fosa séptica cuenta con dos compartimientos de concreto (uno de excreta y otro de orina) y un dispositivo de ventilación. Además, si poseen filtros subterráneos con cubierta impermeable. Anotar la cantidad _____. Se considera de buena construcción.
 3. Si la fosa séptica cuenta con 2 bultos o moldes de cemento y filtros subterráneos es decir una capa de gravas o piedras trituradas mas una capa de arena y una cubierta impermeable de polietileno. Anotar la cantidad _____. Se considera de buena a regular construcción.
 4. Si la fosa séptica cuenta únicamente con el hoyo sin protección al mismo. Anotar la cantidad _____. Se considera de mala construcción y con peligro parcial a la contaminación del río.
 5. Sin fosa séptica. Anotar la cantidad _____. Se considera como un peligro potencial a la contaminación del río y a los mantos friáticos o aguas subterráneas.
- ⇒ Una vez determinada la cantidad de fosas sépticas según el tipo de material de construcción, se procederá a determinar el % de letrinas y/o fosa séptica construidas con materiales adecuados. Para esto, se sumará la cantidad de las primeras tres condiciones de construcciones, y en base a la sumatoria se derivará el % para su posterior valoración en el formato.

Porcentaje de casas con sistema de alcantarillado de aguas negras y residuales:

- ⇒ Identificar la cantidad de casas que cuentan con sistema de alcantarillados.
- ⇒ De la cantidad de casas, se determinará el %. Por ejemplo, si existen 120 casas y de esas casas solo 105 poseen alcantarillados de aguas negras o servidas entonces el % será calculado de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll} 120 \text{ casas} & 100\% \\ 105 \text{ casas} & X = 105 \text{ casas} \times 100\% / 120 \text{ casas} \\ & = 87,5\% \end{array}$$

Finalmente se comparará el % calculado con la ponderación del indicador de la variable y de esa manera se establecerá su valoración en el formato.

Número de basureros ilegales existente en la parte alta de la subcuenca:

- ⇒ Se recorrerá desde los 200 m agua abajo de la toma de AyA hasta las nacientes y ojos de agua con el propósito de determinar la cantidad de basureros ilegales existente. Anotar la cantidad _____ y de esa manera establecer su valoración.

Distancia del vertedero municipal a la parte alta de la subcuenca:

- ⇒ Se considera la parte alta de la subcuenca, el área que parte de los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia las nacientes y ojos de agua donde se localizan los poblados del Coco, Moravia y Guayacán.
- ⇒ Si el vertedero se encuentra en una zona de no influencia, es decir, en la parte baja de la subcuenca sin ninguna posibilidad de contaminación a la toma de agua de AyA por condiciones geomorfológicas, entonces

su ponderación será No Aplica (NA) y se considerará como una valoración nula que será igual a cero. De lo contrario se establecerá su valoración a través de las distancias ponderadas.

Distancias en m de las fábricas al río Siquirres:

- ⇒ Se verificará la distancia de las fábricas desde 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia la parte alta de la subcuenca (Coco, Moravia y Guayacán). En caso de ausencia de fábricas la valoración será No Aplica (NA).

Distancia del mercado municipal a la toma de agua de AyA:

- ⇒ Se considerará la distancia medida desde el mercado municipal de Siquirres hasta la toma de agua de AyA y según la distancia calculada se valorará el indicador en el formato.

Número de talleres dentro de los 100 m al río:

- ⇒ Se contarán los talleres existentes de carpintería, automotrices y de pinturas dentro de la franja de los 100 m de distancia al río, partiendo desde los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia la parte alta de la subcuenca.

Número de gasolineras ubicadas a 150 m al río:

- ⇒ Se contarán las gasolineras que se encuentran desde los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia la parte alta de la subcuenca y según el número de gasolinera se valorará el indicador.

Distancia en m entre el río y la carretera principal asfaltada:

- ⇒ Verificar la distancia de la carretera asfaltada con respecto al río Siquirres, a partir de los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia la parte alta de la subcuenca. Según la distancia se procederá a valorar el indicador.

Distancia en m de las farmacias y clínicas con respecto al río:

- ⇒ Se verificará la distancia de las farmacias o clínicas con respecto al río Siquirres desde los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia la parte alta de la subcuenca. En caso de ausencia de farmacias y clínicas se establecerá la valoración No Aplica (NA).

Cantidad de pequeñas industrias minera (lavado o extracción de oro) dentro de los 150 m al río:

- ⇒ Se contarán las pequeñas industrias mineras presentes desde los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia las nacientes y ojos de agua.

Porcentaje de casas que vierten sus aguas residuales o servidas al río:

- ⇒ Contar el número casas que vierten sus aguas residuales al río o al aire libre y así establecer el % con respecto al total de casas existentes. Las casas a contar inician a partir de los 200 m agua abajo de la toma de AyA hacia las nacientes y ojos de agua.

Número de pasadas del tren de aseo por semana:

- ⇒ A través de pregunta directa a los pobladores de la parte alta de la subcuenca (pobladores del Coco, Moravia y Guayacán) se deberá conocer el número de pasadas del tren de aseo por semana, y así establecer su valoración.

Indicadores Político-Institucionales (VP-I):

Número de proyectos y programas ejecutados por año:

- ⇒ Para establecer la valoración del indicador, se deberá visitar la municipalidad de Siquirres. A través de una audiencia con el señor Alcalde, averiguar si existen o han existidos proyectos y/o programas ambientales de protección, administración y manejo en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres por año.
- ⇒ En caso positivo, averiguar con el responsable de planificación o el secretario municipal sobre las fuentes del financiamiento, para constatar la veracidad de los proyectos y programas ambientales por año destinados a la protección de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres.
- ⇒ De igual manera averiguar con la población de la parte alta de la subcuenca si existen los proyectos o programas ambientales de protección al río Siquirres por parte de la municipalidad y así valorar el indicador a través de una triangulación en la averiguación de la información.

Número de proyectos y programas ejecutados por año:

- ⇒ Se deberá consultar al MAG, ministerio de Salud, MINAE, AyA, ONG's, empresas privadas y organismos de la sociedad civil, entre otros, sobre el número de proyectos y/o programas ambientales ejecutados por año en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres.
- ⇒ Así mismo, se deberá constatar con la población de la parte alta de la subcuenca sobre la existencia de los proyectos y/o programas de protección al río Siquirres por parte de las instituciones mencionadas y de esa forma establecer su valoración del indicador.

Porcentaje de productores y comunitarios que participan en la protección del río, nacientes, ojos de agua, pozos y áreas de recargas:

- ⇒ Durante el recorrido en la parte alta de la subcuenca, deberán conocer la cantidad de productores que participan en la protección de la franja ribereña, nacientes, ojos de agua y áreas de recarga y así como la cantidad total de productores y comunitarios existentes. Y de esa manera calcular el % y establecer la valoración del indicador.
- ⇒ Es indispensable, conocer la cantidad de habitantes que viven en la parte alta de la subcuenca.
- ⇒ Nota: la protección se refiere a que los productores y pobladores realizan prácticas o actividades que no contaminan el río, nacientes, ojos de agua, pozos y áreas de recarga. Otro ejemplo de protección se da; cuando los productores protegen los bosques en la ribera del río, en las nacientes y ojos de agua, o cuando siembran arboles y acercan las áreas colindantes a los pozos con el propósito de impedir la entrada de animales.

Porcentaje de la población que reconoce a sus líderes comunitarios y/o productores:

- ⇒ Durante el recorrido deberá indagar si existen dirigentes (líderes) que la población de la parte alta de la subcuenca los reconoce o los avala en cualquier gestión ante la municipalidad o cualquier institución.
- ⇒ Igualmente averiguar su existen productores organizados o constituido a través de juntas directivas y si a través de dichas junta, gestionan proyectos o programas que vayan a beneficiar a pobladores de la parte alta de la subcuenca. En el caso de existir una junta de productores preguntar la cantidad de miembros que la conforman y de esta manera poder tener una idea del % de productores que participan o reconocen sus líderes.

Porcentaje de la población que considera eficiente la fiscalización de las instituciones nacionales y cantonales:

- ⇒ A través de un sondeo o pregunta directa a la población de la parte alta de la subcuenca, averiguar si existen inspecciones o vigilancias de parte de la municipalidad, AyA, MAG, MINAE, ministerio de Salud, sociedad civil, entre otros., sobre acciones negativas a la protección del río. Y de esta manera determinar el % de la población que consideran la existencia de una fiscalización y/o vigilancia en la protección al río, nacientes, ojos de agua, áreas de recargas y pozos.

Apreciación en la aplicación de las leyes:

- ⇒ La valoración del indicador tiene que ver con el conocimiento que tiene la población de la parte alta de la subcuenca sobre el conocimiento de la Ley de aguas (No. 276) y Ley Forestal (No.7575) correspondiente a la protección de la franja ribereña, nacientes, áreas de recarga y áreas protegidas.
- ⇒ Y de esa forma preguntar, la apreciación en el cumplimiento y aplicación de las leyes por parte del MINEA en la protección de la franja ribereña, es decir, si cumplen con el mandato de proteger la franja de los 50 m a ambos lado del río en áreas con pendientes mayores de 30%. Además, sí cumplen con la protección de las nacientes dejando un mínimo de 100 m de radio horizontal (Ley forestal No. 7575).

Porcentaje de la población que conocen las leyes que tipifican la protección y manejo adecuado de las nacientes y áreas de recargas:

- ⇒ Se debe conocer la cantidad de población de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres que conocen o han recibido charlas de la Ley de aguas (No. 276) y Ley forestal (No. 7575), específicamente sobre las normativas de protección de las fuentes de aguas, los bosques y áreas protegidas.
- ⇒ De esa cantidad de población que conocen las leyes, determinar el % y así valorar el indicador.

Número de planes elaborados por las instituciones gubernamentales, ONG's y/o gobierno municipal:

- ⇒ Para valorar el indicador, se deberá conocer si existe por parte de las instituciones del Cantón de Siquirres planes de prevención y de mitigación encaminado a evitar la contaminación del río y nacientes en un futuro.

- ⇒ Para esto, se deberá consultar a la municipalidad, AyA, MAG, MINAE, ministerio de Salud, sociedad Civil, entre otros, sobre la existencia de dichos planes o programas.

Número de actividades coordinadas por año:

- ⇒ Deberán consultar a la municipalidad, AyA, MAG, MINAE, ministerio de Salud, sociedad civil, entre otros., sobre la cantidades de coordinaciones interinstitucionales por año en que se abordan temas de protección al río Siquirres ante la contaminación.
- ⇒ En caso de existir reuniones de coordinación interinstitucional por año, se deberá conocer la cantidad de reuniones por año y las instituciones involucradas y de esta manera valorar el indicador.

Indicadores Ecológicos (VEC):

Porcentaje de productores que hacen un buen manejo en la aplicación de agroquímicos:

- ⇒ Del total de productores existente en la parte alta de la subcuenca, se deberá determinar la cantidad que utilizan agroquímicos y de ese total conocer cuales productores han recibido capacitaciones sobre el manejo y aplicación adecuada de agroquímicos.
- ⇒ Una vez determinada la cantidad de productores que hacen un manejo adecuado de los agroquímicos, se procederá a determinar el % y en base al cálculo se valorará el indicador.

Número de tiendas de agroquímicos existentes en la ciudad de Siquirres:

- ⇒ Se requiere conocer la cantidad de tiendas de agroquímicos existentes en la ciudad de Siquirres y sus alrededores y según la cantidad valorar el indicador.

Tipo de erosión predominante:

- ⇒ Para valorar el indicador es necesario tener en cuenta las siguientes concepciones:
 1. Para **cárcavas grandes y profundas** (se observa en el terrenos grandes zanjas o hoyos en dirección a la pendiente muchas veces con presencia de material parental o roca). Durante un temporal o aguacero produce gran cantidad de sedimentos o lodo que fluye aguas abajo y por lo general en estas áreas existe una ausencia casi total de la vegetación en todo su alrededor).
 2. **Surcos o cárcavas superficiales**: parecido al anterior con la diferencias que son zanjas pequeñas donde se aprecia capas de suelo rojizos y poca vegetación a su alrededor).
 3. **Laminar o surcos moderados**: se aprecia las raíces de los grandes árboles y canalillos en el terreno por donde circula el agua pasado un aguacero, se aprecia poca tierra negra. Este tipo de erosión es común en áreas de potrero con pendientes pronunciadas.
 4. **Sin evidencia de erosión**: se dice que no hay evidencia de erosión si el terreno está con mucha vegetación y si existe una combinación de cultivos y bosques con suelos fértiles.
- ⇒ Nota: el indicador se valorará en las áreas de agricultura y áreas de potrero, otra manera, de considerar el tipo de erosión es preguntándole al productor del nivel de fertilidad del suelo o profundidad de la capa de tierra negra.

Propiedades texturales superficial y sub-superficial predominante en los 50 m de distancia al río:

- ⇒ Se determinará de la siguiente manera:
 1. **Arenoso** (presencia y sensación a arenas medias a finas) y **Franco arenoso** (en seco es polvoroso con sensación a arena fina y en húmedo tiene una sensación a talco y arenitas).
 2. **Franco arenoso** (en seco es polvoroso con sensación a arena y en húmedo tiene una sensación a talco y arenitas) y **Arcillo arenoso** (es un suelo pegajoso con presencia de arenas finas).
 3. **Franco limoso** (es un suelo con sensación a talco y en seco es polvoriento) y **Arcilloso limoso** (en húmedo es un suelo pegajoso parecido al barro con sensación a talco).
 4. **Arcilloso limoso** (es un suelo pegajoso parecido al barro y sensación a talco) y **Arcilloso** (es un suelo muy adherente, pegajoso o barroso y este suelo se puede moldeado fácilmente).
 5. **Arcilloso** (es un suelo muy adherente, pegajoso o barroso y puede moldear fácilmente).
- ⇒ Se recomienda conversar con el productor para conocer el calificativo local del suelo.

Porcentaje de área deforestada en los 50 m de distancia al río:

- ⇒ Se elegirá tres áreas de 50 x 50 metros a ambos lado del río y al ojo se determinara el % de vegetación existente en cada área establecida. Por ejemplo, si vemos que existe abundante vegetación entonces estimamos un % alto y si vemos que casi no se aprecia vegetación entonces le damos una puntuación baja.

- ⇒ La primera área a seleccionar será cerca de la toma de agua de AyA, la segunda cerca de cualquier comunidad ya sea Moravia o Cocos y la tercera en la parte alta de la subcuenca o específicamente en la finca del señor Bryan o sobre en la comunidad Guayacán.

Porcentaje de productores con prácticas agrícolas en la franja ribereña (50 m de distancia al río):

- ⇒ Del total de productores determinar cuántos realizan prácticas agrícolas en la franja ribereña o a una distancia de 50 m a ambos lado del río Siquirres. Y según el número de productores que realizan prácticas agrícolas en esta franja establecer el % y así valorar del indicador.

Porcentaje de productores que utilizan agroquímicos:

- ⇒ Del total de productores se deberá determinar la cantidad de productores que utilizan agroquímicos en sus cultivos y en las áreas de los potreros y así calcular el %.

Tipos de cultivos con uso de agroquímicos:

- ⇒ Se deberá conocer el tipo de cultivo predominante y de esta manera establecer su valoración: por ejemplo si los productores se dedican a las **Hortalizas** (papa, zanahoria, remolacha, repollo, tomate, lechuga, entre otros) y usan agroquímicos darle la valoración (4), si se dedican al **cultivo anual** (maíz, frijol, arroz, yuca) y usan agroquímicos darle la valoración (3), si se dedican al **cultivo semiperenne** (banano, plátano, piña, naranja, caña de azúcar, entre otros) y usan agroquímicos darle la valoración (2), si se dedican al **cultivo perenne** (Cítricos, café, aguacate, entre otros) y usa agroquímicos darle la valoración (1) y si no hay agricultura predominante en la parte alta de la subcuenca darle la mínima valoración (0).

Cantidad de aplicaciones de agroquímicos por año:

- ⇒ A través de preguntas directas o sondeo con los agricultores se deberá conocer la cantidad de aplicaciones de agroquímicos por año en los cultivos y áreas de potreros.

Tipo de riego utilizado en cultivos ubicados dentro de la franja ribereña:

- ⇒ Verificar el tipo de riego utilizado por los productores y en el caso de no aplicar riego su valoración será (0).

Porcentaje de agricultores con prácticas de conservación de suelo y agua:

- ⇒ Del total de productores se deberá conocer cuántos realizan prácticas de conservación de suelo y agua y de esa manera, se determinar el % de agricultores con prácticas de conservación de suelo y agua.

Distancia en m de las áreas agrícolas con respecto al río:

- ⇒ Verificar en campo la distancia de los siembras o cultivos con respecto al río Siquirres y de esa manera establecer su valoración del indicador.

Número de porqueriza y gallineros existentes en la franja de los 100 m al río:

- ⇒ En toda la parte alta de la subcuenca se deberá conocer el número de porqueriza y gallineros existentes dentro de los 100 m de distancia horizontal verificada a ambos lado del río.

Distancia de las áreas de potrero con respecto al río:

- ⇒ En las áreas de potreros se deberá verificar la distancia del bosque que dejan los productores con respecto al río. Por ejemplo: Si dejan más de 50 m de distancia al río su valoración (1), si dejan entre 35 a 50 m su valoración (2), si dejan entre 20 a 34,9 m su valoración (3), si dejan entre 5 a 19,9 su valoración (4) y si dejan bosque a una distancia de 5 m o menos su valoración será (5).

Porcentaje de pendiente predominante en la franja ribereña de la parte alta de la subcuenca:

- ⇒ Se verificará la pendiente predominante en la franja ribereña desde la distancia de los 50 m al río y en base a la pendiente predominante se valorará el indicador.

Cantidad de desechos sólidos y líquidos generados en lb/día/casas ubicadas a 100 m de distancia al río:

- ⇒ A través de un sondeo o pregunta directa se estipulará la cantidad de basura doméstica producida en cada casa. Se sondeará en 10 casas la cantidad de desecho o basura doméstica generada, para posteriormente determinar el promedio en libras por casas generada y en base al cálculo se valorará el indicador.
- ⇒ La pregunta a establecer será. ¿Qué cantidad de desecho o basura genera en un día su casa? Y se deberá estimar la cantidad en libras como se describió anteriormente.

Evidencia de basuras y residuos sólidos en el río.

⇒ De manera aleatoria se seleccionarán sitios donde verificaran la existencia de basuras o desechos en el río y de esta manera valorar el indicador en el formato.

Porcentaje de áreas intervenida por el hombre en un rango de 200 m:

⇒ Se visitarán y georeferenciarán las nacientes, ojos de agua, entre otros, que pertenezcan a la subcuenca del río Siquirres, allí se verificará el % de área intervenida por el hombre en un radio de 100 m. Se entiende por área intervenida (el % de áreas deforestada dentro del perímetro de los 100 m a su alrededor). Su verificación y posterior valoración consiste en realizar un recorrido alrededor de los 100 m de distancia horizontal, y proceder a evaluar el % según lo observado del área deforestada.

Indicadores Económicos (VEN):

Ingreso promedio mensual en colones de los productores y/o pobladores establecidos en la parte alta de la subcuenca:

⇒ Con un total de 15 personas entrevistadas sobre la cantidad de ingresos en colones percibidos por mes, se determinara la cantidad de ingreso promedio anual y en base al cálculo se valorará el indicar.

Porcentaje de la población dedicada a las actividades agropecuarias dentro de los 100 m de distancia al río:

⇒ De la población total de la parte alta de la subcuenca, determinar la población dedicada a las actividades agrícolas o pecuarias dentro de los 100 m de distancia al río y de esa manera calcular el %.

Accesibilidad a incentivos económicos que motivan la conservación y manejo sostenible del recurso hídrico en la parte alta de la subcuenca:

⇒ Entrevistar a pobladores de la parte alta de la subcuenca y a funcionarios de instituciones con el objetivo de conocer el grado de accesibilidad a los incentivos económicos por conservar las fuentes de agua, la franja ribereña y áreas de recarga.

Porcentaje de la población desempleada de la parte alta de la subcuenca:

⇒ Del total de la población de la parte alta, determinar la población desempleada y así calcular el % que representan con ese % proceder a valorar el indicador.

Número de actividades agropecuarias por familia en la parte alta de la subcuenca:

⇒ Entrevistar a 15 familias con el propósito de conocer el número de actividades agropecuarias. Por ejemplo, si encontramos una familia que tiene ganadería menor y cultivo de hortalizas, esa familia posee dos actividades agropecuarias que le generan ingreso por tanto su valoración será (2) clasificándose como vulnerabilidad media.

Indicadores Sociales (VS):

Número de Instituciones y organizaciones vinculadas a la protección, administración y manejo adecuado de la franja ribereña y/o parte alta de la subcuenca:

⇒ Se deber averiguar con la población de la parte alta de la subcuenca si existen Instituciones y Organismos dedicados a la protección del río Siquirres a través del manejo adecuado de la franja ribereña, las nacientes, ojos de agua y área de recarga.

Porcentaje de la población de Siquirres enferma a causa del agua para consumo humano abastecido por AyA durante los últimos 5 años:

⇒ Para este indicador se visitará el ministerio de Salud y a través del registro por medio de una entrevista con el responsable de la dirección regional se deberá conocer el % de casos enfermos a causa del agua para consumo humano proveniente de la tubería. Y de esta forma valorar el indicador.

Porcentaje de productores que han participado en talleres de cambio de uso del suelo, protección de la franja ribereña y conservación de las nacientes:

⇒ Del total de productores de la parte alta de la subcuenca se determinará el número de productores que han participado en talleres que aborden el problema que ocasiona el cambio de uso del suelo, y en temas relacionado a la importancia que implica la protección de la franja ribereña, nacientes y áreas de recarga.

Número de proyectos ambientales ejecutados durante los últimos 5 años en la parte alta de la subcuenca del río Siquirres:

⇒ Averiguar con la población el número de proyectos ambientales ejecutados en los últimos 5 años.

Porcentaje de menores de 10 años con enfermedades gastrointestinales en la ciudad de Siquirres en los últimos 5 años:

⇒ Se visitará el ministerio de Salud con el propósito de conocer el % de niños menores de 10 años de la ciudad de Siquirres que han sufrido problemas gastrointestinales en los últimos 5 años.

Número de organizaciones civiles, comunitarias y asociaciones de productores vinculados a la protección del río Siquirres:

⇒ Averiguar la existencia de organizaciones de la sociedad civil, organizaciones comunitarias y asociaciones de productores que están vinculados a la protección de la parte alta de la subcuenca.

Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca con acceso a los servicios básicos:

⇒ Del total de la población de la parte alta se determinará la población con acceso a los servicios básico y de esa manera calcular el %.

Indicadores Educativos (VED):

Número de talleres realizados en los últimos 5 años a pobladores en tema de protección y manejo de las fuentes de agua, nacientes y áreas de recarga:

⇒ Entrevistar a productores de la parte alta de la subcuenca con el propósito de conocer el número de talleres recibidos en los últimos 5 años, sobre temas de protección y manejo de las fuentes de agua, nacientes y áreas de recarga.

Número de programas radiales o escritos por año orientados a la protección y manejo de la subcuenca del río Siquirres:

⇒ A través entrevistas a pobladores, conocer el número de programas radiales o escritos por año orientados a temas de protección y manejo adecuado de la parte alta del río Siquirres.

Porcentaje de la población de la parte alta de la subcuenca que han sido capacitadas en temas ambientales:

⇒ De la población total de la parte alta de la subcuenca determinar la cantidad de población que ha sido capacitadas en temas de prevención y mitigación de la contaminación del río Siquirres y en base a la cantidad proceder a calcular el % y valorar el indicador en el formato de campo establecido.

Porcentaje de analfabetismo en la parte alta de la subcuenca:

⇒ Del total de la población de la parte alta de la subcuenca se deberá conocer la población sin educación primaria y de esa manera determinar el %.

Anexo 10. Formulario utilizado en el sondeo poblacional

Nombre: _____ Número de cedula: _____

Fecha: _____ Edad: _____ Sexo: _____

Barrio o Comunidad: _____

Marque con una X

1. ¿Conoce la situación ambiental de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres?

Si _____ No _____

2. ¿Conoce la situación higiénica-sanitaria de la planta de tratamiento de AyA que le abastece de agua para consumo humano?

Si _____ No _____

3. ¿Usted o alguno de su familia ha tenido problemas de salud o alguna enfermedad a causa de consumir agua proveniente de la tubería?

Si _____ No _____

En caso de Si qué tipo de enfermedades: _____

4. ¿Tiene conocimiento si la municipalidad, el Ministerio de Salud y Seguridad Social, y AyA, realizan con frecuencia análisis a la calidad del agua?

Si _____ No _____

En caso de Si o No. A que se debe su conocimiento o desconocimiento: _____

5. ¿Estaría dispuesto (a) a pagar una tarifa o costo ambiental para contribuir a la conservación y manejo adecuado de la parte alta del río Siquirres en donde nace el agua que usted consume?

Si _____ No _____

6. ¿Sabe usted que los productos químicos usados en la agricultura y la ganadería, así como los desechos sólidos, las basuras y otros desechos que la población deposita, contaminan el agua y pone en peligro su salud?

Si _____ No _____

7. ¿En alguna ocasión ha tenido problemas de mal sabor, color y olor del agua que proviene de la tubería?

Si _____ No _____

8. ¿Sabe si en las escuelas o colegios imparten materiales o charlas relacionadas a la protección y manejo de las aguas?

Si _____ No _____

9. ¿Usted sabe que el agua que consume proviene de la parte alta del río Siquirres

Si _____ No _____

10. ¿Conoce o sabe de ideas de proyectos para mejorar el servicio de agua, o programas que ayuden al manejo, conservación y protección de la parte alta del río Siquirres?

Si _____ No _____

11. ¿Qué recomendaría a la municipalidad y AyA, para mejorar la calidad del agua que usted consume?

Comente: _____

MUCHAS GRACIAS

Anexo 11. Formulario utilizado en el sondeo institucional

Nombre: _____ Institución: _____
Fecha: _____

Preguntas

1. ¿Considera usted que la institución a la que representa debe buscar soluciones integrales a la situación ambiental de la subcuenca del río Siquirres?

Si _____ No _____

En casi de Si o No. Comente brevemente: _____

2. ¿Considera usted que esta institución trabaja en conjunto con otras instituciones en pro de la mejora de la situación ambiental de la parte alta de la subcuenca del río Siquirres?

Si _____ No _____

En casi de Si o No. A que se debe: _____

3. ¿Se debe considerar una visión integral al tema ambiental de la parte alta de la subcuenca?

Si _____ No _____

En casi de Si o No. Porque: _____

4. ¿Considera que la protección, administración y manejo adecuado de los recursos naturales en especial el recurso hídrico de la subcuenca del río Siquirres, es competencia solamente de un sector? Si _____ No _____

Comente brevemente: _____

5. ¿Cuáles son los principales problemas o dificultades que usted considera que influyen negativamente en la degradación ambiental de la parte alta de la subcuenca?

Problemas o dificultades: _____

6. ¿Usted conoce el decreto N° 24785- MIRENEM?

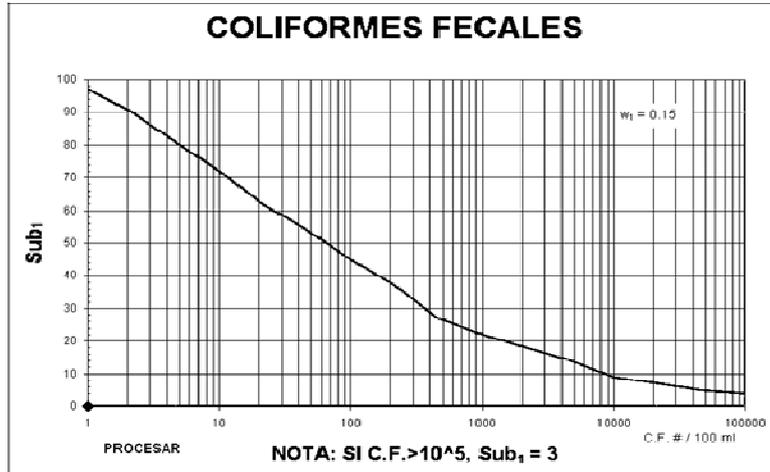
Si _____ No _____

Preguntas abiertas _____

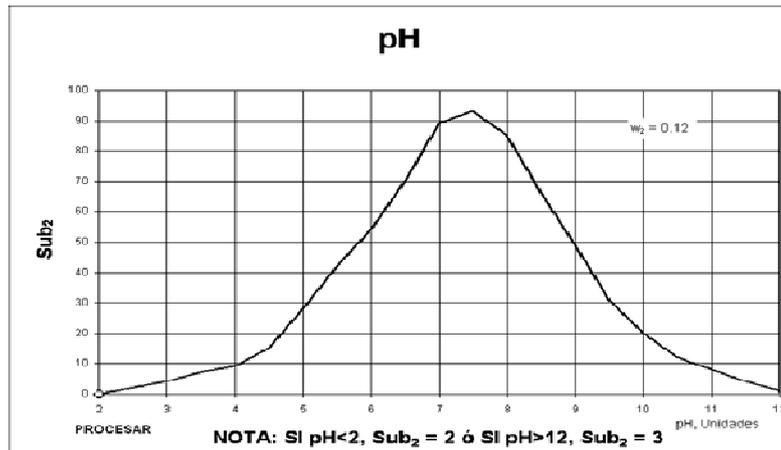
7. ¿Qué tipos de propuestas usted cree que son necesarias para tomar decisiones y acciones que mejoren y detengan el avance de la degradación de los recursos naturales en la parte alta de la subcuenca?

8. ¿Como funcionario de su institución y su experiencia en campaña de protección ambiental, y manejo adecuado de los recursos naturales, como percibe el nivel de interés o participación de la población a dichas iniciativas institucionales?

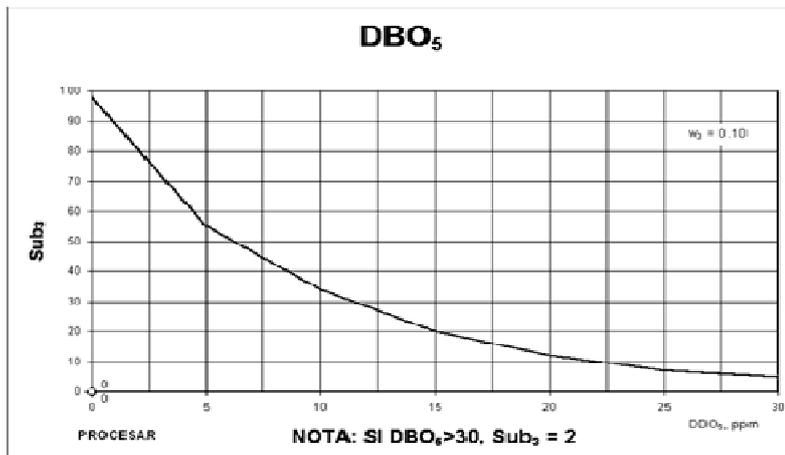
Anexo 12. Gráfica para obtener el sub_i de coliformes fecales



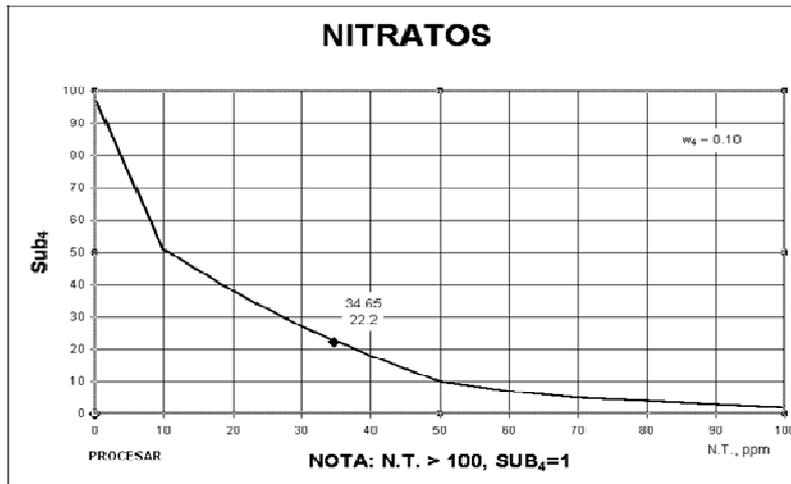
Anexo 13. Gráfica para obtener el sub_i del pH



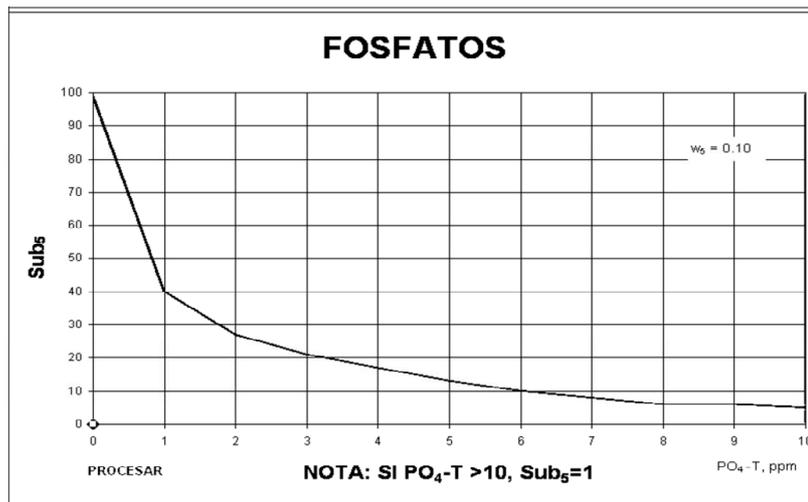
Anexo 14. Gráfica para obtener el sub_i el DBO₅



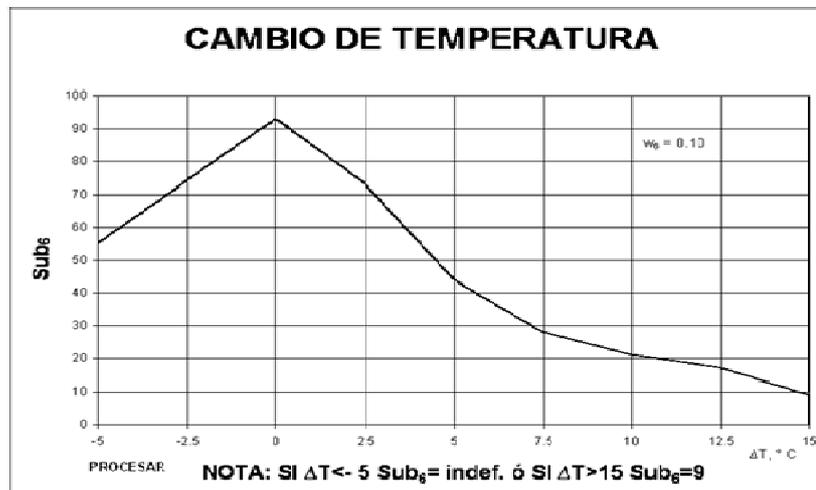
Anexo 15. Gráfica para obtener el sub_4 de nitrato



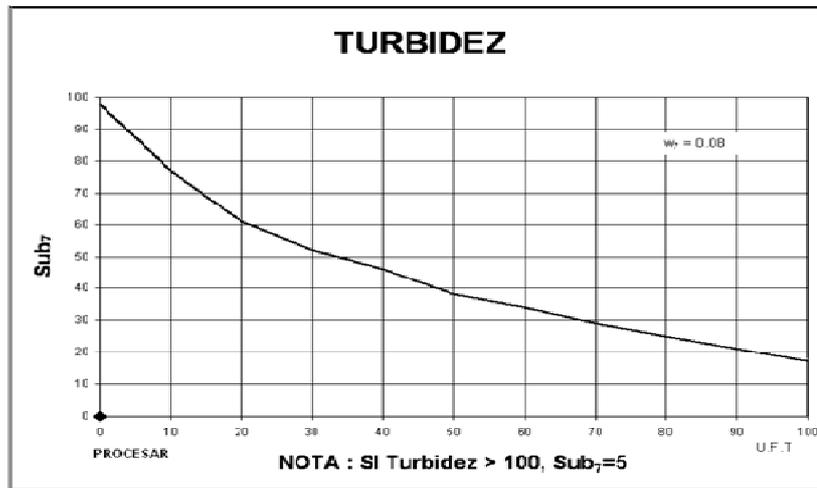
Anexo 16. Gráfica para obtener el sub_5 de fosfato



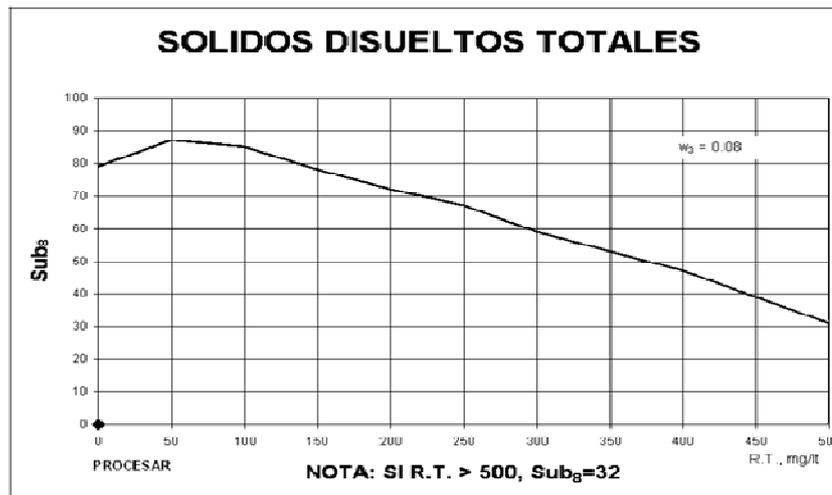
Anexo 17. Gráfica para obtener el sub_6 de cambio de temperatura



Anexo 18. Gráfica para obtener el sub_1 de cambio de turbidez



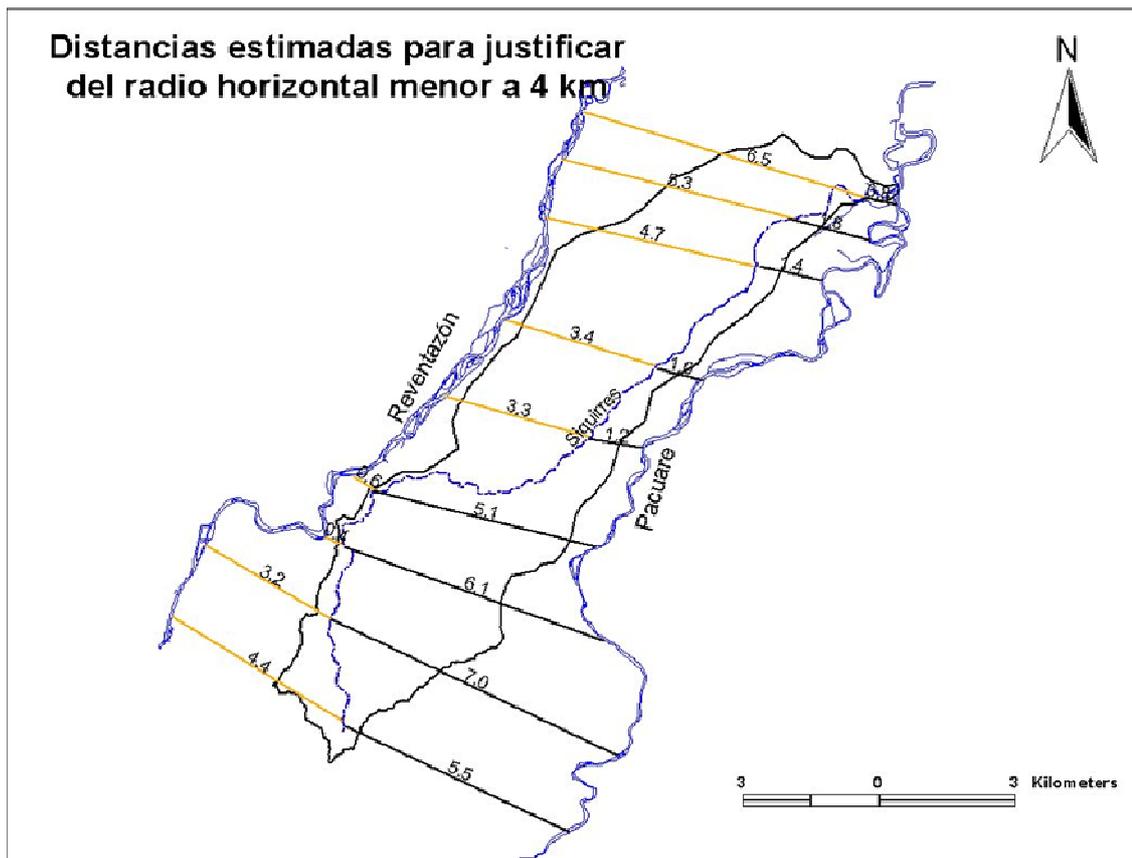
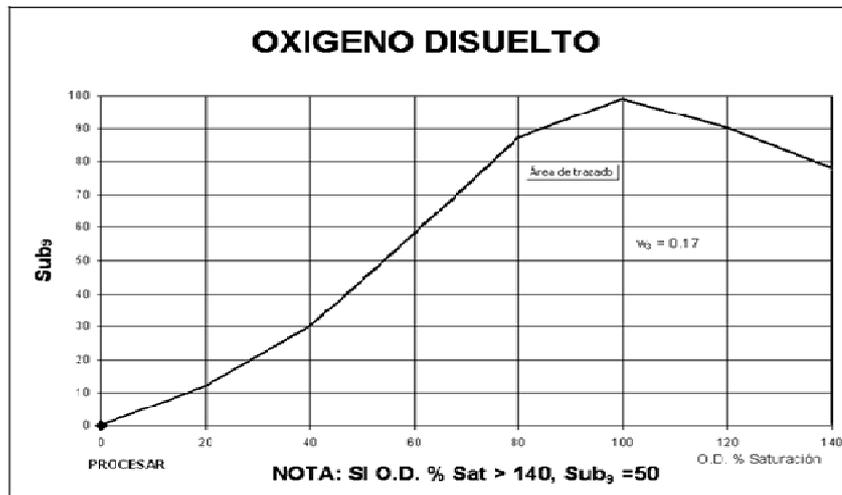
Anexo 19. Gráfica para obtener el sub_2 de cambio de solidos disueltos totales



Anexo 20. Gráfica para obtener el porcentaje de saturación del OD



Anexo 21. Gráfica para obtener el Sub_s de cambio de OD

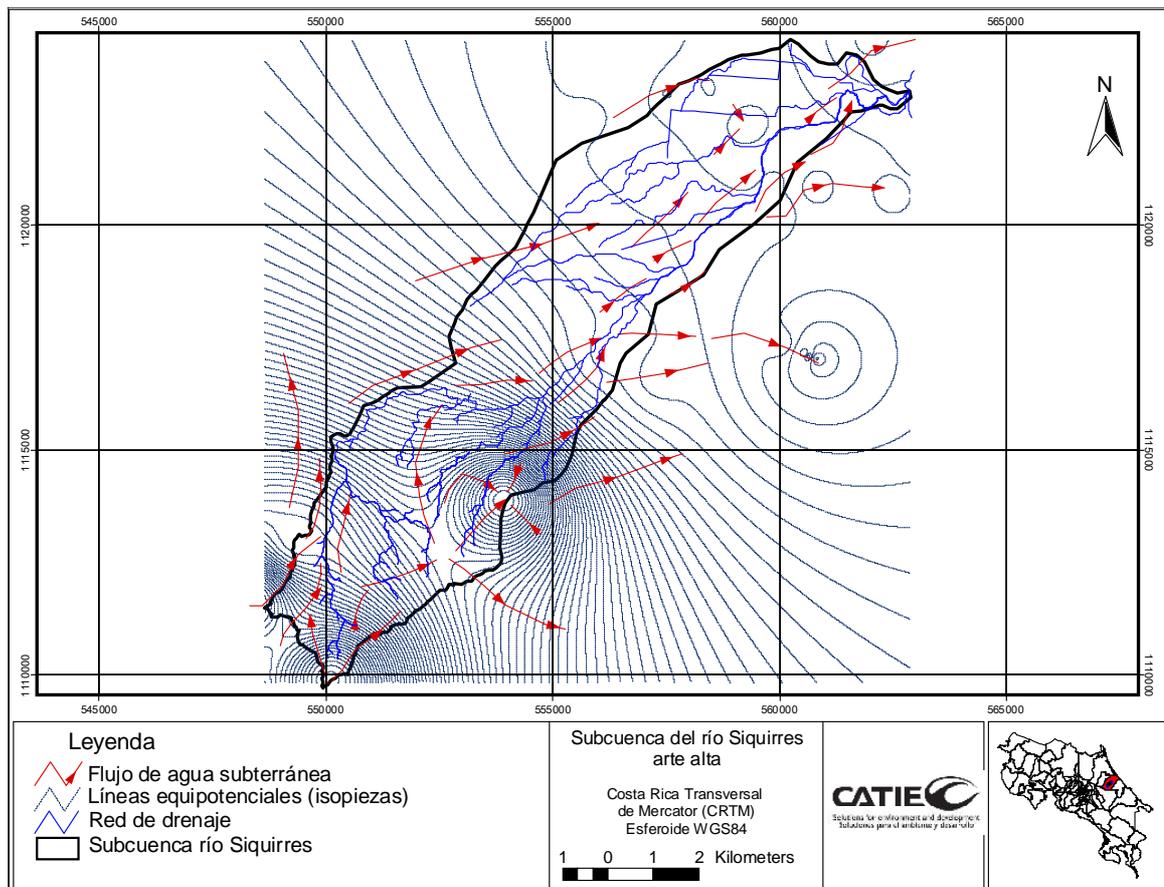


Anexo 22. Distancias medidas del cauce principal del río Siquirres a los ríos Reventazón y Pacuare

Anexo 23. Información de los 41 pozos seleccionados

No.	Cantón	Propietario	Prof. de pozos (m)	Caudal (l/s)	Nivel estático (m)	Uso
1	Siquirres	BANANERA GIGANTE, S.A.	34.00	16.00	3.82	INDUSTRIAL
2	Siquirres	ECOTURISMO S.A.	14.00	Sd	3.95	INDUSTRIAL
3	Siquirres	CORP. DES. AGR. DEL MONTE S.A.	35.00	6.30	8.85	INDUSTRIAL
4	Siquirres	HACIENDA OJO DE AGUA S.A.	30,00	0,60	9,90	ABREVADERO
5	Siquirres	AYA	27.00	3.50	2.80	ABAST. PUBLICO
6	Siquirres	COMUNIDAD	31,00	10,00	3,00	ABAST. PUBLICO
7	Siquirres	AGROIND. PACUARE S.A.	30,00	17,50	3,06	INDUSTRIAL
8	Siquirres	CIA. BANANERA MTE. BLANCO	11,00	3,00	1,50	INDUSTRIAL
9	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE BLANCO	15,00	5,00	3,00	INDUSTRIAL
10	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE BLANCO	14,00	2,50	2,80	INDUSTRIAL
11	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE BLANCO	21,00	7,50	2,76	INDUSTRIAL
12	Siquirres	COBAL CIA BANAN. SAN JOSE	14,00	6,30	6,50	INDUSTRIAL
13	Siquirres	CIA. BANANERA INDIANA	14,00	15,00	1,50	INDUSTRIAL
14	Siquirres	BANANERA SIQUIRRES, S.A.	20,00	16,00	2,10	INDUSTRIAL
15	Siquirres	ASBANA	5.75	0.50	3.80	DOMESTICO
16	Siquirres	CIA. BANANERA COSTA RICA	40,00	10,00	1,90	INDUSTRIAL
17	Siquirres	CIA. BANANERA INDIANA 3	16.50	10,00	3,00	INDUSTRIAL
18	Siquirres	CIA. BAN. DOBLE ALIANZA	45.00	12.58	0,01	INDUSTRIAL
19	Siquirres	MATAS DE C.R. S.A.	14.00	6.31	0,60	AGROINDUSTRIAL
20	Siquirres	CIA. BANAN. LOS LAURELES	20,00	9,45	3,33	INDUSTRIAL
21	Siquirres	CIA. BANANERA CARMEN	72.00	8.20	12.00	INDUSTRIAL
22	Siquirres	CIA. BANANERA CARMEN	39.00	2.60	9.50	INDUSTRIAL
23	Siquirres	SD	16.00	3.78	6.00	DOMESTICO
24	Siquirres	CIA. BANANERA SAM JOSE	20,00	6.50	4.00	INDUSTRIAL
25	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE VERDE	20,00	19.00	3.00	INDUSTRIAL
26	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE VERDE	35.00	8.51	2.40	INDUSTRIAL
27	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE VERDE	12.00	1,26	4.60	INDUSTRIAL
28	Siquirres	RECYPLASY S.A.	84.00	10,40	5.90	AGROINDUSTRIAL
29	Siquirres	RECICLADOS PLASTICOS S.A.	64.00	12.61	5.78	AGROINDUSTRIAL
30	Siquirres	BANANERA DOBLE ALIANZA	45.00	13.00	Sd	INDUSTRIAL
31	Siquirres	AYA COMUNIDAD	35.00	9.50	Sd	ABAST. PUBLICO
32	Siquirres	PROY. AGRICOLAS TROPICALES S.A.	50,00	2.00	Sd	DOMEST-RIEGO
33	Siquirres	CIA. BANANERA LOS LAURELES	30,00	10,00	2.17	INDUSTRIAL
34	Siquirres	CIA. BANANERA MTE. BLANCO	30,00	13.00	Sd	INDUSTRIAL
35	Siquirres	DES. BANANERO LA ESPERANZA	22.00	2.50	Sd	DOMESTICO
36	Siquirres	DES. BANANERO LA ESPERANZA	19.00	12.60	Sd	INDUSTRIAL
37	Siquirres	CIA. BANANERA MONTE VERDE	14.00	3.15	Sd	INDUSTRIAL
38	Siquirres	SODA LU (POZO ARTESIANO)	6.12	Sd	0,48	POZO ARTESANAL
39	Siquirres	POZO PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA	5.40	Sd	0,50	POZO ARTESANAL
40	Siquirres	POZO PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA	5.00	Sd	0,67	POZO ARTESANAL
41	Siquirres	SD	5.00	Sd	0,50	FOSA

Nota: los pozos reconocidos en campo (38, 39, 40 y 41). El resto corresponden a los registrados por SENARA.



Anexo 24. Mapa de isopiezas y direcciones de flujo subterráneos de la subcuenca del río Siquirres