

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y
ENSEÑANZA (CATIE)
PROGRAMA DE ENSEÑANZA
ÁREA DE POSTGRADO**

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA
DEL RÍO REVENTADO, CARTAGO, COSTA RICA,
BAJO EL ENFOQUE DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico de Postgrado y Capacitación del Programa de Enseñanza en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

Magister Scientiae

por

JAVIER GUSTAVO VILLEGAS OSORIO

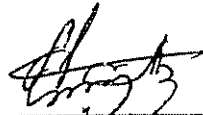
Turrialba, Costa Rica

1995

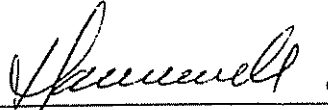
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y de los Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

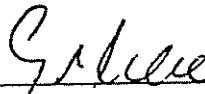
FIRMANTES:



Sergio Velásquez M., M.Sc.
Profesor Consejero



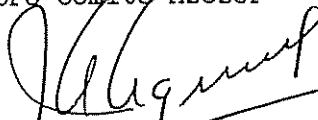
Jorge Faustino, M.Sc.
Miembro Comité Asesor



Gregdrie Leclerc, Ph.D.
Miembro Comité Asesor



Sabine Müller, M.Sc.
Miembro Comité Asesor



Juan Antonio Aguirre, Ph.D.
Jefe, Area de Postgrado



Pedro Ferreira, Ph.D.
Director, Programa de Enseñanza



Javier G. Villegas O.
Candidato

DEDICATORIA

DEDICO ESTA TESIS:

A Dios: A quien todo debemos

A mis padres y
hermanos: Quienes siempre estuvieron pendientes de
mi persona.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar un agradecimiento muy especial por el apoyo y orientación al desarrollo de la tesis a las siguientes personas e instituciones:

- Sergio Velásquez, M.Sc.
- Sabine Müller, M.Sc.
- Jorge Faustino, M.Sc.
- Gregoire Leclerc, Ph.D.
- Pedro Ferreira, Ph.D.

A personas amigas que me acompañaron en las salidas al campo y trabajo en laboratorio:

- Laura Ramírez
- Rolando Portilla
- Carlos Paz
- Ivo Mezinger
- David Williams
- Marvin Quesada
- Nathalie Beaulieu
- Glenn Hyman
- Nelson Arriaza

Al personal de la Biblioteca Orton, Proyecto Cuencas, Postgrado , Laboratorio de Suelos y Centro de Cómputo.

A toda la gente de IICA/GTZ.

A mis compañeros de "Siberia".

A mis paisanos bolivianos.

Al gobierno de Holanda, quien me financió los estudios en CATIE.

Al CATIE.

Al SENARA, departamento de Meteorología del ICE y al departamento de Geografía de la UCR.

A los agricultores de Tierra Blanca.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	x
SUMMARY	xii
1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	5
2. REVISION DE LITERATURA	7
2.1. Agricultura sostenible	7
2.2. Calidad del agua y sostenibilidad	7
2.3. Usos del recurso hídrico	8
2.4. Calidad del agua	8
2.5. Contaminación difusa	9
2.6. La agricultura y la contaminación de las aguas	10
2.7. La cuenca hidrográfica como unidad de ordenamiento y planificación	11
2.8. Manejo de la calidad del agua en la cuenca hidrográfica	12
2.9. SIG y calidad del agua	12
2.10. Indicadores de sostenibilidad	14
2.11. Marco metodológico para la definición de indicadores	15
2.12. Indices de calidad de los recursos naturales	18
2.13. Localización y descripción de la zona de estudio	19
2.13.1. Ubicación	19
2.13.2. Suelos	19
2.13.3. Uso Actual de la Tierra y su relación con el aspecto ambiental	22
2.13.3.1. Bosque y charral	24
2.13.3.2. Horticultura	25
2.13.3.3. Pastizales	28
2.13.3.4. Cultivos perennes	29
2.13.3.5. Materiales de construcción	29
2.13.3.6. Uso urbano	30
2.13.4. Capacidad de Uso y Uso Potencial de la Tierra	30
2.13.5. Represa de Cachi	33
2.13.6. Proyecto de riego	33
2.13.7. Información sobre aspectos relativos al recurso hídrico en el área de estudio.	34

	Página
3. MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1. Material de campo	36
3.2. Selección de los puntos de muestreo	38
3.3. Selección de los indicadores a evaluar	40
3.4. Frecuencia de muestreo	42
3.5. Descripción de los puntos de muestreo	47
3.6. Metodología de análisis	51
3.7. Sistema de información geográfica	52
3.8. Análisis estadístico de los datos	53
3.9. Índices de calidad de agua	56
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1. Descripción general de la cuenca del río Reventado	60
4.2. Resultados del análisis estadístico.	62
4.2.1. pH	64
4.2.2. Temperatura	66
4.2.3. Conductividad eléctrica	67
4.2.4. Turbidez	69
4.2.5. Calcio, magnesio y sodio	71
4.2.6. Potasio	74
4.2.7. Oxígeno disuelto	76
4.2.8. Cloruros	78
4.2.9. Sulfatos	80
4.2.10. Fosfatos	81
4.2.11. Nitratos y amonio	84
4.2.12. Sólidos totales, en suspensión y disueltos	87
4.2.13. Hierro y aluminio	89
4.2.14. Bacterias coliformes	89
4.2.15. Residuos de plaguicidas	90
4.3. Análisis multivariado	90
4.3.1. Análisis discriminante canónico	90
4.3.1.2. Correlación entre las variables canónicas y las características de las áreas de drenaje.	93
4.3.2. Análisis Cluster	95
4.4. Índices de calidad de agua	99
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6. BIBLIOGRAFIA	111
7. ANEXOS	118

LISTA DE CUADROS

Página

1.	Criterios para la selección de indicadores	43
2.	Criterios de calidad de agua para varios usos.	45
3.	Localización de los puntos de muestreo	49
4.	Área y pendiente promedio de las zonas alta, media y baja de la cuenca del Río Reventado60
5.	Resumen del análisis de varianza de los indicadores en los diferentes puntos de muestreo	63
6.	Resumen estadístico del pH de las aguas de la cuenca del río Reventado	65
7.	Resumen estadístico de la temperatura en las aguas de la cuenca del río Reventado	66
8.	Resumen estadístico de la conductividad en las aguas del río Reventado.	68
9.	Resumen estadístico de la turbidez en las aguas del río Reventado (mg/l)	70
10.	Resumen estadístico de calcio en las aguas del río Reventado (mg/l)	72
11.	Resumen estadístico de sodio en las aguas del río Reventado (mg/l)	73
12.	Resumen estadístico de magnesio en las aguas del río Reventado(mg/l).	73
13.	Resumen estadístico de potasio en las aguas del río Reventado(mg/l).	75
14.	Resumen estadístico de oxígeno disuelto en las aguas del río Reventado (mg/l)	77
15.	Resumen estadístico de cloruro en las aguas del río Reventado (mg/l)	79
16.	Resumen estadístico de sulfatos en las aguas del río Reventado (mg/l)	81
17.	Resumen estadístico de la concentración de fosfatos en las aguas del río Reventado (mg/l)	82
18.	Resumen estadístico de la concentración de nitrato en las aguas del río Reventado (mg/l)	84
19.	Resumen estadístico de las concentraciones de amonio en las aguas del río Reventado (mg/l)	85
20.	Resumen estadístico de los contenidos de sólidos disueltos (mg/l) en las aguas del río Reventado.	88
21.	Resumen estadístico de las concentraciones de sólidos en suspensión en las aguas del río Reventado.	88
22.	Correlación entre variables canónicas y características de sitio.	94
23.	Matriz de correlación de 17 constituyentes de calidad de agua en la Cuenca del Río Reventado.	98
24.	Índices de calidad del agua (promedios)101
25.	Correlación entre índices de calidad del agua y algunas variables biofísicas y del uso de la tierra102

LISTA DE FIGURAS

		Página
1.	Esquema de la definición del conjunto de indicadores.	17
2.	Cuenca del Río Reventado	20
3.	Porcentajes de uso de la tierra.	22
4.	Mapa de uso de la tierra reclasificado	23
5.	Red de drenaje de la cuenca	35
6.	Orden de cauce de los cauces permanentes.	39
7.	Red de muestreo en la cuenca del río Reventado	41
8.	Áreas de drenaje de los puntos de muestreo	50
9.	Zonas de la cuenca	61
10.	Valores promedio de pH observados en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.	65
11.	Valores promedio de temperatura en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado	67
12.	Promedios de conductividad eléctrica y sulfatos en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado	69
13.	Valores promedio de turbidez en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.	71
14.	Valores promedio de sodio, magnesio y calcio encontrados en la cuenca del río Reventado.	74
15.	Concentraciones promedio de potasio en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado.	76
16.	Concentraciones promedio de oxígeno disuelto en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado	78
17.	Valores promedio de cloruro encontrados en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado	80
18.	Valores promedio de fosfatos en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado	83
19.	Valores promedio de nitrato y amonio en la cuenca del Río Reventado	86
20.	Valores promedio de sólidos disueltos y en suspensión en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado. Escala logarítmica	87
21.	Relación entre variable canónica 1 y variable canónica 2.	92
22.	Distribución de variables canónicas en la Cuenca del Río Reventado	92
23.	Dendrograma de correlación de las variables de calidad de agua de la cuenca del río Reventado.	97
24.	Índices de calidad del agua en la cuenca del río Reventado	103

INDICE DE ANEXOS

	página
ANEXO A	
Cuadro 1A. pH y conductividad de muestras obtenidas en el Proyecto Tierra Blanca	120
Cuadro 2A. Aforos realizados por SENARA en 1993.	120
Cuadro 3A. Dosis en kg/ha aplicadas a los cultivos en la zona.	121
Cuadro 4A. Precipitación pluvial diaria durante 1994 en la estación meteorológica "Sanatorio Durán".	122
ANEXO B	
Anexo 1B. Descripción de los parámetros seleccionados	124
ANEXO C	
Cuadro 1C. Programa de SAS para el análisis de varianza	130
Cuadro 2C. Programa de SAS para el análisis discriminante canónico y correlación.	131
Cuadro 3C. Programa de SAS para el análisis cluster	132
Cuadro 4C. Programa de SAS para la correlación entre índices de calidad del agua y variables biofísicas y de uso de la tierra.	133
Cuadro 5C. Fórmulas usadas para la conversión de los valores en índices de calidad.	134
Cuadro 6C. Cálculo de la dureza y de la relación de adsorción de sodio (SAR).	136
ANEXO D.	
Cuadro 1D. Base de datos de los parámetros medidos en las aguas superficiales de la cuenca del río Reventado.	138
Cuadro 2D. Resultado del análisis bacteriológico en diferentes puntos en la cuenca del río Reventado.	139
Cuadro 3D. Resultados del análisis de plaguicidas en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado.	140

VILLEGAS O., J.G. 1995. Evaluación de la calidad del agua en la cuenca del Río Reventado, Cartago, Costa Rica, bajo el enfoque de indicadores de sostenibilidad. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica. CATIE. 145 p.

Palabras claves: Calidad del agua, aguas superficiales, contaminación, indicadores de sostenibilidad, índices de calidad, cuenca hidrográfica, análisis multivariado, Sistemas de Información Geográfica.

RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio de la calidad del agua superficial en la cuenca del Río Reventado, con el objetivo de relacionar el impacto de ciertas características de la cuenca, del uso de la tierra y prácticas de manejo sobre los valores encontrados para los parámetros de calidad de agua medidos, los cuales pasarían a ser indicadores de la sostenibilidad ecológica de la cuenca. La cuenca del Río Reventado está ubicada al norte de la ciudad de Cartago, tiene gran importancia económica por la gran producción de hortalizas. En la zona alta es predominante la cobertura boscosa y la zona baja comprende la periferia de la ciudad de Cartago. Las aguas del río Reventado son utilizadas para riego, descarga de residuos urbanos y agrícolas, lavado de arena y finalmente son recibidas por la represa hidroenergética de Cachí.

Se escogieron nueve estaciones de muestreo distribuidas en puntos representativos de la zona alta, media y baja de la cuenca y se tomó una muestra por mes durante 7 meses. En todas las muestras se han determinado temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, turbidez, nitratos, fosfatos, amonio, potasio, magnesio, calcio, cloruros, sólidos totales, sólidos en suspensión y disueltos.

La mayor perturbación detectada sobre la calidad del agua se presenta en la zona baja, ocasionalmente en la zona media y con menor frecuencia en la zona alta.

El Análisis Discriminante Canónico indica que hay un componente químico asociado al pH, conductividad, calcio, sodio, cloruros, magnesio y sulfatos, lo cual resalta la influencia volcánica de las aguas, ya que en el nacimiento del río las aguas tienen un pH muy bajo, alta conductividad y concentración de iones y un componente asociado a temperatura, sólidos totales, turbidez y amonio, es indicador de la contaminación del agua. El Análisis Cluster ha permitido diferenciar 2 grandes grupos: uno con predominancia química y el otro con predominancia física. Las correlaciones más fuertes se presentaron entre turbidez y potasio, sólidos totales y en suspensión y magnesio, y entre calcio, sulfato y conductividad.

Se elaboraron índices de calidad del agua, que muestran una calidad mayor en la zona alta, desmejorando a medida que se desciende y cae considerablemente en la zona baja. Correlaciones de los índices con el uso de la tierra indican que las actividades de extracción de arena y las áreas urbanas fueron las mayores responsables del deterioro de la calidad; la horticultura, ganadería y cultivos perennes están relacionadas con la contaminación del agua, no así la cobertura forestal. La precipitación también tuvo efecto negativo sobre la calidad del agua, debido a que provoca arrastre de sedimentos hacia las corrientes de agua.

VILLEGAS O., J.G. 1995. Water quality assessment in the Reventado's Watershed, Cartago, Costa Rica, oriented to the development of indicators of sustainability. M.Sc. Thesis. CATIE. 145 p.

Key words: Water quality, Surface water, Pollution, Indicators of sustainability, quality indices, Watershed, Multivariate analysis, Geographical Information Systems.

SUMMARY

A study on the quality of surface water in the Reventado River's watershed was conducted. The study's objective was to relate measured water quality parameters to land use, management practices and some biophysical characteristics. The measured water quality parameters could eventually be used as indicators of the ecological sustainability of the watershed.

The studied watershed is located North of the city of Cartago and presents great economic importance because of the production of vegetable crops. The upper watershed has been reforested, and the lower watershed is occupied by the city's periphery. The water of Rio Reventado is used for irrigation, for evacuation of agricultural and urban waste, for sand washing and are received, downstream, by the Cachí Hydroelectric Reservoir.

Nine measuring locations were chosen, distributed in the upper, medium and low portions of the watershed, at which one water sample was taken each month, during seven months. The measured parameters include temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, turbidity, nitrates, phosphates, ammonia, potassium, magnesium, calcium, chlorides, total solids, dissolved and suspended solids.

The largest detected perturbation in water quality was found in the lower portion. Some perturbation was found

occasionally in the medium portion, and less often in the upper portion.

The Discriminant Analysis showed a first component associated with pH, conductivity, calcium, sodium, chlorides, magnesium and sulphates, which emphasized the volcanic influence on the waters. At the spring originating the river, the pH is very low, and the conductivity and ionic concentration is very high. A second component is associated with temperature, turbidity and ammonia, and is an indicator of water contamination.

Similarity between indicators forming two principal groups: one grouping chemical properties and the other, physical properties, were differentiated through a Cluster Analysis. The greater similarity was found between a) turbidity and Potassium; b) total and suspended solids and magnesium; c) calcium, sulfate and conductivity.

Indices of water quality were elaborated, showing a better quality in the upper area, a decreasing quality with distance downstream a rapid decrease in the lower portion.

The correlation of the indices with land use showed that sand extraction and urban areas were most responsible for the deterioration of water quality. Horticultural, perennial crops and cattle were related to pollution but the forest cover was not. Precipitation also had a negative impact on water quality.

1. INTRODUCCION

El término "sostenibilidad" así como sucede con los términos "ecología y medio ambiente" y "calidad de vida" están en boca de todo el mundo, pero sin embargo pocos o nadie entiende, o cada quien interpreta a su manera. Mientras más componentes integren la definición de sostenibilidad, el término se tornará menos científico y más moral y político.

De todas maneras, no pierde vigencia la importancia de investigar el estado en que se encuentra el medio ambiente, ya que si podemos evaluar los factores ambientales correctamente, se nos facilitará el camino de formular un procedimiento para evaluar la calidad de vida (Inhaber, 1974), aspecto fundamental dentro del enfoque sostenible.

Como parte del proceso de encaminarse hacia el desarrollo sostenible, es fundamental el apuntar hacia una mayor comprensión de la relación entre las actividades humanas y sus repercusiones en el medio ambiente. Es conveniente, entonces, buscar estrategias que permitan controlar la interacción con el sistema natural, de tal manera que la sociedad se beneficie, manteniendo al mismo tiempo, la productividad futura del ambiente biofísico.

Cuando se intenta estudiar la sostenibilidad desde una perspectiva cuantitativa es necesario recurrir a indicadores. Esta investigación tiene como objetivo identificar indicadores de calidad del agua superficial como una aproximación a los indicadores de sostenibilidad.

Un sistema agrícola es sostenible si se mantiene la producción económicamente en el tiempo cuando se la evalúa en relación al aspecto ambiental (Barnett, 1994).

Poder expresar la sostenibilidad en términos cuantitativos se ha convertido en un reto para economistas y estadísticos, y se podría tratar como en el caso de la calidad del agua, de expresar en términos cuantitativos un aspecto por

naturaleza cualitativo, y en el cual intervienen simultáneamente una cantidad de variables.

En esta tesis se estudiaron parámetros de calidad de agua del río Reventado, los cuales fueron considerados como indicadores de sostenibilidad ecológica.

La vida del hombre se encuentra estrechamente ligada con el agua. No sólo constituye su fuente de existencia sino que contribuye a todas sus actividades. Sin ella no es posible la agricultura, la ganadería y la pesca, actividades primarias en el desarrollo de la humanidad.

Es entonces evidente la importancia del agua en el desarrollo económico, si además de lo anteriormente anotado se suma el aprovechamiento para el riego; el abastecimiento doméstico; la producción de energía eléctrica; el suministro industrial; la recreación; mantenimiento de la vida acuática, y las vías de navegación (Beitia, 1989).

Siendo el Manejo de Cuencas el arte y la ciencia de manejar los recursos naturales de una cuenca con el fin de controlar la descarga de agua en calidad, cantidad y tiempo de ocurrencia, así como la conservación y/o mejoramiento de la calidad medio ambiental, y ante los indicios de que no se está efectuando un aprovechamiento sostenible de los recursos, se procedió a realizar esta investigación en la cuenca del Río Reventado, ubicada en la provincia de Cartago, Costa Rica.

La cuenca del Río Reventado presenta diferentes usos de la tierra, principalmente un parque nacional en la parte alta; una apreciable producción hortícola y algo de ganadería en la parte media y extracción de materiales para construcción y zonas pobladas en la parte baja. Es por lo tanto una cuenca hidrográfica con una problemática compleja y al mismo tiempo interesante, apropiada para el estudio de indicadores de sostenibilidad y entre ellos los relacionados con calidad de agua.

En la cuenca del Río Reventado se tiene conocimiento de la existencia de factores que están agravando la situación del recurso hídrico como lo son:

- Erosión: En la zona norte de Cartago se registraron tasas de erosión que sobrepasan las 100 t/ha/año (Melo, 1991), esta erosión se debe a factores naturales (suelos, pendiente, precipitación, etc.) y a factores antropogénicos (deforestación, actividades agrícolas, etc).
- Minería: Actividades de extracción de materiales de construcción (tajos) aportan una apreciable cantidad de sedimentos.
- Sistema de riego: Existe un sistema de riego instalado por el SENARA, el cual intensifica el uso de la tierra y el peligro de pérdidas de suelo por erosión, además de propiciar un mayor uso de insumos.
- Empleo de agroquímicos: Siendo la actividad económica principal del área la horticultura, la cual requiere una fuerte introducción de insumos entre ellos los productos para control de plagas y enfermedades: insecticidas, fungicidas, nematicidas y herbicidas, que en muchos casos se aplican por encima de las dosis recomendables (Hernández, 1988), así también altas dosis de fertilizantes.
- Las aguas del Río Reventado y de otros ríos vecinos finalmente son recibidas por el embalse de Cachí, el cual presenta serios problemas por los altos niveles sedimentación que han reducido su vida útil, y que determinan que periódicamente se abran las compuertas para proceder a su limpieza, produciendo la descarga serios daños ecológicos aguas abajo. El año 1990 se evacuaron 653.000 toneladas de sedimentos suspendidos durante las operaciones de limpieza (Jansson y Rodríguez, 1992).
- Insuficiente asistencia técnica, particularmente en lo referente a conservación de suelos y aguas, mientras que los

productores realizan prácticas agronómicas que degradan los suelos y el medio ambiente (Melo, 1991).

En este trabajo se intentó evaluar la calidad y cantidad del agua superficial del Río Reventado y sus afluentes a través de mediciones periódicas en varios puntos de muestreo ubicados en diferentes segmentos de la red de drenaje.

Pese a que la calidad del agua de la cuenca está afectada por diferentes fuentes de contaminación (forestal, agrícola, urbana, tajos, etc.) en general se trató de dar mayor cobertura al estudio de la contaminación agraria difusa. El monitoreo de la calidad del agua debe ayudar a los agricultores a tomar decisiones correctas acerca de las prácticas de manejo de suelos, cultivos y agroquímicos.

La erosión del suelo y el subsecuente transporte de sedimentos desde la superficie de la tierra hacia el cuerpo de agua es una función de complejos procesos hidrológicos, climatológicos y edafológicos y no está dentro del alcance de esta tesis profundizar sobre ellos, sin embargo, gracias al empleo de datos procesados en un sistema de información geográfica, se determinó el área de influencia sobre cada punto de muestreo, el uso de la tierra predominante, posibles fuentes de contaminación y otras variables que ayudaron a interpretar los resultados obtenidos.

Las principales herramientas de trabajo que se utilizaron fueron el sistema de información geográfica (SIG), análisis de laboratorio y análisis estadístico.

El sistema de información geográfica sirvió para definir los puntos de muestreo y análisis del uso de la tierra, también para extraer información acerca de características fisiográficas, cálculo de áreas y delimitación de subcuencas.

El análisis de laboratorio tuvo como objetivo la medición de los indicadores de la calidad del agua.

El análisis estadístico tuvo como objetivo describir el comportamiento de las diferentes variables, las correlaciones

entre ellas, las diferencias encontradas entre los sitios de muestreo, la influencia entre el uso de la tierra y otros factores sobre los indicadores de calidad del agua.

1.1. Objetivos

Objetivo general

- a) Identificar un conjunto de indicadores relativos a la calidad del agua superficial, como parte del proceso de desarrollar indicadores de sostenibilidad.
- b) Evaluar la sostenibilidad del uso de la tierra en la cuenca alta del Río Reventado en relación a sus consecuencias en el descriptor de calidad del recurso agua.
- c) Aportar información que contribuya al desarrollo de metodologías de investigación y de adopción de medidas y ejecución de obras que tengan como meta la conservación de los recursos naturales de manera tal que se asegure que las generaciones presentes y futuras vivan en un medio ambiente sostenible.

Objetivos específicos

- a) Realizar monitoreos de calidad y cantidad del agua del Río Reventado con el fin de evaluar el comportamiento de los indicadores seleccionados, tanto en el tiempo como en el espacio.
- b) Identificación de los factores críticos del uso de la tierra y factores biofísicos de la cuenca del río Reventado que tienen un impacto sobre la calidad del agua.
- c) Utilizar SIG y análisis estadístico para interpretar los resultados obtenidos por los análisis de laboratorio, describir las relaciones entre los indicadores de calidad del agua y algunas características relevantes de los sitios de toma de muestras.
- d) Presentar información originada a partir de datos georeferenciados que sirva como base para definir indicadores de

sostenibilidad en la dimensión ecológica respecto a la calidad del agua del Río Reventado.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Agricultura sostenible

La agricultura sostenible implica un manejo efectivo de los recursos para que la agricultura logre satisfacer las cambiantes necesidades humanas mientras que mantiene o mejora la calidad del ambiente y conserva los recursos naturales (BIFAD, 1988). La sostenibilidad agrícola es un concepto dinámico que reconoce las futuras necesidades de una mejor producción mientras que se preserva la calidad del ambiente y la capacidad productiva de los recursos suelo y agua (Lal *et al.*, 1991).

Los objetivos de la agricultura sostenible resaltan la importancia de reducir la dependencia de insumos basados en combustible fósil, minimizar los riesgos de degradación del ambiente y mantener una tendencia creciente de la productividad per cápita. Mientras que el objetivo de corto plazo puede ser el incremento de la rentabilidad, el objetivo a largo plazo es evitar el mal uso de la tierra, la erosión acelerada, el agotamiento de la fertilidad del suelo y la disminución del contenido de materia orgánica, la eutrofización y contaminación del agua, y el uso excesivo de recursos naturales no renovables.

Es creciente la preocupación mundial acerca de la sostenibilidad de la agricultura, pero los intentos para monitorear la sostenibilidad están todavía pobremente desarrollados y sin ser puestos a prueba (Hamblin, 1992).

2.2. Calidad del agua y sostenibilidad

El impacto de las prácticas agrícolas en la calidad del agua ha sido motivo de preocupación especialmente en los últimos 25 años. Erosión acelerada con sus nutrientes asociados, descargas directas de estiércol a los ríos, lixiviación de nutrientes y pesticidas al agua subterránea y contaminación

bacterial del agua superficial y subterránea son algunos de los efectos registrados de la agricultura moderna sobre el medio ambiente.

Todo sistema productivo requiere de un sistema de abastecimiento que debe proveer suficiente agua, de calidad adecuada, para llenar la demanda para consumo humano, industrial, agrícola y animal. Este es un requisito básico para el desarrollo sostenible. Por otra parte no es posible garantizar la sostenibilidad del desarrollo de una cuenca si el recurso hídrico está siendo sistemáticamente sometido a un proceso de degradación cuantitativa y cualitativa (Solís, 1993).

2.3. Usos del recurso hídrico

El recurso hídrico es un bien natural de carácter indispensable para la vida, por lo que todas las actividades humanas deberían ser planeadas con miras a garantizar su disponibilidad.

Las categorías más importantes del uso del recurso hídrico son las siguientes:

1. Abastecimiento de agua potable
2. Uso agropecuario:
 - Irrigación de cultivos
 - Ganadería
3. Uso industrial
4. Preservación de vida acuática y vida silvestre.
5. Generación hidroenergética
6. Recreación y valores estéticos
7. Medios de transporte

2.4. Calidad del agua

La calidad del agua es la suma de las características físicas, químicas, y biológicas de las aguas superficiales (quebradas, ríos y lagos) y aguas subterráneas (acuíferos).

La medición exacta de los parámetros de calidad del agua es muy difícil, el error puede provenir principalmente de dos fuentes: imposibilidad de muestrear exactamente el ambiente debido a su complejidad en el espacio y en el tiempo, y un inevitable sesgo durante los análisis de laboratorio (Felsot, 1992).

La contaminación del agua, por otra parte, tiene una connotación negativa. Se refiere a un cambio indeseable en la condición del agua o a la causa de esa condición (Chesters y Schierow, 1985).

2.5. Contaminación difusa

La contaminación no puntual o difusa es causada por fuentes difusas generalmente asociadas con escorrentía agrícola, silvicultural y urbana, escorrentía de actividades de construcción, etc. Esta contaminación es resultado de las alteraciones inducidas por el hombre en la integridad química, física y biológica del agua.

En términos prácticos, la contaminación difusa no se produce por la descarga desde un lugar único y específico (como por ejemplo una cañería), sino que generalmente resulta de la escorrentía, precipitación o percolación. La contaminación de fuentes no puntuales se presenta cuando la tasa a la cual los materiales contaminantes que entran en el cuerpo de agua o agua subterránea, exceden los niveles naturales.

Las actividades mineras pueden ocasionar contaminación puntual y también difusa. Pese a que la minería no está tan expandida como la agricultura, su impacto sobre la calidad del agua es generalmente mucho más dañino. Las tasas de sedimentación ocasionadas por la minería pueden ser extraordinariamente altas debido a que las operaciones mineras exponen grandes áreas de suelo y piedras a las fuerzas erosivas (Myers *et al.*, 1985).

La escorrentía urbana puede causar significativos efectos en la calidad del agua. Sedimentos, materia orgánica, basura pueden taponar rápidamente las alcantarillas y ocasionar serios problemas. La escorrentía urbana puede contener también metales pesados y bacterias fecales que afectan el agua subterránea y superficial (USEPA, 1976).

2.6. La agricultura y la contaminación de las aguas

La agricultura está indicada como responsable principal de la contaminación difusa de las aguas, es decir, la contaminación que no proviene de un lugar único y específico. Las fuentes difusas contribuyen a la contaminación por aportar materiales como sedimentos, nutrientes, bacterias patógenas, pesticidas, lluvia ácida, y otros.

La contaminación agraria difusa tiene directa relación con la manera en que se usa la tierra. El sector agrícola generalmente maneja intensivamente los recursos de la tierra. El cultivo en hileras, por ejemplo, generalmente implica una gran perturbación así como la aplicación de pesticidas y fertilizantes.

Los principales contaminantes de cultivos sin riego son sedimentos, nutrientes y pesticidas. La agricultura con riego es también una fuente de estos contaminantes, pero es también una fuente de sales y otros minerales. El escurrimiento desde los campos de cultivo y corrales lleva nutrientes, materia orgánica, amoníaco, bacterias fecales y otros microorganismos hacia los cuerpos de agua que lo reciben (Myers *et al.*, 1985).

El contaminante más obvio en las aguas superficiales proveniente de las tierras de cultivo es el sedimento. Sin embargo existe una disparidad entre las tasas de erosión y la distribución del sedimento, que se debe a una diversidad de factores, como las características del sitio, pendiente, clima, y proximidad a las aguas superficiales. La contamina-

ción generada por el cultivo, también se relaciona directamente al tipo de cultivo, preparación del suelo, y otras prácticas de manejo. En otras palabras, no todos los cultivos contribuyen cantidades iguales de sedimento a las aguas superficiales. Otro contaminante de importancia es el nitrato. El nitrato existe de forma natural en el suelo y en las aguas, y es un nutriente para las plantas y los microorganismos. Sin embargo, gran parte del nitrato en los suelos cultivados proviene de los fertilizantes nitrogenados orgánicos y minerales, y también de la mineralización de la materia orgánica, ya que ésta contiene más del 90 por 100 del N total del suelo.

Aunque en ocasiones conviene diferenciar entre las aguas subterráneas y las superficiales, hay que tener en cuenta que las dos están conectadas a través del ciclo del agua en la Naturaleza (Ramos y Ocio, 1992).

2.7. La cuenca hidrográfica como unidad de ordenamiento y planificación

Faustino, (1987) define la cuenca hidrográfica bajo dos marcos conceptuales: un marco biofísico que la define como tal y un marco político referido a su manejo y ordenamiento.

La elección de la cuenca como unidad lógica de planificación, ordenamiento y desarrollo se basa en las siguientes razones:

1. La cuenca es una región funcional establecida por relaciones físicas.
2. El enfoque de cuenca es lógico para la evaluación del vínculo biofísico de las actividades de las tierras altas y las tierra bajas, porque dentro de la cuenca ellas están vinculadas por el ciclo hidrológico.
3. El enfoque es holístico lo cual facilita a los planificadores y manejadores considerar muchas facetas del desarrollo de recursos.

4. Actividades como el uso de la tierra y las alteraciones de las tierras altas, a menudo resultan en un cambio de impactos ambientales que pueden ser rápidamente examinados dentro del contexto cuenca.
5. El concepto cuenca tiene una gran lógica económica, ya que muchas de las externalidades involucradas con alternativas de prácticas a nivel de finca son internalizadas cuando la cuenca es manejada como unidad.
6. La cuenca permite analizar los efectos de las interacciones humanas con el ambiente. Los impactos ambientales dentro de la cuenca producen una retroalimentación enlazada por los cambios en los sistemas sociales (Dixon y Easter, 1986).

2.8. Manejo de la calidad del agua en la cuenca hidrográfica

En general, el hombre se ha concentrado en la zona cercana a los ríos, o en las que tienen lluvias moderadas a fin de disponer fácilmente de agua para la irrigación de los cultivos. En el curso de la historia el agua ha sido una de las principales preocupaciones de los seres humanos, ya sea por excesos (inundaciones, lixiviación, etc.) o por defecto de la misma (sequía). Aunque los problemas relacionados con la disponibilidad del agua siguen teniendo vigencia, recientemente el hombre se ha visto obligado a preocuparse más por otro aspecto de la misma como lo es su calidad. (Beitia, 1989).

2.9. SIG y calidad del agua

Para una visión más completa de la calidad del agua, necesitamos tomar un nuevo acercamiento. Con nuevas herramientas para investigación y planeamiento como las bases de datos de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) los investigadores tienen acceso a información más pertinente

con mucho más detalle que nunca antes (Maguire, Goodchild y Rhind, 1991).

La tecnología de sensores remotos provee uno de los métodos más eficientes para localizar fuentes de polución difusa y apuntar hacia la reducción de la sedimentación y descarga de nutrientes hacia los reservorios.

Con estas nuevas herramientas los investigadores pueden examinar muchas piezas de información de toda la cuenca para resaltar las áreas críticas para que los fondos se destinen donde tendrán más impacto (Hirschi, 1992).

Mucha de la información utilizada en investigaciones hidrológicas tiene orientación geográfica. Por ejemplo, muestras de calidad de agua y mediciones de caudal y profundidad de aguas subterráneas son recogidas y relacionadas con características geográficas o físicas como la red de drenaje o un acuífero.

Más aún, las condiciones río arriba de un sitio pueden afectar al sitio, mientras que las condiciones río abajo podrían no hacerlo. Por eso, el concepto geográfico de una cuenca es importante para comprender la información hidrológica, porque cada localidad posee una relativa identidad direccional (cerca a la desembocadura, río arriba de cierto punto, etc.) derivado de la red de flujo dentro de la cuenca. Un sistema como SIG, que puede utilizar conceptos geográficos para manejo de la información es apropiado para la información hidrológica.

Una aplicación de SIG en manejo de la información es el desarrollo de una interface geográfica que aumenta la flexibilidad y facilidad con la cual la información puede ser recuperada y desplegada.

Para establecer esta capacidad, se deben concluir dos tareas:

- 1) Deben referenciarse geográficamente varias categorías de información con un sistema de coordenadas común;

2) Se debe desarrollar un software de computadora para proveer una interface para los usuarios.

El análisis visual usando tecnologías de gráficos computarizados ha incrementado la habilidad de los investigadores para identificar tendencias y relaciones, y para comunicar esta información a través de despliegues gráficos. Para comprender adecuadamente los patrones geográficos, los mapas que muestran las concentraciones de constituyentes de calidad de agua superficial deben incluir información acerca de la dirección del flujo dentro la cuenca.

Si se incluye información acerca de posibles fuentes de constituyentes químicos río arriba de cada lugar de muestreo, se le presenta al investigador una representación cartográfica que podría ayudar a realizar hipótesis acerca de los factores que afectan la calidad de agua en los ríos (Zelt, 1991).

2.10. Indicadores de sostenibilidad

Los indicadores son índices destinados a apreciar, de manera resumida, el estado de una sociedad (sistema) (Hachette, 1976). Los indicadores de sostenibilidad son herramientas para la toma de decisiones porque brindan información respecto a las consecuencias de ellas (Müller, 1993).

Butler (1992), dice que la agricultura sostenible requiere el balance entre una variedad de objetivos. Esto significa que a menudo no se puede maximizar un simple objetivo ya que esta optimización puede obstaculizar el logro de otras metas de sostenibilidad. Por esta razón los equipos transdisciplinarios que mantienen ciertos objetivos, con habilidad para negociar prioridades, proveen un aporte importante en investigación y extensión hacia una agricultura sostenible. Además, la participación de agricultores en estos equipos es particularmente crucial, porque una

agricultura sostenible significa que el agricultor se transforma de ser un usuario de tecnología a ser un productor de tecnología y a monitorear sus impactos.

Un gran impedimento en el desarrollo de métodos transdisciplinarios es la falta de buenos indicadores de sostenibilidad. En parte esto se debe a la facilidad de usar medidas tradicionales de producción y de beneficios. Estas no sólo son medidas simples y abreviadas, sino que se manifiestan en un tiempo relativamente corto. Los indicadores del impacto de prácticas agrícolas en la sostenibilidad son más difusas y de más largo plazo. Se necesitan esfuerzos sistemáticos para desarrollar estas medidas (Müller, 1993).

Los indicadores deberían reflejar una visión amplia que brinde mayor importancia a la salud del ecosistema; los indicadores deberían reflejar las conexiones explícitas entre el comportamiento económico y la salud del ecosistema (Ruitenbeek, 1991).

En esta tesis se estudiaron indicadores que evalúen el estado del ecosistema. Los indicadores escogidos son algunos parámetros de calidad de agua y un índice elaborado en base a ellos. (figura 1).

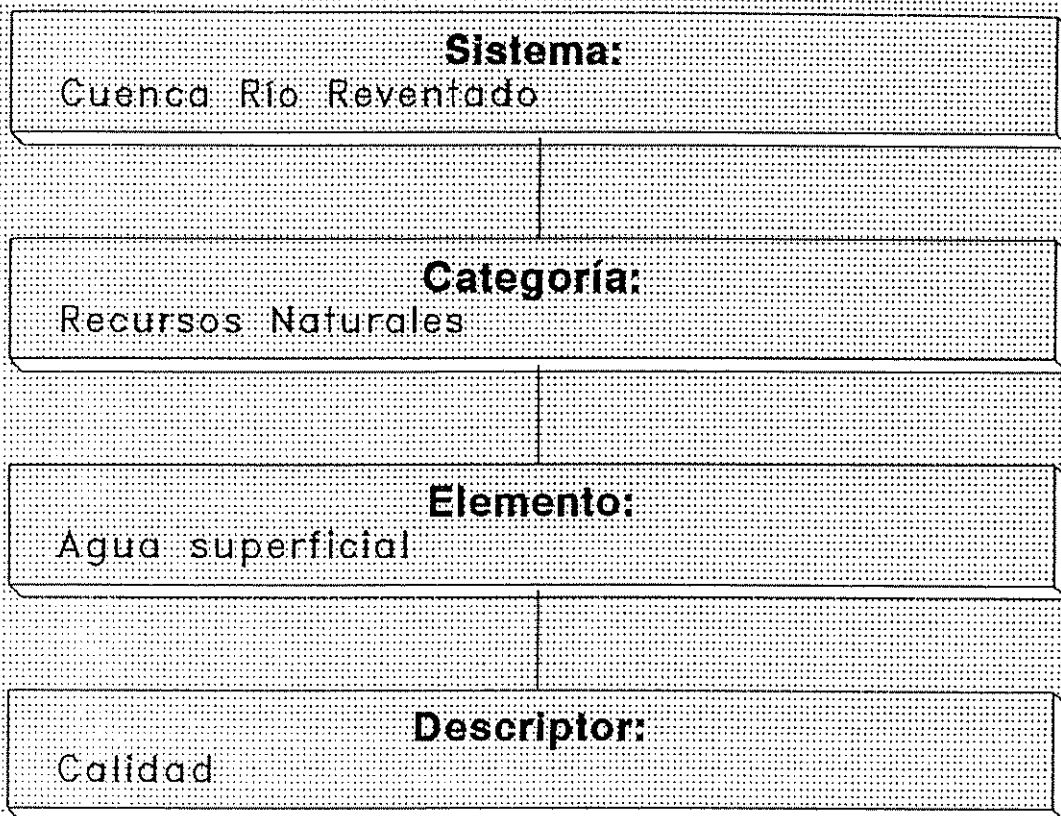
2.11. Marco metodológico para la definición de indicadores

Debido a que el concepto de sostenibilidad implica tres metas, las cuales en el corto plazo pueden competir entre sí, los aspectos ecológicos, económicos y sociales deben ser considerados simultáneamente. Más aún, los indicadores deben ser definidos de acuerdo al sistema específico o la situación específica a ser analizada (Müller y De Camino, 1993). Para comparar sistemas diferentes, los indicadores correspondientes deberían ser determinados dentro de un proceso lógico y repetible, donde el concepto básico de sostenibilidad y los criterios usados para la selección de los indicadores debe ser explicado. Tiene que asegurarse de que

la escogencia de los indicadores no toma lugar arbitrariamente, o sólo subjetivamente, y que todos los aspectos de un sistema, que son significativos para su sostenibilidad, son considerados (Müller, 1993).

Dentro del marco metodológico para la definición de indicadores, primero se determina el sistema a analizar, en este caso el sistema es la Cuenca del Río Reventado. De dicho sistema se identifica una categoría de análisis, esta categoría es un aspecto del sistema, significativo desde el punto de vista de la sostenibilidad, ejemplos de categorías son la operación del sistema, el rendimiento, la tecnología y la base de recursos. Las categorías están compuestas por elementos, por ejemplo, la categoría de recursos naturales tiene por elementos el agua, el suelo, la flora, la fauna, el aire, etc. A su vez, los elementos tienen características significativas que son los descriptores, ejemplos de descriptores son la calidad, cantidad y disponibilidad del elemento agua y erosión, materia orgánica y humedad del suelo. Como siguiente paso, se definen los indicadores que son la medida de la operación del sistema sobre el descriptor. Los indicadores son la expresión numérica del descriptor de sostenibilidad.

Estos indicadores de sostenibilidad pueden consistir en variables, parámetros o índices.



Indicadores:

- pH
- Conductividad
- Turbidez
- Oxígeno disuelto
- Nitratos y amonio
- Fosfatos
- Sodio
- Cloruros
- Sólidos totales
- Coliformes
- Índice global

Figura 1. Esquema de la definición de los indicadores

2.12. Índices de calidad de los recursos naturales

Un índice es una forma de presentar información de manera que permita comparar un estado ambiental con otro, esta comparación se debe hacer en base al juicio científico (Inhaber, 1974).

La incidencia de perturbaciones ambientales ha creado la necesidad de llegar a la definición de índices de calidad para los recursos naturales. Existen numerosos factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la calidad de dichos recursos, y hacen difícil su evaluación inmediata para los involucrados en el manejo de los recursos ambientales (Barbiroli *et al*, 1992). Por esta razón, desde los años 1960 se han propuesto varias metodologías para expresar sintéticamente y objetivamente la calidad de estos recursos. Estos índices ambientales son generalmente el resultado de cálculos funcionales y agregaciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos verificados en el ambiente, y una de sus características es que son capaces de variar continuamente dentro de un intervalo de valores. Esta propiedad los vuelve particularmente aptos para expresar objetivamente el nivel de calidad (o contaminación) de un lugar particular, y para evaluar aún mínimas diferencias en este nivel, permitiendo comparaciones tanto en términos temporales y espaciales.

La construcción y el uso de índices ambientales ha generado un amplio debate en el mundo científico entre los promotores y los oponentes (Ott, 1978). Por un lado, algunos especialistas sostienen que el uso de índices ambientales representa una excesiva simplificación de una realidad extremadamente compleja en el medio ambiente y que, en orden de efectuar un análisis preciso de los recursos, es esencial considerar los valores asumidos por las variables individuales que afectan la calidad. Por el otro lado, los promotores de los índices ambientales aprecian la simplicidad y

capacidad de abreviación de este instrumento lo cual permite hacer comparaciones rápidas o el análisis de tendencias temporales sin la complicación de tener que considerar simultáneamente todas las variables implicadas.

2.13. Localización y descripción de la zona de estudio

2.13.1. Ubicación

La Cuenca del Río Reventado se localiza en el flanco sur del Volcán Irazú (figura 2) y tiene un área de 22.4 kilómetros cuadrados (Alvarado y Schmincke, 1993). El cauce comienza aproximadamente a 2 kilómetros al sur del cráter volcánico a una elevación de 3,128 msnm y llega hasta el oeste de la ciudad de Cartago a una elevación de 1,450 metros donde confluye hacia el Río Agua Caliente (Kesel, 1973).

Debido a que la cuenca está localizada cerca de la División Continental, el clima es afectado por tormentas que se originan tanto en las zonas costeras del Atlántico y del Pacífico. Según datos de 22 años de registros en una estación que estuvo ubicada en el Sanatorio Durán la precipitación promedio anual es de 1,600 mm con una estación lluviosa de abril a diciembre. La temperatura promedio anual es de 10°C.

2.13.2. Suelos

Existen ciertas divergencias entre diferentes autores respecto a la clasificación de los suelos.

Cortés (1993) afirma que el tipo de suelo es uniforme para toda el área, se trata de inceptisoles (hoy clasificados como andosoles), de color oscuro y profundos, con buen contenido de materia orgánica y derivados de cenizas y lavas volcánicas. Melo (1991) indica que los suelos predominantes en la región son Dystrandept de origen volcánico, desarrollados y profundos (>90 cm), muy susceptibles a la erodabi-

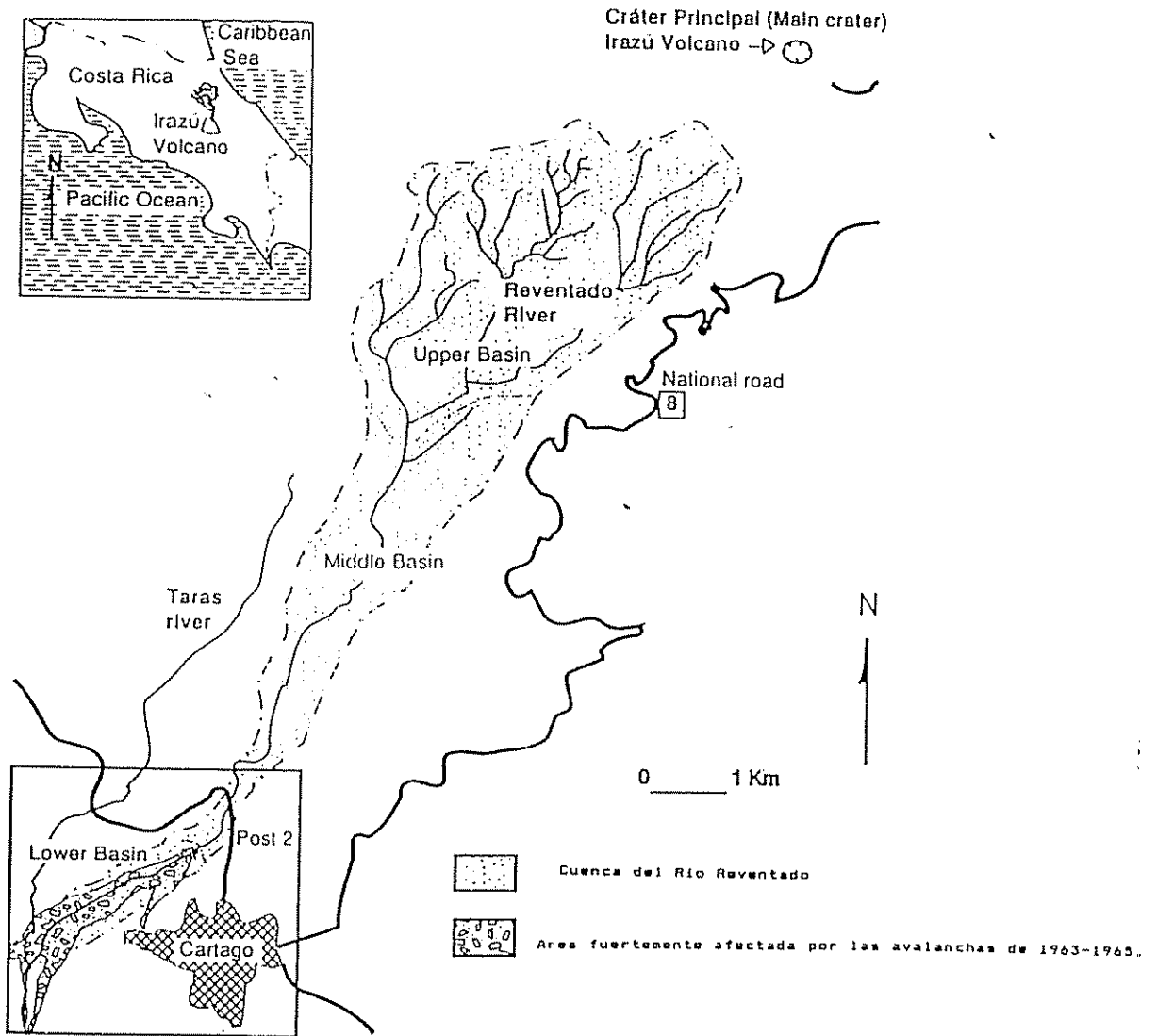


Figura 2. La cuenca del Río Reventado

Fuente: Alvarado y Schmincke, 1993.

lidad, textura franco arenosa y franco arcillosa, buena permeabilidad y pH de 5.0 a 6.9.

Los suelos en el área, a pesar de su localización en la pendiente del Volcán Irazú, no tienen características típicas para clasificarlos como un Andisol (Soil Survey Staff, 1992). De los análisis en un sector de Tierra Blanca, donde MAG/FAO tiene áreas piloto, los suelos son clasificados por van Enckevort, *et al.* (1994) dentro de la unidad taxonómica Ustic Humitropepts con nueve fases.

Nuñez (1994) encuentra que en la zona media de la cuenca existen cinco tipos de suelo diferentes y un porcentaje muy bajo de materia orgánica (1-4%), lo cual es un indicador de degradación, debido a que los suelos volcánicos deberían tener entre 6 y 11% de materia orgánica.

Lo que es evidente es la alta pulverización del suelo, especialmente del dedicado a la agricultura, el cual prácticamente no tiene estructura, debido al paso de la maquinaria y arado. El suelo pulverizado es altamente erosionable y tiene una baja tasa de infiltración (Shaxson *et al.*, 1989).

El Río Reventado posee un largo historial de acontecimientos trágicos, siendo el más devastador el ocurrido entre marzo de 1963 y marzo de 1965 cuando el Volcán Irazú hizo erupción casi continuamente y depositó un gran volumen de ceniza en la Cuenca del Reventado, causando destrucción y muerte de vegetación, animales y poblaciones (Bermúdez, 1978). Los depósitos variaron en profundidad desde 2 metros cerca a la cumbre a 0.3 metros en el límite inferior de la cuenca (Murata, 1966). Las cenizas destruyeron casi toda la cubierta vegetal en las pendientes altas del volcán, además crearon una costra impermeable de 1.0 a 2.0 cm de espesor. Como consecuencia de estos cambios, la tasa de infiltración del suelo disminuyó notablemente y se estimó que la escoorrentía equivalía a un 80 a 95 por ciento de la precipita-

ción. Debido a esta excesiva escorrentía, se incrementaron las inundaciones en la Cuenca del Reventado, siendo la más devastadora la que se produjo en diciembre de 1963.

2.13.3. Uso Actual de la Tierra y su relación con el aspecto ambiental

Por uso actual se entiende el empleo o tipo de explotación que el hombre dá a la tierra. Sánchez (1993) hizo una reclasificación del uso de la tierra en la cuenca y encontró que en un área de 2135 ha, el 51% (1100.3 ha) son bosque y charral, las hortalizas constituyen un 22.9% (488.7 ha), pastos 18% (389.9 ha), urbano 0.8% (17.1 ha), perennes 6% (131.3 ha) y tajos 0.4% (8 ha). Sus resultados se pueden apreciar en la figura 3 y figura 4.

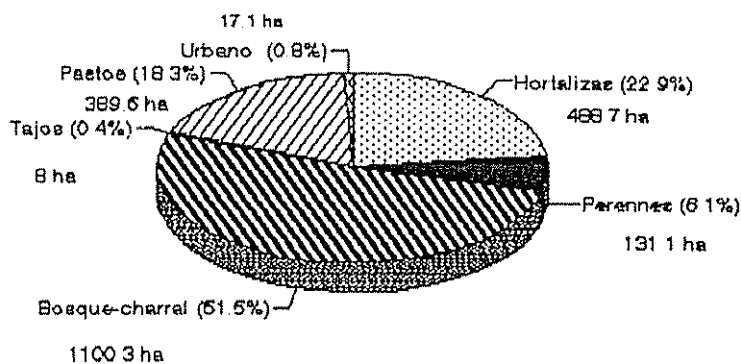


Figura 3. Porcentaje de uso de la Tierra reclasificado. Elaborado a partir de la información de la sección 2.13.3.

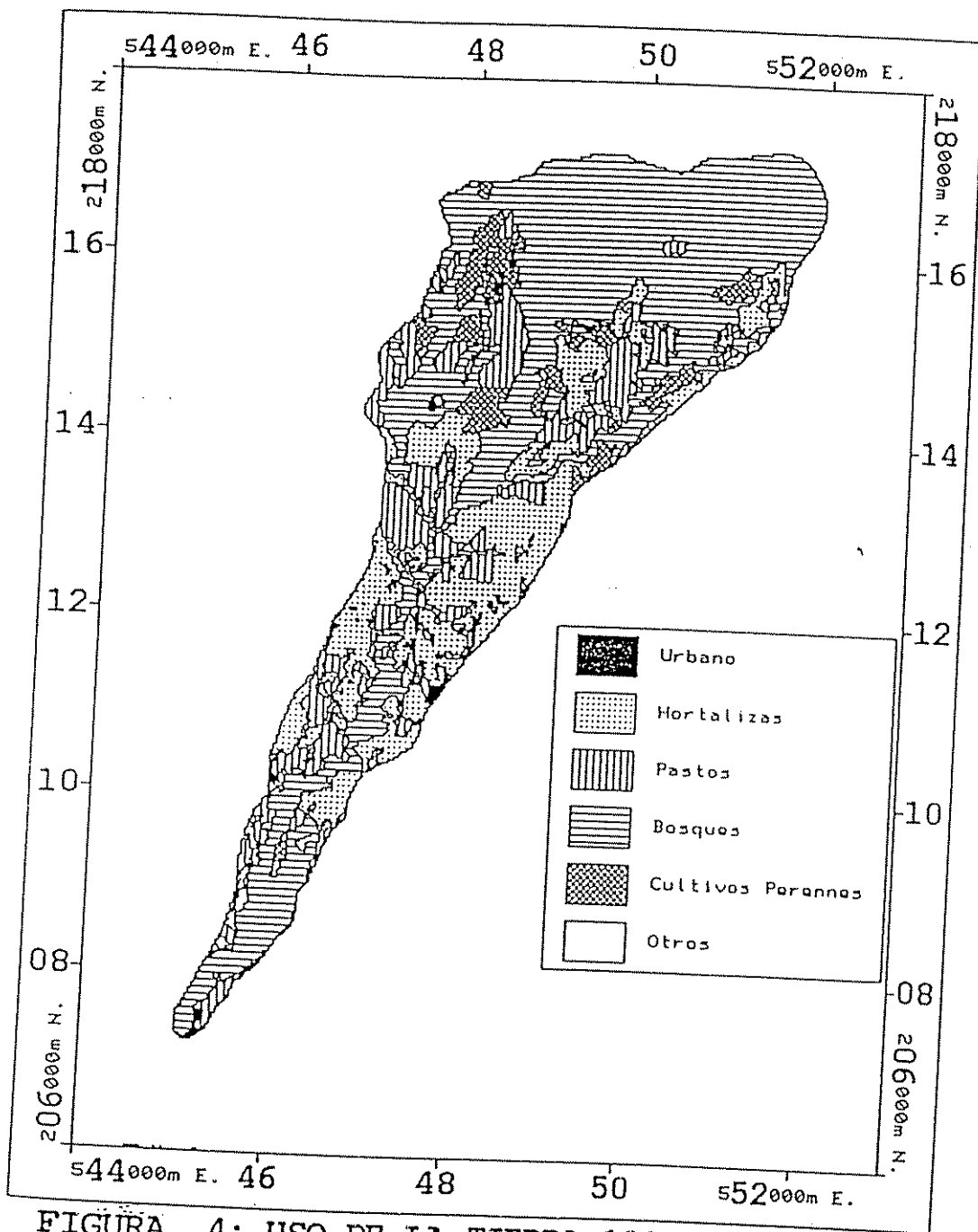


FIGURA 4: USO DE LA TIERRA 1993 (AGRUPADO)

A BASE DE FOTOS DE 1989, CONTROL DE CAMPO 1993

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Figura 4.

Fuente: Sánchez, 1993.

2.13.3.1. Bosque y charral

Se puede apreciar que un alto porcentaje (51.53%), ha sido clasificado como bosque y charral, es decir toda la vegetación que no tiene un aprovechamiento agrícola y que crece de manera natural o ha sido producto de la reforestación.

El grueso de esta vegetación crece en la parte alta y a lo largo de los márgenes de los ríos y quebradas que conforman la cuenca.

Con las erupciones del Volcán Irazú en 1963, gran cantidad de cenizas se depositaron en las partes altas de la zona, originando la destrucción de la flora y fauna, se originó, además, una escorrentía excesiva, causando erosión de suelos y grandes deslizamientos.

Como parte del proceso de reforestación de la zona se incluyen la Reserva Forestal y Area Recreativa Ricardo Jiménez Oreamuno, conocido como Parque Prusia y unos pocos pequeños proyectos de no más de 5 hectáreas cada uno (Díaz, 1993).

El Parque Prusia de más de 1600 hectáreas, es el proyecto de reforestación más importante que se ha realizado en la zona norte de Cartago. Para la reforestación se sembró principalmente zacate kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y árboles de eucalipto (*Eucalyptus spp.*), ciprés (*Cupressus lusitanica*), jaúl (*Alnus acuminata*), pino (*Pinus kesiya*) y roble (*Tabebuia rosea*), se reforestó con especies foráneas.

El Parque Prusia tiene una vital importancia, pues además de proteger la parte alta de la cuenca del río Reventado, se encuentran las nacientes para los acueductos de agua potable de las comunidades de Tierra Blanca, Potrero Cerrado y Llano Grande, entre otras. También nacen en esta zona las quebradas que abastecen el proyecto de riego de SENARA (Rappaccioli, et al. 1993). El parque es además fuente de semillas forestales.

Aparte de este parque, otros proyectos de reforestación en la zona prácticamente no han tenido éxito.

2.13.3.2. Horticultura

La cebolla es el cultivo más importante, representa la principal fuente de ingresos para el 82.7% de los agricultores de Tierra Blanca, ocupando el primer lugar en el área de siembra. Se cultiva todo el año aunque las cosechas se realizan en dos épocas definidas, la primera, en los meses de julio y agosto y la segunda en febrero y marzo.

El segundo cultivo en importancia es la papa, la cual es cultivada por el 57.7% de los agricultores, ocupando el 27% de la superficie agrícola, y el cultivo de la zanahoria es el tercero en importancia, éste es sembrado como cultivo de rotación después de la cebolla (Azofeifa y Trujillo, 1994).

En el área dedicada a los cultivos se hace un uso intensivo de la tierra. La horticultura es el principal sistema de producción del área y el que experimenta las mayores consecuencias de la erosión hídrica por la combinación de varios elementos, uno de ellos la poca cobertura que los cultivos brindan al suelo. Cortés y Oconitrillo (1993) indican que de los principales cultivos, la papa es la que brinda mayor protección al suelo, sobre todo al final del ciclo vegetativo cuando el follaje protege al suelo en un 100%. El cultivo de la cebolla aún en pleno desarrollo brinda poca cobertura al suelo, aparte de que el sistema radical es poco denso y superficial, proporcionando poco amarre al suelo, por lo tanto es considerado el cultivo de menor cobertura. Otros cultivos como la zanahoria y la remolacha, brindan una cobertura al suelo bastante buena, principalmente en el último tercio del ciclo vegetativo, ya que el follaje alcanza un buen desarrollo.

La horticultura es una actividad que requiere de una preparación muy especial del terreno. Antes de cada siembra es indispensable remover una capa considerable de suelo para lo cual se utiliza el arado de discos movido por tractor y el arado de tiro de bueyes. Se reporta que un 86% de los agricultores utilizan maquinaria para preparar los terrenos, únicamente un 14% preparan sus terrenos con sólo bueyes (Ramírez y Paz, 1993).

La profundidad a que penetra el arado en el suelo es un factor muy importante en cuanto a las posibilidades de pérdida de suelos. Entre más profundo sea el arado, mayor será la probabilidad de lavado y arrastre de suelo por el agua. Cortés y Oconitrillo (1993) constataron que en algunos casos el suelo arado es arrastrado por el agua de las lluvias, formándose cárcavas y barrancos profundos. Los mismos autores indican que en esta región, el 72% de los productores no reciben asistencia técnica de ninguna índole y que la asistencia en cuanto a conservación de suelos es mínima y no siempre directa, sin embargo todos los propietarios son conscientes del problema. La mayoría de los agricultores siembra en dirección contraria a la pendiente. En muchos casos el ángulo de inclinación de las eras y de los surcos es bastante pronunciado, favoreciendo así el poder erosivo del agua de escorrentía. En otros casos, por el contrario, el ángulo de inclinación es casi nulo, ocasionando el represamiento y el desbordamiento del agua y con esto el lavado de grandes cantidades de suelo.

Los cultivos principales son la cebolla, papa y zanahoria, ya que el 83% de los agricultores se dedican a producir los mismos (Ramírez y Paz, 1993). Estos cultivos hortícolas, y en particular la papa, requieren altas dosis de nitrógeno y otros elementos, y son poco eficientes en la utilización de los fertilizantes, es decir que se producen

altas pérdidas de nitrato por lavado, especialmente si los suelos son arenosos (Ramos y Armentia, 1992).

Melo (1991) reporta altas dosis de aplicación de las fincas de esta zona (cuadro 3A, anexo), y también son altas las pérdidas por lixiviación cuyo destino son las aguas subterráneas y superficiales.

A raíz del sistema de monocultivo y a la intensidad del uso de la tierra, que no descansa en ningún momento, se favorece la incidencia de plagas y enfermedades.

Algunas de las plagas reportadas en la región son la langosta (*Schistocerca piceifrons*), los jobotos (*Phyllophaga spp.*), áfidos, trips (*Thrips tabaci*), gusano cortador (*Feltia sp* y *Agrotis sp*), nemátodos (*Ditylenchus dipsaci*, *Heterodera rostochiensis*, *Meloidogyne* y *Pratylenchus*), polilla (*Phthorimaea operculella* y *Scrobispalopsis solani-vora*) y la mosca minadora (*Liryomiza huidobrensis*).

Entre las principales enfermedades se encuentran el hongo torbó (*Rosellinia spp.*), tizones tardío y temprano (*Phytophthora infestans* y *Alternaria solani*), raíz rosada (*Pyrenochaeta terrestris*), botritis (*Botritis allii*), y podredumbre (*Sclerotinia sp* y *Fusarium oxysporium*) (Melo, 1991).

Estas plagas ocasionan daños a las plantas y productos y esto representa pérdidas económicas para los agricultores. El 100% de los agricultores utiliza plaguicidas y un 11,1% los combina con alguna medida de combate de tipo biológico (Rappaccioli *et al.*, 1993).

El combate químico es uno de los métodos más eficaces y en algunos casos económico en el combate de plagas, pero el uso inadecuado de éstos conlleva peligros y riesgos tanto para el ser humano como para el medio ambiente.

Los agricultores de la zona normalmente realizan 29 aplicaciones en las parcelas durante el ciclo del cultivo, mientras que en parcelas demostrativas del proyecto de

Manejo Integrado de Plagas (MIP) se efectúan sólo 19 (Hilje, 1993). Es decir que los agricultores están aplicando un 34% más de lo recomendado por los técnicos.

Entre los insecticidas de mayor uso reportados se encuentran el Clorpirifós (Lorsban), el Forato (Thimet), el Metamidofós (Tamarón), Paratión metílico, Decametrina (Decis), Permetrina (Ambush), Mocap y Furadán, muchos de los cuales son altamente tóxicos.

Cortés Granados (1993) pronostica que en las zonas de mayor pendiente de la cuenca, dedicadas a cultivos hortícolas, los suelos se podrían perder en algo más de 60 años de continuar registrándose las actuales tasas de erosión. Lamentablemente cultivos muy importantes en la región como la zanahoria (*Daucus carota*) y especialmente la cebolla (*Allium cepa*) proporcionan una mínima cobertura al suelo.

2.13.3.3. Pastizales

Existen algunas áreas clasificadas como pastizales, las cuales presentan una buena cobertura que protege la tierra de la erosión. Estas áreas son más frecuentes en la zona de Llano Grande. Generalmente no están bajo ningún régimen de manejo y su principal función es servir para el pastoreo de los animales de tiro o caballos. Los pastizales están compuestos en gran medida por zacate kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y pasto bermuda (*Cynodon dactylon*).

En la zona de Tierra Blanca, el 14.2% del área se dedica al pastoreo, práctica que realiza el 27% de los productores, ya sea como medida para alternar con los cultivos y romper ciclos en la biología del suelo, como para la alimentación de animales de tiro y para la producción de leche (Azofeifa y Trujillo, 1994).

Cuando los pastizales son sobrepastoreados, se produce compactación del suelo, lo cual disminuye la capacidad de

infiltración e incide en mayor escorrentía y mayor arrastre de contaminantes hacia los ríos.

2.13.3.4. Cultivos perennes

Las áreas clasificadas como "cultivos perennes", consisten principalmente de cultivos de algunas especies frutales, en particular el higo (*Ficus carica*) y cultivo de plantas ornamentales y floricultura en invernaderos, también áreas de pasto con árboles. Estas áreas son más frecuentes en la zona de Llano Grande. Existen cercas vivas compuestas por poró (*Erythrina spp.* y madero negro (*Gliricidia sepium*) restringidas a las orillas de los caminos. Estas permanecen todo el tiempo drásticamente podadas, con lo que no se puede obtener un alto índice de efectividad en la disminución de la acción del viento. La sombra de las cercas vivas es considerada como perjudicial para el desarrollo de los cultivos principales (cebolla, papa y zanahoria).

2.13.3.5. Materiales de construcción

En la zona existen lugares de donde se extraen materiales de construcción como arena y lastre, éstos son conocidos como "tajos", existe uno que es propiedad del estado y los demás son explotados por particulares.

La actividad de explotación del tajo para materiales de construcción genera un proceso constante de socavación de la base del talud en el deslizamiento de San Blás, ubicado a 1,5 km al norte del centro de la ciudad de Cartago, en la terraza de Banderilla, en el margen izquierdo del Río Reventado, lo cual podría significar un grave peligro para esa población. Mora *et al.*, (1990) recomiendan que la actividad del tajo debe ser eliminada.

2.13.3.6. Uso urbano

Los poblados más importantes relacionados con el área en estudio son Tierra Blanca y Llano Grande, con 3527 y 2288 habitantes, respectivamente de acuerdo con el Censo de Población de 1984, cuya concentración de población provoca una presión mayor sobre la tierra, desde el punto de vista de la tenencia y la explotación (Cortés, 1993).

Las tasas de crecimiento poblacional en 10 años son de 25.2% y 15.90% para Tierra Blanca y Llano Grande respectivamente (Bell, 1987). El porcentaje de población económicamente activa es de un 65%.

Un serio problema de salud que se presenta en la población es el cáncer gástrico. La provincia de Cartago es la de mayor incidencia en cáncer gástrico, siendo la zona rural, donde hay producción agrícola, la más susceptible (Vega, 1994). Se sabe que los nitratos se pueden transformar en nitrosaminas, las cuales son carcinogénicas y tienen correlación con la incidencia de cáncer gástrico. Los nitratos pueden provenir del agua de consumo, o estar presente en alimentos como hortalizas o carnes procesadas (International Standards for Drinking Water, 1971).

Una parte de la población en la zona baja de la cuenca está expuesta al peligro de posibles crecidas y avalanchas en el río Reventado, especialmente la colonia de precaristas en el área interna de los diques (Mora *et al.*, 1990).

2.13.4. Capacidad de Uso y Uso Potencial de la Tierra

Existen varias definiciones de Capacidad de Uso y de Uso Potencial de la tierra, sólo se consideraron las que se fundamentan en las características ecológicas.

Capacidad de uso es el uso más intensivo que puede permitir una unidad de tierra sin generar efectos negativos o deterioros en su capacidad productiva, los usos menos intensivos son correctos y permitidos. Se trata de generar

un equilibrio entre la producción y conservación, es decir ni subuso ni sobreuso (Faustino, 1993).

Existen varias metodologías para determinar la capacidad de uso, entre las que se pueden citar el sistema de clasificación de la capacidad de uso de la tierra de FAO, USDA, Centro Científico Tropical y T.C. Sheng (Sharma, 1993).

Mientras que por uso potencial se entiende el uso óptimo de una tierra considerando capacidad de uso. Esta denominación es inherente al desarrollo y proceso de planificación, depende de lo que el hombre pretende hacer y se califica como categorización deseable. Bajo un punto de vista ecológico, el uso óptimo es un uso actual que corresponde a la capacidad de uso (Centro Científico Tropical, 1985).

En la cuenca del río Reventado se hicieron algunas clasificaciones de la capacidad de uso de la tierra. Entre ellas Sánchez (1993), siguiendo la metodología de T.C. Sheng hizo una clasificación de la tierra a partir de los mapas de pendientes y profundidad de los suelos. Sánchez concluye que de las 2151 hectáreas de la cuenca, 1377 hectáreas podrían dedicarse a cultivos con medidas de protección, 547 a sistemas agroforestales y 227 a bosque. Es decir que el 89% de la cuenca podría ser utilizado para la producción de diversos cultivos (hortalizas, pastos, sistemas agroforestales, frutales, plantación forestal), siempre y cuando se realicen las prácticas de conservación de suelos. Continuando con el análisis, el mismo autor compara el uso actual con la capacidad de uso y obtiene que 663 has (30.7% del área en estudio) están bajo uso adecuado, 443 ha (20.5%) en sobreuso y 1029 ha (47.6%) en sub-uso. Por divergencias con los resultados de Sánchez, no se tomaron en cuenta para este trabajo.

El proyecto de MAG/FAO en el área piloto de Tierra Blanca, en una superficie de 152.1 ha, siguiendo la metodología propuesta por MAG/MIRENEM y comparando con el uso actual, encontraron un 22.1% del área subutilizado, 15.4% con un uso adecuado, 48.4% levemente sobreutilizado y 11.7% severamente sobreutilizado, es decir que un 60 % del área que estudiaron está siendo sobreutilizada, el resto del área es ocupada por urbanización y caminos (van Enckevort, *et al.* 1994).

Melo (1991) tuvo dificultades para utilizar la metodología USDA de clasificación de uso de suelos, principalmente porque este sistema no recomienda los cultivos anuales cuando la pendiente es mayor de 15%.

Por otra parte, utilizando la metodología elaborada por el Centro Científico Tropical y la metodología elaborada por el Servicio Nacional de Conservación de Suelos y Aguas (SENACSA), Ganea (1993) clasifica la zona de Tierra Blanca dentro la Clase III, la cual incluye suelos que presentan limitaciones moderadas solas o combinadas que restringen la elección de cultivos anuales y quieren prácticas moderadas de manejo y conservación.

En suelos donde no en todos los casos se realizan medidas de conservación, suelos que no descansan, y en los cuales se han registrado pérdidas de hasta 108 ton/ha en un solo día (SENACSA, 1991), no parece adecuado afirmar que sólo se requieren prácticas moderadas de manejo y conservación, además, aparentemente no existe una uniformidad de criterios en lo referente a los conceptos de capacidad de uso y uso potencial, utilizándose en algunos casos, como términos sinónimos, corriendo el riesgo de malinterpretar los resultados y justificar la deforestación y un uso más intensivo de la tierra.

2.13.5. Represa de Cachi

La planta hidroeléctrica de Cachi aprovecha un caudal promedio de 52,5 m³/s del río Reventazón y tiene una capacidad instalada de 110 Mw/h. Su generación anual es 567 Gw/h en promedio. El embalse cubre una extensión de 323,6 ha y tiene un volumen de 54 millones de metros cúbicos, de los cuales cerca de 5 millones han sido ocupados por sedimentos. En otras palabras, se estima que el embalse ha perdido alrededor del 11% de la capacidad útil de almacenamiento (Jansson y Rodríguez, 1992). Uno de los mayores aportes de sedimentos lo provoca el río Reventado, con cerca de 2.800 ton/año (Mora, 1989).

2.13.6. Proyecto de riego

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) viene operando una infraestructura para riego aprovechando las aguas del río Reventado, el cual tiene por nombre Proyecto Tierra Blanca.

El sistema de riego recibe las aguas del río Reventado por medio de una pequeña presa que deriva 25 lps, los cuales vierten en un estanque con capacidad de 1180 m³, de donde parte la tubería principal con un caudal de 50 lps. El sistema aprovecha la energía potencial para operar equipos de riego por aspersión de 49 agricultores con 60 hectáreas de cultivos, entre ellos: cebolla, papa, zanahoria, remolacha, coliflor, etc (SENARA, 1994).

En informes de calidad de agua de los proyectos de riego y drenaje en operación se reportan los resultados de análisis de pH y conductividad eléctrica para el proyecto Tierra Blanca (cuadro 1A Anexo), de los cuales se sostiene que no es factible la presencia de problemas por salinidad. En lo que respecta al pH, sí es notable su grado de acidez en todo el período, lo que se puede deber a la presencia de sustancias volcánicas, es posible que la concentración del

ión hidrógeno sea elevada al igual que algunos microelementos como hierro, cobre, etc. los cuales a niveles altos pueden ser tóxicos para los cultivos. Se clasificó el agua del proyecto dentro la categoría C2 según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, que aunque no es un agua de mala calidad, sí está condicionada, por lo tanto se debe continuar monitoreándola y hacer otros análisis para realizar una buena interpretación (Furcal y Castillo, 1993).

En la figura 5 se puede apreciar la red de drenaje de la cuenca, la cual tiende a concentrar rápidamente el agua en el desagüe de la misma.

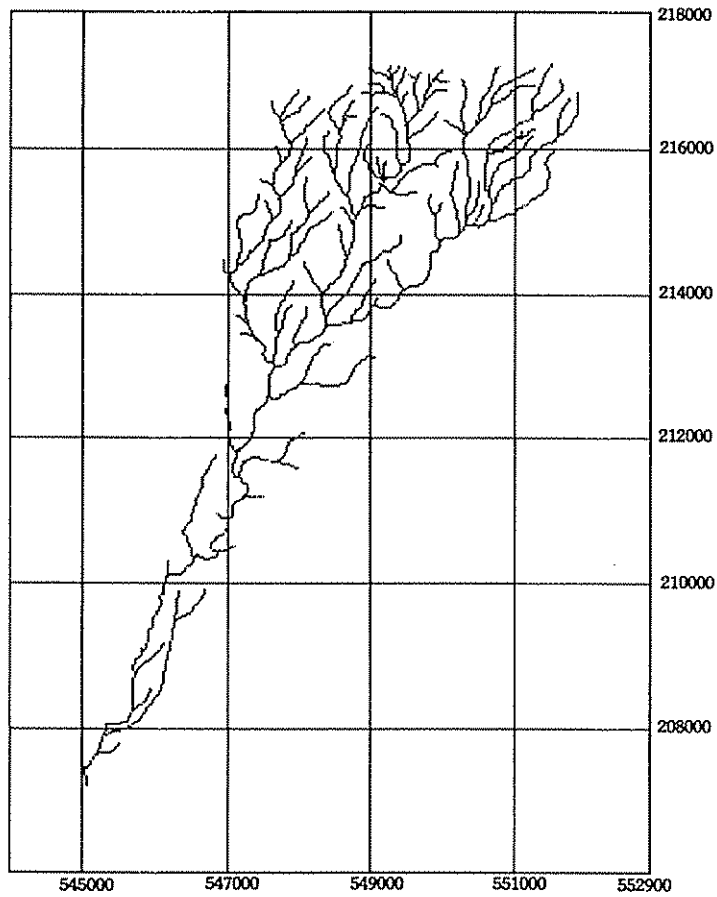
2.13.7. Información sobre aspectos relativos al recurso hídrico en el área de estudio.

La información existente sobre estudios de calidad de aguas realizados en la cuenca es escasa.

La mayor parte de la información relacionada con el recurso hídrico consiste de información meteorológica sobre precipitación de la estación ubicada en Sanatorio Durán localizada a 9°56' latitud norte y 83°53' longitud oeste y 2337 msnm la cual opera desde 1943.

Con motivo de la planificación del proyecto de riego Tierra Blanca, la empresa consultora Bell Ingeniería presentó información sobre resultados de análisis de algunos parámetros de calidad del agua de muestras tomadas en el Río Reventado.

Como se mencionó anteriormente, el SENARA a su vez realizó algunos monitoreos sobre la calidad y cantidad del agua que recibe del río (cuadro 2A, Anexo).



Metros

2808.11

CATIE

Proyección
Lambert

Figura 5. Red de drenaje de la Cuenca del Río Reventado

Fuente: Sánchez, 1993.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material utilizado

El material empleado fué el siguiente:

Material de campo:

- Termómetro, potenciómetro, miniconductivímetro, tubo para medición de turbiedad, correntómetro Teledyne Gurley, varillas, cinta métrica, balde, cronómetro y flotador, frascos y nevera.

Material de apoyo y transporte:

Vehículo de doble tracción, mapas escala 1:50,000 y 1:10.000, fotografías aéreas, libreta de anotaciones y cámara fotográfica, sistema de posicionamiento global GPS Garmin Personal Surveyor II.

Equipo de cómputo y sistema de información geográfica:

Microcomputadora IBM, mesa digitalizadora, impresora Hewlett Packard Deskjet 1200, estereoscopio.

3.2. Selección de los puntos de muestreo

Para la selección de los puntos de toma de muestra se consideraron simultáneamente aspectos como orden de cauce, representatividad, accesibilidad, uniformidad y referencia de datos previos.

Un primer paso muy importante en el diseño de un programa de muestreo es identificar cuidadosa y claramente la "población" o universo a ser muestreado. Aún cuando este paso es importante en cualquier caso, lo es aún más si el muestreo pretende proveer una sinopsis amplia del sistema, o para monitorear las tendencias a largo plazo.

Las propiedades topológicas de la red de drenaje no están asociadas en una manera simple con otros parámetros de importancia fisiográficos y de uso de la tierra. Algunas regiones, por ejemplo, pueden situarse parcialmente dentro de provincias fisiográficas (planicie, valle, cordillera,

meseta). Se asume implícitamente que un parámetro que está siendo medido tiene características distribucionales a través de toda la región; para muchos componentes de la calidad del agua esto no es cierto. El uso de la tierra es bastante heterogéneo dentro de muchas de las regiones. Como resultado, los parámetros de la calidad del agua que son fuertemente influenciados por el uso de la tierra pueden variar mucho de punto a punto dentro de una región particular.

También surge el problema de la independencia. Puede ser razonable asumir la independencia de errores de medición en dos observaciones diferentes. Sin embargo, al menos que estén separados por fuentes puntuales identificables, generalmente no es el caso que dos observaciones tomadas en el mismo canal son totalmente no correlacionadas, especialmente si las observaciones están aproximadas en distancia y en tiempo. En resumen, al menos que no haya flujo proveniente de regiones superiores, la calidad del agua dentro de una región particular no depende solamente de los factores en esa región (Liebetrau, 1979).

Una vez que se abandonan los intentos de definir una población de muestreo en términos de espacio, y el interés se enfoca en la propia red de drenaje, es medianamente fácil describir una población de muestreo que sea compatible para una variedad de metas. Topológicamente, una red de drenaje consiste de enlaces, o segmentos, los cuales se unen en nodos.

El tomar la población muestral del conjunto de todos los enlaces en la red de drenaje tiene muchas ventajas. Primero, cada enlace corresponde a una región única de cuenca del río. Esta región es la unión de todos los puntos en la red de drenaje abastecida por ya sea el enlace en cuestión o algún enlace aguas arriba; es decir, es una subcuenca la cual tiene aguas abajo el nodo del enlace en

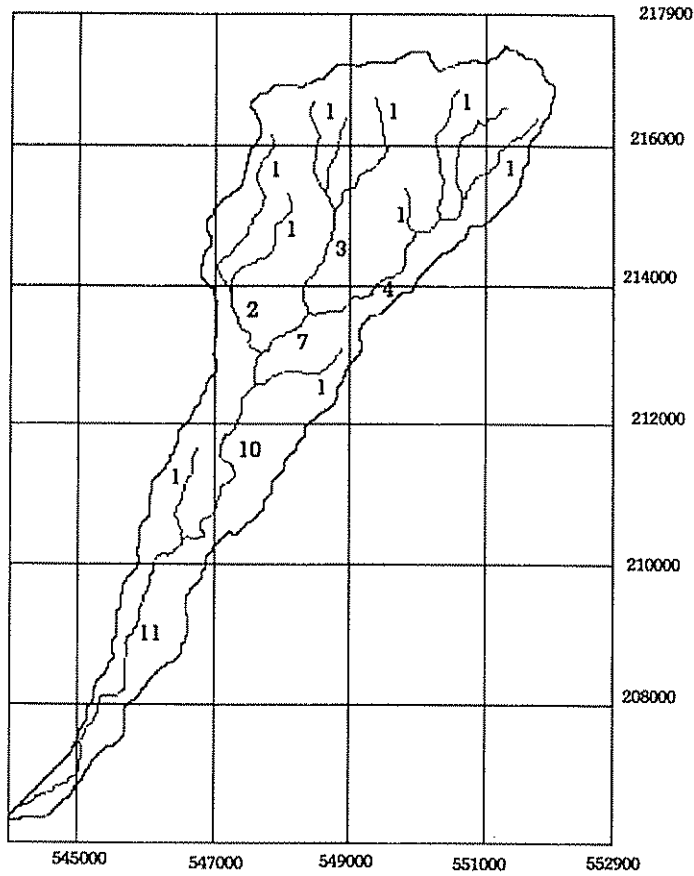
cuestión como desagüe. Junto con la información acerca del uso de la tierra, podemos usar esta asociación entre un segmento y su región de drenaje para mejorar la estimación de las contribuciones de fuentes difusas a la calidad del agua dentro de un alcance dado.

El número total de enlaces generalmente es manejable. La naturaleza jerárquica de los números de orden de cauce puede usarse para establecer una red estratificada de estaciones de muestreo para cubrir la cuenca entera de acuerdo con los requerimientos específicos de datos, limitaciones de costos, etc.

Scheidegger y Shreve (citados por Sharp, 1971) describieron un procedimiento para numerar cada sección de un cauce en términos del número de ramales tributarios o fuentes. En este sistema al numerar cada tributario se le asigna una magnitud de 1. Cada uno de estos tributarios es una sección de canal llamado enlace exterior que comienza en un punto llamado naciente o fuente y termina en un punto llamado confluencia.

Cuando dos enlaces exteriores se unen para formar una confluencia, a la sección aguas abajo se le asigna una magnitud de 2. Cada vez que dos enlaces tanto interiores como exteriores de magnitudes M_1 y M_2 se unen, el enlace interior resultante tiene una magnitud M_1+M_2 . Aplicando este procedimiento de numeración a un mapa de red de drenaje, se puede asignar un valor de magnitud a cada sección de canal y al desagüe (boca) de cualquier cuenca. En la figura 6 se clasifican los cauces de la cuenca del río Reventado, se debe considerar que este no es el sistema tradicional propuesto por Horton y Strahler.

Si una cuenca tiene N nacientes o N enlaces exteriores, la magnitud del desagüe también será N . En el caso usual de una red de canales donde cada confluencia consiste en dos



Metros
2808.11

CATIE

Proyección
Lambert

Figura 6. Orden de confluencia de los cauces permanentes

enlaces que vienen y uno solo que sigue, el número de enlaces e y el número de confluencias c están relacionados al número de fuentes por las ecuaciones $e=2N-1$ y $c=N-1$ (Sharp, 1971).

Debido a su importancia, se decidió previamente establecer cuatro puntos de muestreo; uno antes y otro después de una fuente puntual de contaminación como lo es el tajo del camino a Llano Grande, el tercero en la toma de agua de la represa de SENARA, contando en éste último con datos previos de algunos parámetros de calidad y cantidad del agua y el cuarto en el nacimiento del cauce principal. Mediante referencias de mapas y recorridos en la zona se ubicaron los cauces superficiales permanentes, se los identificó en el mapa, y se le asignó a cada segmento el número de orden de cauce correspondiente.

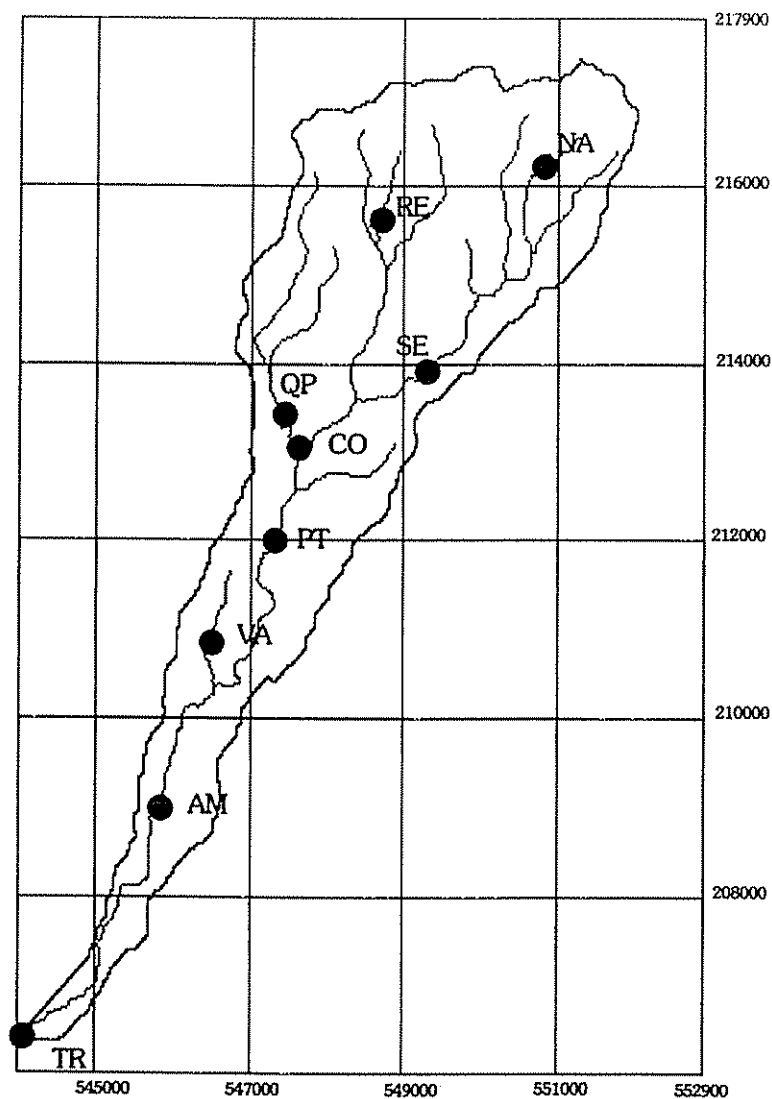
Se descartaron los segmentos correspondientes a las cuatro estaciones que se habían determinado previamente y las estaciones de muestreo se asignaron aleatoriamente entre los segmentos restantes.

La red de muestreo propuesta quedó entonces con nueve estaciones distribuidas en las zonas alta, media y baja de la cuenca (figura 7).

3.3. Selección de los indicadores a evaluar

Se seleccionaron parámetros de calidad del agua, que fueron considerados como indicadores de la situación ambiental. La selección de los parámetros se hizo casi exclusivamente en base a la revisión bibliográfica de investigaciones similares, aunque también entraron en consideración factores como disponibilidad y costos de los análisis en laboratorio y para algunos casos, la carencia de equipo especial y personal especializado.

Parámetros que se midieron rutinariamente fueron: Temperatura, pH, conductividad, turbidez, calcio, sodio,



Leyenda

- Puntos de muestreo
- NA = Naciente
- RE = Río Retes
- QP = Quebrada Pavas
- SE = Toma de SENARA
- CO = Confluencia Pavas-Reventado
- PT = Puente T. B.-Ll. Grande
- VA = Quebrada Rodeo
- AM = Antes del tajo
- TR = Taras



Metros

2808.11

CATIE

Proyección
Lambert

Red de muestreo en la cuenca del río Reventado

potasio, cloruros, magnesio, sulfato, amonio, dureza, nitrato, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos en suspensión. Eventualmente se analizaron residuos de plaguicidas y concentración de bacterias coliformes. Mediante fórmulas de conversión se calcularon la dureza y la relación de absorción de sodio (RAS).

En el cuadro 1 se presenta una breve descripción de la importancia de cada una de ellas y en el cuadro 2 los criterios de calidad de agua.

3.4. Frecuencia de muestreo

De acuerdo al objetivo de evaluar el comportamiento de un conjunto de indicadores a lo largo de un período, se realizó un muestreo por mes durante siete meses (de abril a octubre), los cuales se iniciaron el día 19 de abril y terminaron el 7 de octubre de 1994. El período entre muestreos fué de aproximadamente 30 días. Se escogió esta frecuencia en consideración a factores como el tiempo de procesamiento en laboratorio, costos de transporte y análisis.

Cuadro 1. Criterios para selección de indicadores

Indicador	Importancia
Cloruros	Es un buen indicador de residuos y desperdicios animales.
Conductividad	Es un estimador simple de sólidos disueltos y un índice de contaminantes inorgánicos.
Oxígeno disuelto	Es un indicador de niveles con depresión de oxígeno causado por carga de sedimento orgánico.
Bacterias coliformes fecales	Indican contaminación causada por desechos humanos o animales.
Nitrato	Es un indicador del nitrógeno contenido en los fertilizantes o pesticidas altos en N.
Fosfato	Es indicador de contaminación por fosfato proveniente de fertilizantes y detergentes.
Sodio y Potasio	Son indicadores de la mineralización de las aguas, altas concentraciones de sodio son insatisfactorias para agua para riego.
pH	Es una medición valiosa para interpretar los rangos de solubilidad de los componentes químicos.
Temperatura	Es un requisito para el pH y la conductividad y una medición útil para interpretar los rangos de solubilidad de los parámetros químicos.

Cuadro 1. Continuación

Indicador	Importancia
Sólidos totales	Es un índice de contaminantes inorgánicos en cauces, los sólidos totales aumentan con concentraciones crecientes de iones (por ejemplo metales tóxicos disueltos).
Sólidos en suspensión	Es un indicador del transporte de sedimentos, que pueden acarrear metales tóxicos.
Turbidez	Es un estimador simple de los sólidos en suspensión.
Calcio y magnesio	Indicadores de la dureza del agua
Coliformes totales	Es indicador de contaminación fecal a menudo asociada con deficiente funcionamiento de tanques sépticos, sin embargo el grupo de coliformes totales contiene más organismos del suelo y otras bacterias de origen natural, por eso no es siempre indicador de polución.
Aluminio y hierro	Indicadores de toxicidad en el agua de riego cuando el pH del agua es ácido.
Sulfatos	Indicadores de la composición iónica.

Adaptado de Kunkle y Flora, 1987.

Cuadro 2. Criterios de calidad de agua para varios usos

Aluminio

1 mg/litro para riego (Moore, 1968).

Hierro

0.3 mg/l para suministro doméstico

1.0 mg/l para vida acuática

Amoniaco

0.02 mg/l para vida acuática

Dureza

Concentración mg/l CaCO_3

0- 75 suave

75-150 moderada

150-300 dura

300 y más muy dura

Nitratos y amonio

10 mg/l de nitrógeno como máximo para agua potable.

0.9 mg/l ya afecta la eutroficación de las aguas.

0.3 mg/l de nitrógeno inorgánico promueve el desarrollo de malezas acuáticas en lagos (Daniel *et al*, 1994).

Oxígeno disuelto

Vida acuática: Una concentración mínima de 5.0 mg/l.

pH

Rango

5 -9 Suministro doméstico

6.5-9.0 Vida acuática

6.5-8.5 Vida marina

Fósforo

0.01 mg/l de fósforo inorgánico ha sido identificado como un nivel crítico que promueve el desarrollo de malezas acuáticas en lagos (Daniel *et al*, 1994).

Sodio y Potasio

A partir de 50 ppm ya se considera insatisfactorio para uso industrial y para riego.

Conductividad eléctrica

Entre 750 y 800 μmohs es el límite máximo para riego.

400 μmohs para consumo (Barbiroli *et al*, 1992).

Cuadro 2. Continuación

Sólidos totales

1000 mg/l para la agricultura

Sólidos disueltos

250 mg/l para suministro doméstico

Sólidos en suspensión

100 mg/l por el color

Cloruros

250 mg/l como máximo para la agricultura.

Magnesio

150 mg/l como máximo para uso doméstico.

Calcio

75 mg/l es el máximo deseable para uso doméstico.

Sulfato

200 mg/l es el máximo deseable para uso doméstico.

3.5. Descripción de los puntos de muestreo

A continuación se presenta una breve descripción de las estaciones de muestreo, el código asignado y algunos aspectos relevantes de las mismas. En el cuadro 3 se indica la ubicación de los diferentes puntos y el área que drena hacia cada uno de ellos. En la figura 8 se demarcan las áreas de drenaje (subcuencas) de los diferentes puntos de muestreo.

Estación: Parque Prusia Código: NA

Ubicado en la parte superior del parque Prusia, es el nacimiento principal del río Reventado, se dice que antes ese lugar era una laguna que quedó enterrada por la avalancha de lava de 1963. El lugar está ahora densamente reforestado principalmente por eucaliptos, lo cual según algunos pobladores, ha producido una considerable disminución de la cantidad de agua en el río.

Estación: Tajo San Blas Código: AM

Este es un lugar justo antes de que las aguas del río sean contaminadas por los sedimentos provenientes de las actividades de extracción de materiales de construcción del tajo ubicado en el deslizamiento de San Blas.

Existe un pequeño embalse del cual se bombea agua hacia partes superiores donde se lava la arena, este embalse ocasiona que el cauce no siga su flujo natural y se altere el caudal.

Estación: Quebrada Rodeo Código: VA

Es una quebrada de caudal muy pequeño, que en la estación seca es prácticamente nulo, sin embargo es importante especialmente porque constituye el drenaje de un área con un alto porcentaje de actividad agrícola.

Estación: Toma de SENARA Código: SE

Es el lugar de donde SENARA capta el agua que la lleva a su reservorio para luego ser distribuida entre los usuarios del sistema de riego durante la estación seca. Es un lugar de donde se tienen registros previos de caudal y análisis químico, es periódicamente monitoreado por el SENARA.

Estación: Río Retes Código: RE

El río Retes es el afluente más importante del río Reventado, este punto de muestreo está ubicado en la zona alta de la cuenca, donde es predominante la cobertura boscosa y charral.

Estación: Puente Tierra Blanca-Llano Grande Código :PT

El puente está ubicado aproximadamente en el centro de la cuenca, entre las dos poblaciones más importantes de la zona de estudio. Existen datos previos de medición de caudal en este lugar.

Estación: Quebrada Pavas Código: QP

La quebrada Pavas es un afluente importante del río Reventado, este sitio de muestreo queda sobre el camino hacia Finca Retes.

Estación: Pavas-Reventado Código: CO

En este lugar se produce la confluencia entre la Quebrada Pavas y el Río Reventado, ubicado en la zona media de la cuenca.

Estación: Taras Código: TR

Corresponde al punto más bajo estudiado en este trabajo. Ubicado en el camino antiguo Cartago-San José, bajo un pequeño puente, pocos metros antes hay una extracción de arena por particulares.

Cuadro 3. Localización de los puntos de muestreo

Lugar	Código	Area de Drenaje(ha)	Localización Geográfica		Elevación (msnm)
			X	Y	
Parque Prusia	NA	*	550500	216200	3200
Río Retes	RE	32.13	548950	215330	2596
Toma de Senara	SE	509.58	549350	213900	2480
Quebrada Pavas	QP	307.35	547490	213200	2181
Pavas-Reventado	CO	1469.00	547670	212860	2163
Puente T.B.-L.G.	PT	1633.59	547650	212950	2100
Quebrada Rodeo	VA	50.31	546430	210770	2003
Tajo San Blas	AM	2038.68	545670	208740	1643
Taras	TR	2135.25	543800	206250	1442

* Naciente del río.

Fuente: Elaborado por el autor.

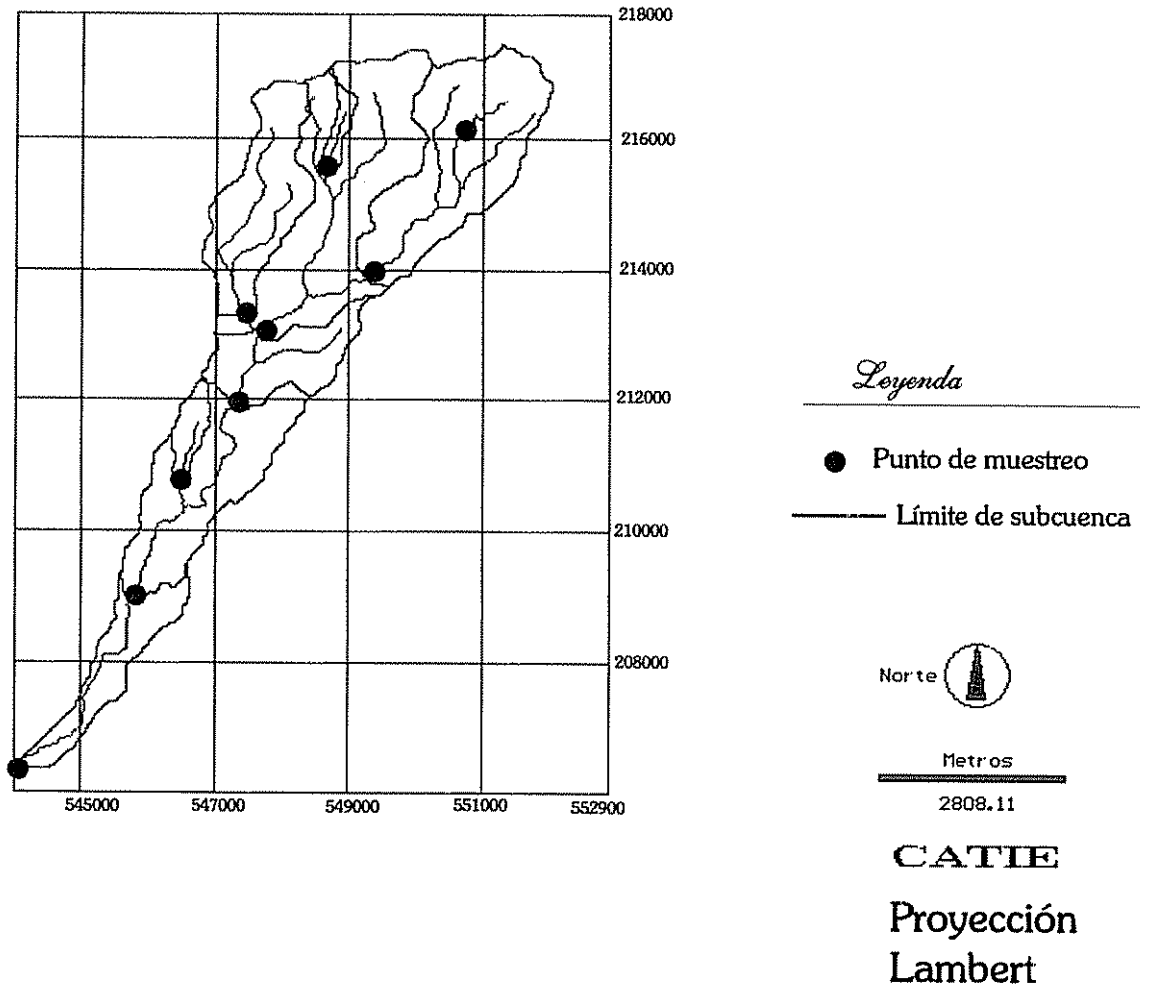


Figura 8. Areas de drenaje de los puntos de muestreo en la Cuenca del Río Reventado.

3.6. Metodología de análisis

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de grados centígrados con columna de mercurio; la conductividad eléctrica se obtuvo mediante lectura directa con un miniconductivímetro Hach, el pH también con lectura directa en medidor de pH (potenciómetro); para el calcio, magnesio, potasio y sodio, lecturas de absorción atómica en espectrofotómetro Perkin Elmer; el oxígeno disuelto se determinó por el método Azida que consiste en precipitación con hidróxido de manganeso, adición de yoduro de potasio y titulación con una solución de tiosulfato de sodio; para los cloruros se utilizó el método de Mhor o volumétrico; para los sulfatos se empleó el método turbidimétrico que consiste en precipitar con cloruro de bario en medio ácido y leer la turbidez en espectrofotómetro; el fosfato se determinó mediante el método colorimétrico; los nitratos mediante destilación con aleación de Devarda; el amonio mediante destilación con óxido de magnesio y titulación con ácido sulfúrico; para los sólidos totales se empleó estufa a 105°C hasta sequedad, método de residuo de evaporación; los sólidos en suspensión mediante filtración en papel Whatman 934-AH.

En el caso de determinar el caudal del río se emplearon tres métodos:

- 1) Empleo del flotador, midiendo la sección transversal del río y la velocidad del flotador en recorrer una distancia determinada.
- 2) Empleo de correntómetro (molinete) Teledyne Gurley.
- 3) En caso de corrientes muy pequeñas, se cronometraba el tiempo que tardaba en llenar un recipiente con volumen conocido.

3.7. Sistema de información geográfica

En base a la información existente en mapas topográficos, mapas de uso de la tierra, fotografías aéreas y mapas en formato raster, se hizo una apreciación previa de la ubicación de los puntos de muestreo.

Una vez definidos los puntos en el campo, se determinó la ubicación de cada punto en el mapa topográfico hoja Istarú escala 1:50.000. Para algunos puntos fué relativamente fácil asignar su ubicación, mientras que para otros se empleó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) trabajando en el modo diferencial.

Con el programa GARMIN se pudieron obtener las coordenadas en sistema lat-long de los puntos de muestreo, y luego con el programa CONVERT se convirtieron al sistema Lambert Norte, en el cual está representado cartográficamente este sector del territorio costarricense.

Luego de identificar la posición de cada estación en el mapa, se procedió a digitalizar los puntos utilizando el módulo TOSCA.

A partir del modelo de elevación digital de la cuenca elaborado por Sánchez, mediante el comando WATRSHEd de IDRISI se determinó el área que drena a cada punto, es decir la subcuenca que tiene como desagüe el punto en cuestión. Procediendo a utilizar el comando OVERLAY y la opción Multiply entre cada subárea y el mapa de uso de la tierra reclasificado, se obtuvieron mapas de uso de la tierra para cada subcuenca, de los cuales se extrajeron las áreas de cada uso de la tierra con la instrucción AREA y sus correspondientes porcentajes.

Utilizando la opción DISTANCE se calculó la distancia de cada estación hasta el punto de muestreo más bajo (Taras).

3.8. Análisis estadístico de los datos

El objetivo del análisis fué determinar si se presentan diferencias estadísticamente significativas entre indicadores que califiquen la calidad del agua y muestren su comportamiento a lo largo de la cuenca. También se estudió la significancia entre las diferentes estaciones de muestreo con respecto a los indicadores analizados y si se presentaron diferencias en el tiempo. Además se hizo un análisis que tuvo por objetivo exponer las relaciones de los indicadores entre sí y un análisis para conocer las relaciones entre los indicadores y el uso de la tierra y otras características de la cuenca que podrían tener influencia sobre ellos.

Como primer paso se estimaron los valores faltantes o "missing values", para ello se corrió un modelo de regresión múltiple en el programa estadístico SAS con la opción "Stepwise" que ajusta el mejor modelo por pasos sucesivos, ya que selecciona automáticamente las variables independientes que producen el mayor coeficiente de correlación, y así se obtuvieron los mejores modelos de predicción para aquellas variables que presentaban información incompleta y los correspondientes valores predichos. Este no es el procedimiento ideal para completar los datos faltantes (Zou y Yu, 1994) porque se asume que las variables independientes fueron tomadas sin una medición del error y no considera que algunas variables exógenas pueden influir indirectamente sobre los parámetros estudiados, pero es el método más práctico.

También se procedió a desplegar una matriz de correlación entre las características de la calidad del agua. En esta matriz se identifica el tipo de asociación positiva o negativa entre los indicadores medidos.

Se ejecutó un análisis de varianza y se aplicó una prueba Duncan de comparación de medias para analizar el

comportamiento de diversas variables respecto a respecto al lugar, fecha y hora de muestreo.

Como siguiente paso, después de haber analizado el comportamiento en el tiempo y el espacio de las variables que constituyen la calidad del agua y las correlaciones entre ellas, se trató de determinar la influencia de ciertas características biofísicas de las zonas de drenaje sobre los indicadores de calidad del agua.

Las características escogidas para este análisis fueron: número de orden de cauce, precipitación, latitud, longitud, altitud, distancia a la desembocadura, área y porcentaje de uso urbano, forestal, cultivos perennes, pastizales, hortícola y área de los tajos y nuevamente se recurrió al procedimiento de correlación de SAS (PROC CORR) para analizar las correlaciones entre ambos sets de variables.

Seguidamente se hizo un análisis multivariado de los datos. El análisis multivariado, a diferencia del univariado, permite considerar simultáneamente el comportamiento de todas las variables involucradas, presentando así un enfoque mucho más global.

El primer método multivariado aplicado corresponde al procedimiento CANDISC de SAS que realiza un análisis discriminante canónico.

El análisis discriminante canónico es una técnica de reducción de la dimensión asociada al análisis de componentes principales y a la correlación canónica. Dada una variable de clasificación y varias variables cuantitativas, el procedimiento CANDISC elabora variables canónicas (combinaciones lineales de las variables cuantitativas) que resumen la variación entre clases de una manera semejante a la que los componentes principales resumen la variación total (SAS Institute, 1988). Las clases a discriminar

vinieron identificadas por las estaciones o sitios a lo largo de la cuenca

Se utilizó análisis discriminante con objetivos descriptivos para: a) representar el conjunto de observaciones, permitiendo verificar si estamos realmente en presencia de grupos bien diferenciados y b) encontrar la variable o conjunto de variables que mejor discriminen a los grupos preestablecidos de observaciones.

El análisis discriminante canónico permite representar diferencias entre los sitios de muestreo y determinar cuales variables de constituyentes de la calidad de agua son las que influyen en mayor proporción a establecer esas diferencias.

Dados dos o más grupos de observaciones con mediciones en varias variables cuantitativas, el análisis discriminante canónico elabora una combinación lineal de las variables que tienen la mayor correlación múltiple posible con los grupos. Esta máxima correlación múltiple se llama la primera correlación canónica. Los coeficientes de la combinación lineal son los coeficientes canónicos o pesos canónicos. La variable definida por la combinación lineal es la primer variable canónica o componente canónico. La segunda correlación canónica se obtiene encontrando la combinación lineal no correlacionada con la primer variable canónica que tiene la mayor correlación múltiple posible con los grupos. El proceso de extraer variables canónicas puede repetirse hasta que el número de variables canónicas sea igual al número de las variables originales menos uno.

El segundo método multivariado utilizado fué el de análisis de conglomerados o cluster. Este análisis se aplicó con el objeto de visualizar un diagrama de árbol de agrupamiento de las variables que caracterizan la calidad del agua según su correlación. El análisis Cluster permite simplificar la estructura de los datos encontrando grupos de objetos

o variables que sean similares entre sí. Para conformar los conglomerados se utilizó $1-r^2$ como medida de distancia.

Este análisis ha sido utilizado por varios investigadores de los recursos hídricos, por ejemplo por Basso, Machin y Pellicer (1992) para crear un dendrograma de similaridad de la composición química de las aguas de drenaje de Bardenas I, España.

3.9. Índices de calidad de agua

Los índices se determinaron mediante el siguiente procedimiento:

- a) Determinación y selección de los parámetros (variables) que contribuyen a la calidad del agua.
- b) Identificación del intervalo de variabilidad de los parámetros.
- c) Introducción de factores de peso para cada uno de los parámetros.
- d) selección de funciones de normalización (lineal o no-lineal) para la transformación de los valores de los parámetros seleccionados en sub-índices comparables con intervalos de variabilidad uniformes.
- e) Adopción de una función de agregación que permita concluir con un índice global final (I_g) a partir de los sub-índices del punto d).

Los rangos de variabilidad se definieron en base a los valores reportados en la literatura y a estándares normativos.

La transformación de los valores asumidos por los parámetros en sub-índices se caracteriza por un rango que vá de 0 (nivel mínimo de calidad) a 100 (máximo nivel de calidad). Si los resultados de todos los análisis se convierten a un porcentaje de contaminación, el agua es evaluada no sólo en términos que sean fácilmente comprendidos por la mayoría de la gente, sino que se suministra un

número (calificación) que puede interactuar algebraicamente con los otros números de cada tipo de análisis de agua (Dinius, 1972).

La función lineal utilizada para la transformación de los parámetros: turbidez, calcio, sodio, potasio, magnesio, sulfato, fosfato, amonio, sólidos totales y en suspensión y trato corresponde a:

$$I_i = \frac{100 (x_{i,\max} - x)}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}$$

donde $x_{i,\min}$ y $x_{i,\max}$ representan los extremos de los rangos del i -ésimo parámetro, correspondiente, respectivamente, al mínimo y máximo nivel de contaminación, mientras que I_i corresponde al i -ésimo parámetro.

En los casos de pH, conductividad eléctrica, cloruros y dureza se utilizaron ecuaciones específicas elaboradas por Dinius (1972) adaptadas para cada uno de ellos (Cuadro 4C, anexo).

Las ecuaciones presentadas pueden adaptarse y modificarse para cada situación en particular, y debe tenerse en cuenta que en muchos casos se debe sacrificar perfección por pragmatismo, en el momento de reflejar la preferencia de los usuarios en el uso de standards de calidad.

Es aquí donde se recomienda recurrir a los estándares o criterios permisibles de cada uno de los constituyentes, para establecer los límites máximos, de esta manera se puede hacer una mejor evaluación del agua.

Los índices se pueden interpretar de la siguiente manera:

Entre 0 y 30 Muy mala
entre 30 y 50 Mala
entre 50 y 70 Regular
entre 70 y 90 Buena
entre 90 y 100 Excelente

Si se desea hacer una ponderación de la influencia de cada indicador, es recomendable hacer una clasificación de cada una de ellos dentro de grupos o subíndices, que para el caso serían:

Indicadores orgánico-bacteriológicos:

Oxígeno disuelto, coliformes totales, coliformes fecales.

Indicadores químicos (iónicos):

Conductividad eléctrica, pH, calcio, magnesio, sulfatos, magnesio, nitratos, fosfatos, potasio, cloruros, sulfatos.

Indicadores físicos:

Sólidos totales, disueltos y en suspensión, turbiedad, temperatura.

Debido a que no todos los indicadores tienen la misma importancia sobre la sostenibilidad, deberían ser ponderados según criterios que asignen un peso a cada uno de ellos, aunque este procedimiento abre muchas posibilidades de error. Estos pesos deberían ser asignados con el consejo de expertos, aunque la mayoría de los índices no son extremadamente sensibles a los pesos escogidos.

Los indicadores se agrupan bajo tres subíndices: orgánico-bacteriológico o biológico, químico y físico.

El índice global ponderado resultante es un indicador de sostenibilidad ecológica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción general de la cuenca del río Reventado

Después de procesar el modelo de elevación digital elaborado por Sánchez (1993), se determinó que la zona de estudio comprende un área de 2281.6 hectáreas, de las cuales 925.7 ha. están ubicadas en la zona alta (2600-3400), 1001.1 ha. en la zona media (1900-2600) y 353.5 hectáreas en la zona baja (1400-1900msnm) (figura 9).

Las pendientes predominantes en la cuenca son: 34% en la cuenca alta, 26% en la cuenca media y 19% en la cuenca baja (cuadro 4), dentro de un rango de 0 a 110%, aunque también hay pendientes de 170%.

Cuadro 4. Area y pendiente promedio de las zonas alta, media y baja de la cuenca del Río Reventado

Zona	Area (ha)	Pendiente %
Alta	925.74	34
Media	1001.07	26
Baja	353.5	19

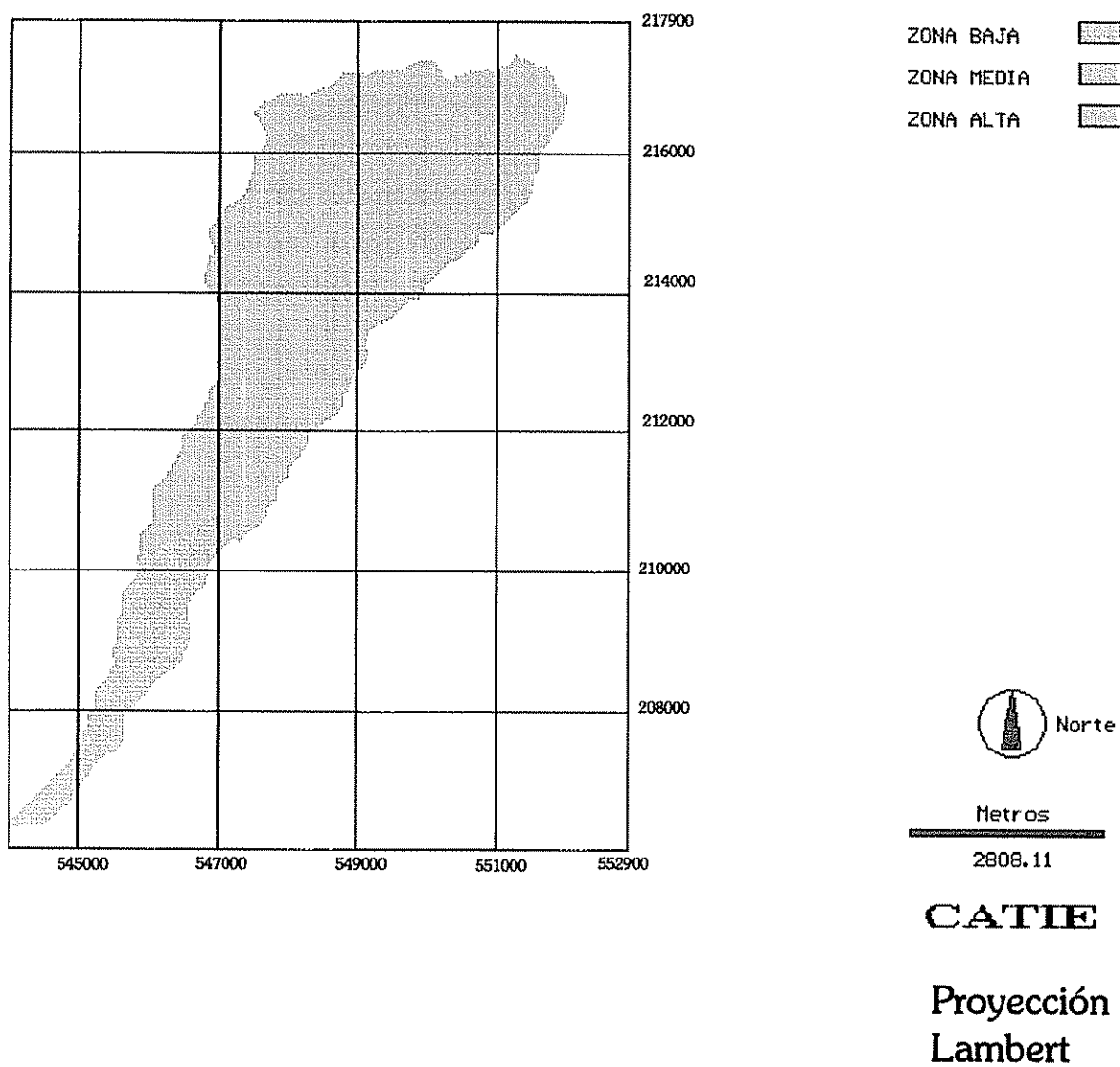


Figura 9. Zonas de la cuenca del río Reventado

4.2. Resultados del análisis estadístico.

El análisis de varianza y los coeficientes de variación indican que hay variaciones espaciales y temporales en las concentraciones de los elementos (cuadro 5). Del análisis de varianza desarrollado en el programa de cálculo estadístico SAS se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas al nivel de 5% entre los lugares de muestreo para las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, turbidez, calcio, oxígeno disuelto, sodio, cloruros, sulfatos, amonio, nitratos, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos en suspensión y caudal; no así para potasio, magnesio ni fosfatos. Se encontraron diferencias entre las fechas de muestreo para pH, conductividad, oxígeno disuelto, sodio, amonio y sólidos en suspensión. Para amonio incluso se detectaron diferencias en cuanto a la hora de muestreo.

Para el caso de los sólidos totales, disueltos y sólidos en suspensión, se hizo una transformación logarítmica con el fin de uniformizar el rango de los valores.

Cuadro 5. Resumen del análisis de varianza de los indicadores en los diferentes puntos de muestreo.

Variable	Valor F	C.V.	Promedio
pH	247.32 **	2.30	6.963
Conductividad (µmohs)	22.57 **	13.92	413.672
Turbiedad (JTU)	47.82 **	40.51	134.400
Calcio (mg/l)	17.27 **	18.64	38.825
Oxígeno disuelto (mg/l)	10.78 **	9.10	8.203
Sodio (mg/l)	15.93 **	11.63	11.44
Potasio (mg/l)	4.08 n.s.	20.18	7.702
Cloruro (mg/l)	6.99 *	18.42	11.581
Magnesio (mg/l)	4.68 n.s.	32.43	15.415
Sulfato (mg/l)	14.30 **	27.74	133.959
Fosfato (mg/l)	3.11 n.s.	68.47	0.458
Amonio (mg/l)	9.04 *	76.54	0.249
Nitrato (mg/l)	14.30 **	69.04	0.765
Sólidos totales (logaritmo) (mg/l)	35.98 **	8.85	6.669
S. en suspensión (logaritmo) (mg/l)	41.15 **	21.65	4.247
Sólidos disueltos (m/l)	12.12 **	111.46	1030.74

** Altamente significativo (Pr<0.01)

* Significativo (Pr<0.05)

n.s. No significativo (Pr>0.05).

4.2.1. pH

El pH es una de las variables que presentó menor coeficiente de variación en el tiempo, pero sí hubieron diferencias altamente significativas entre los puntos de muestreo.

Los valores más bajos se encuentran en la zona alta de la cuenca, desde el mismo nacimiento en el parque Prusia y en la toma de SENARA, donde se registran promedios de 4.2 y 4.3 respectivamente, el pH del cauce cambia a valores neutros a medida que se desciende en la cuenca (cuadro 6).

El problema que se presenta es que precisamente en la toma de SENARA es donde el pH es muy bajo, o sea que el agua se comporta como un ácido débil, y esta agua se almacena para distribuirse entre los usuarios del sistema de riego para producción agrícola. Un pH tan bajo no es recomendable para riego, pues tiende a solubilizar cationes tóxicos para las plantas como aluminio, hierro y manganeso. Además que en ciertas circunstancias, como suelos arenosos con poca materia orgánica, con poca capacidad de amortiguamiento, el pH del agua de riego puede disminuir el pH del suelo. El agua con pH menor de 4.8 aplicada a suelos ácidos por un período de tiempo posiblemente aporta hierro soluble, aluminio o manganeso en concentraciones suficientemente grandes para ser tóxicas para el crecimiento de las plantas (Moore, 1968).

En suelos ácidos como lo son las 60 hectáreas que reciben riego en el Proyecto Tierra Blanca, la calidad del agua que reciben puede tener un efecto negativo sobre el pH del suelo. Para contrarrestar este efecto, los agricultores se verían obligados a encalar con mayor frecuencia.

Cuadro 6. Resumen estadístico del pH de las aguas de la cuenca del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	4.2	-
SE	4.6	5.2	4.8	4.1
RE	7.0	7.5	7.3	2.6
QP	7.4	7.8	7.7	1.8
CO	6.0	7.7	7.2	8.2
PT	6.4	8.1	7.5	7.3
VA	7.0	7.9	7.5	3.9
AM	6.8	7.9	7.5	4.4
TR	6.3	7.2	6.9	4.8

Criterio: Valor óptimo de pH : entre 6.5 y 8.4 para riego

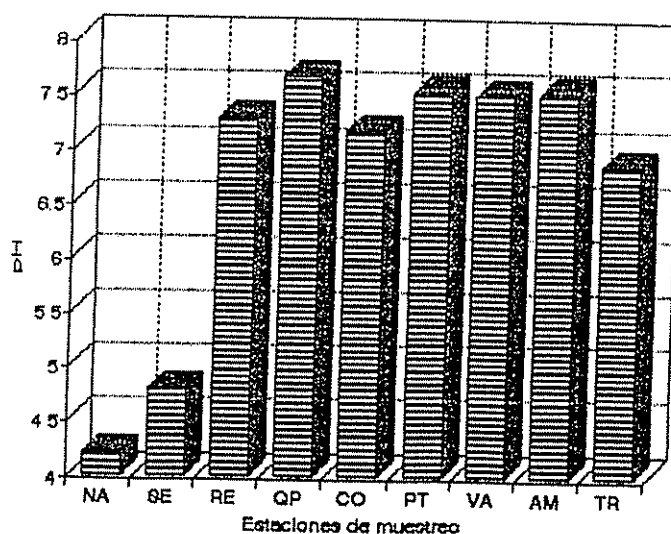


Figura 10. Valores promedio de pH observados en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del Río Reventado.

4.2.2. Temperatura

La temperatura también presentó coeficientes de variación muy bajos en cada punto de muestreo, pero sí existen diferencias entre los sitios y entre fechas de muestreo (cuadro 7).

Cuadro 7. Resumen estadístico de la temperatura en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Promedio	C.V.
NA	-	-	11.5	-
SE	12.0	16.0	13.7	8.87
RE	12.0	14.0	12.9	5.37
QP	14.0	15.0	14.6	2.56
CO	14.0	15.0	14.5	3.13
PT	14.0	16.0	15.3	4.57
VA	14.0	16.5	15.4	5.62
AM	15.0	22.0	17.9	11.58
TR	17.0	26.0	19.7	15.96

La temperatura varió en forma inversamente proporcional con la altitud del punto de muestreo.

Una regresión simple entre los promedios de temperatura y las altitudes nos dá la función:

$$\text{Temperatura} = 28.456 - 6.4026 \cdot 10^{-1} (\text{Altitud})$$

donde la temperatura está expresada en grados Celsius y la altitud en metros sobre el nivel del mar. El coeficiente de correlación entre temperatura y altitud (r) es -0.93 .

No se detectaron variaciones de temperatura por otras causas que no sean las naturales.

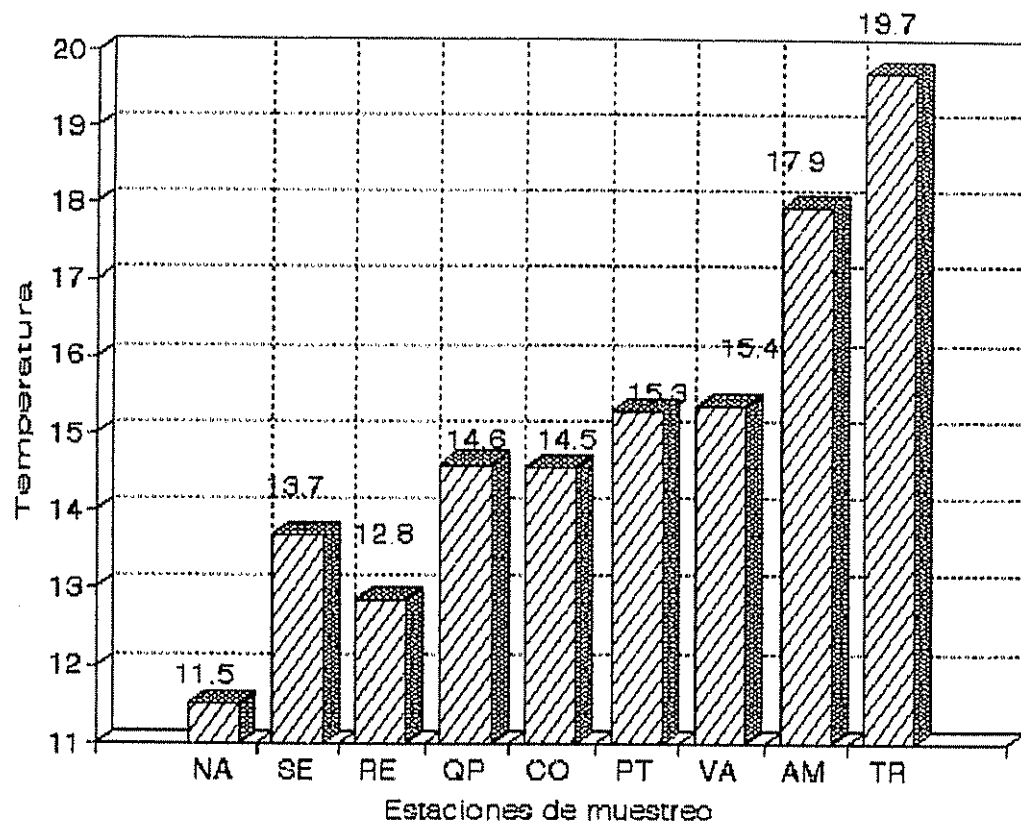


Figura 11. Valores promedio de temperatura en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.3. Conductividad eléctrica

Los valores más altos se dan en la zona alta de la cuenca, y los valores menores corresponden a los afluentes Quebrada Pavas, Retes y Rodeo (cuadro 8). En Taras, el punto de muestreo más bajo se registra un repunte de la conductividad, presumiblemente por las actividades de extracción de arena. Todos los valores caen dentro de un rango aceptable, las aguas con menos de 750 micromohs/cm no ocasionan problemas y se consideran de buena calidad para riego (Stromberg, 1980) y sólo en el nacimiento del río y en el desagüe de la cuenca se podrían encontrar valores que difieran del criterio óptimo.

Cuadro 8. Resumen estadístico de la conductividad en las aguas del río Reventado (μmohs).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	820	-
SE	410	620	531.4	13.41
RE	270	440	365.7	18.26
QP	260	340	295	11.29
CO	270	620	455.3	25.29
PT	320	560	430	18.36
VA	130	330	248.3	28.97
AM	240	560	391.3	26.61
TR	340	790	502.9	30.44

Criterio: Valores menores a 750 micromohs no tienen ninguna restricción para riego.

La conductividad presentó correlación con la concentración de sulfatos (figura 12).

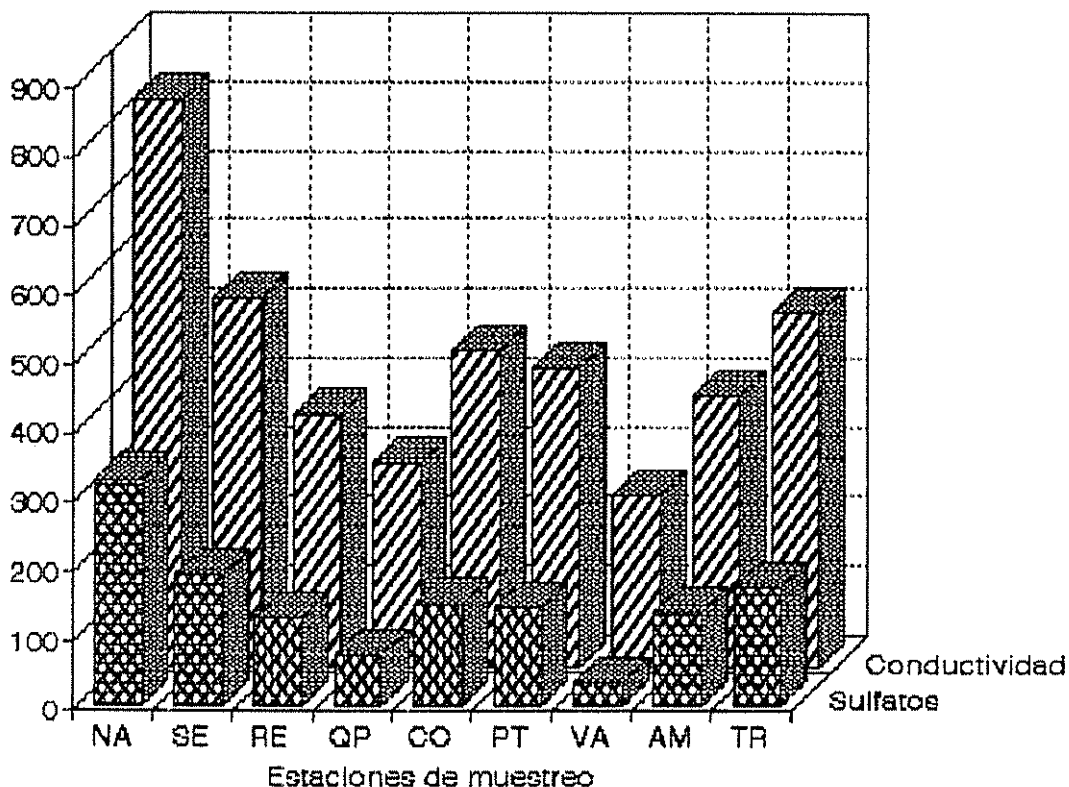


Figura 12. Promedios de conductividad eléctrica y sulfatos en las diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.4. Turbidez

Este indicador sí presentó un coeficiente de variación elevado tanto en el tiempo como en el espacio. Sin embargo este coeficiente fué bajo en la estación de SENARA, donde se registraron valores bajos de turbidez, y fué igual a cero en Taras, es decir que siempre, independientemente de la fecha y otros factores, el agua presentó el máximo nivel de turbidez, como consecuencia principalmente de las actividades de extrac-

ción de arena y actividades urbanas (figura 13). La turbidez fué medida en el sistema Jackson Turbidity Units (JTU).

En el cuadro 9 se puede apreciar que los coeficientes de variación pueden ser muy altos, es decir que se pueden esperar cambios considerables respecto a turbidez, los cuales se producen como consecuencia principalmente del contenido de sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía.

Cuadro 9. Resumen estadístico de la turbidez en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	5	-
SE	5	30	13.1	66.83
RE	15	280	65.4	145.84
QP	17	300	80.7	136.06
CO	18	500	144.3	165.81
PT	20	290	87.3	105.69
VA	2	500	95	209.5
AM	16	500	123.3	125.61
TR	500	500	500	0.00

Criterio: Valor máximo para suministro doméstico: 50 JTU

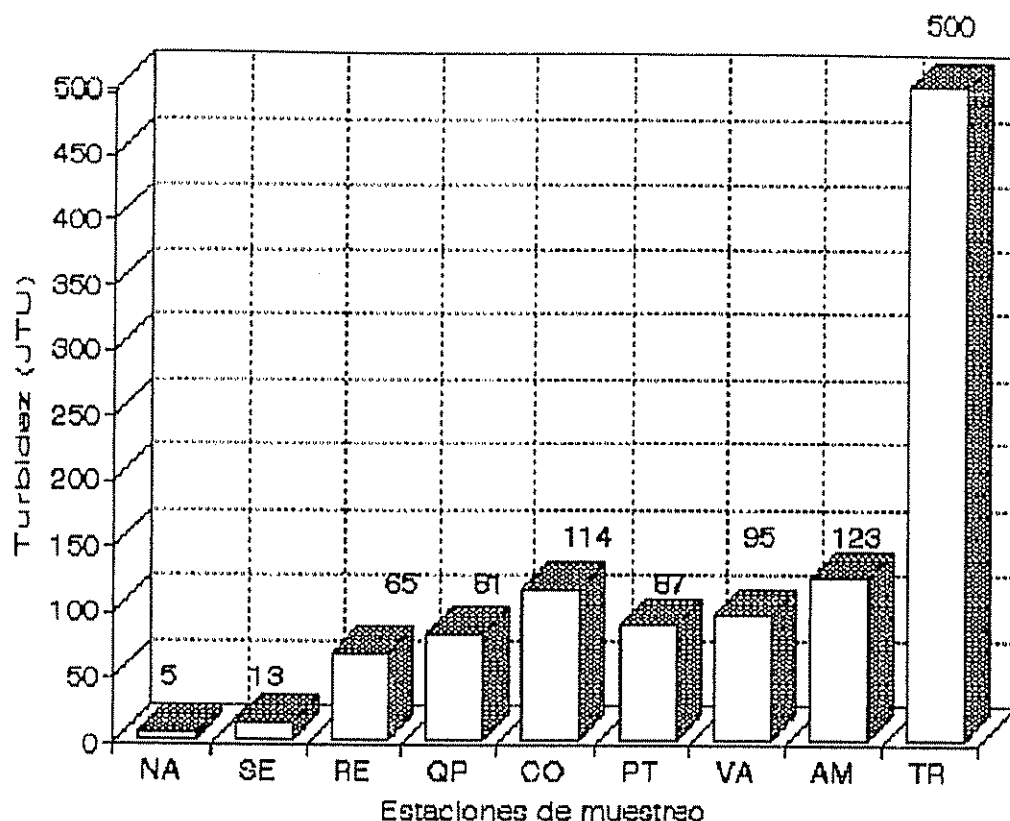


Figura 13. Valores promedio de turbidez en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.5. Calcio, magnesio y sodio

El calcio y el magnesio son elementos que determinan la dureza del agua. La toxicidad del sodio, generalmente se evalúa a partir de la relación de adsorción de sodio o RAS, en la que intervienen las concentraciones de sodio, calcio y magnesio.

En las aguas de la zona alta, con mayor influencia volcánica, se presentan las mayores concentraciones de calcio, magnesio y sodio, en Taras (punto de muestreo más bajo) también se encuentran concentraciones altas, las concentraciones menores corresponden a los afluentes (quebradas Pavas, Rodeo y Retes). Los demás puntos están en una situación intermedia (figura 14).

La concentración de calcio es baja en todos los sitios estudiados (cuadro 10). Lo mismo sucede con los valores de sodio (cuadro 11) y magnesio (cuadro 12).

Cuadro 10. Resumen estadístico de calcio en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	78.0	-
SE	48.9	61.6	52.1	8.91
RE	33.81	38.0	35.8	4.6
QP	22.8	25.7	24.5	4.65
CO	25.7	49.0	40.0	23.44
PT	35.7	49.2	42.9	9.51
VA	10.8	20.7	18.6	20.61
AM	20.0	46.3	38.3	20.35
TR	39.5	65.0	48.0	17.55

Criterio: Valor máximo desable para uso doméstico: 75 mg/l.

Cuadro 11. Resumen estadístico de sodio en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	16.2	-
SE	10.7	16.0	14.0	13.20
RE	8.9	13.0	11.3	12.30
QP	8.4	10.6	9.3	10.77
CO	7.4	14.7	11.5	22.14
PT	10.1	13.0	11.5	8.73
VA	5.2	9.5	7.6	20.28
AM	6.7	14.0	11.0	22.87
TR	8.3	18.0	13.8	20.89

Criterio: Valor máximo para riego y uso industrial: 50 mg/l.

Cuadro 12. Resumen estadístico de magnesio en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	17.0	-
SE	16.0	23.8	18.97	14.03
RE	10.0	14.1	12.79	10.33
QP	10.0	11.8	10.77	5.87
CO	8.9	17.5	13.78	24.62
PT	13.3	19.3	15.86	11.95
VA	5.2	9.5	7.6	20.28
AM	8.6	18.9	14.76	19.72
TR	14.0	41.4	23.99	37.29

Las concentraciones de calcio, magnesio y sodio no indican peligro de acumulación de sales.

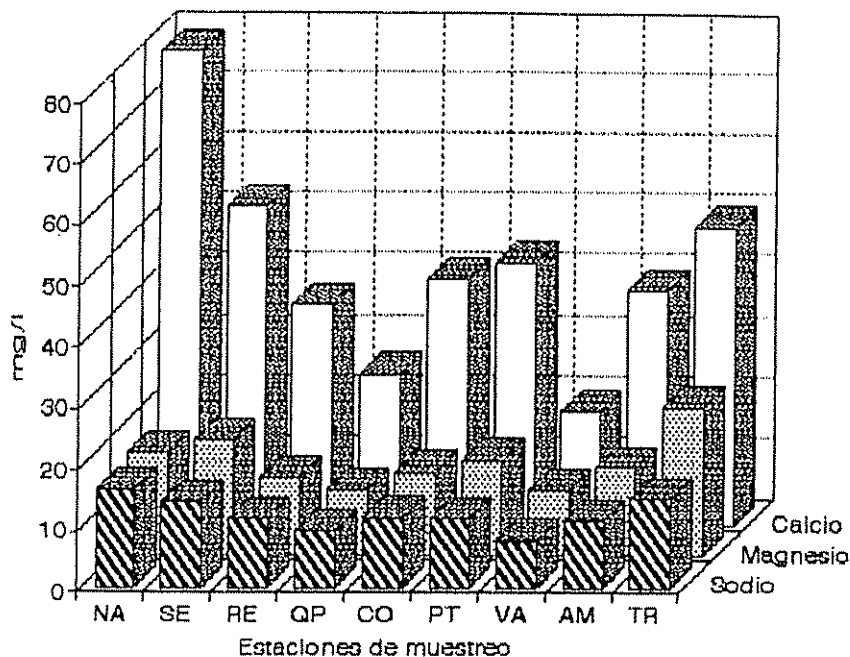


Figura 14. Valores promedio de sodio, magnesio y calcio en la cuenca del Río Reventado.

4.2.6. Potasio

El potasio es, así como el sodio, un metal del grupo de los metales alcalinos.

No se encontraron diferencias significativas entre los puntos de muestreo respecto al contenido de potasio (figura 15). Los suelos tienen un alto contenido de potasio, lo cual podría explicar que no se detecten grandes diferencias aunque la concentración es ligeramente superior en el último tramo del río, como lo indica la prueba en Taras, en la zona baja (cuadro 13).

Cuadro 13. Resumen estadístico de potasio en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	7.5	-
SE	6.8	8.1	7.4	5.9
RE	4.0	6.6	5.8	16.41
QP	6.6	8.3	7.6	9.15
CO	5.3	15.2	8.3	41.75
PT	5.3	8.0	7.1	12.34
VA	5.2	11.8	7.7	31.0
AM	5.5	11.1	7.5	23.09
TR	8.6	11.6	10.3	9.62

Criterio: No se reporta una concentración máxima de potasio que sea tóxica.

Como se verá más adelante, existe una correlación entre las concentraciones de potasio y los niveles de turbidez.

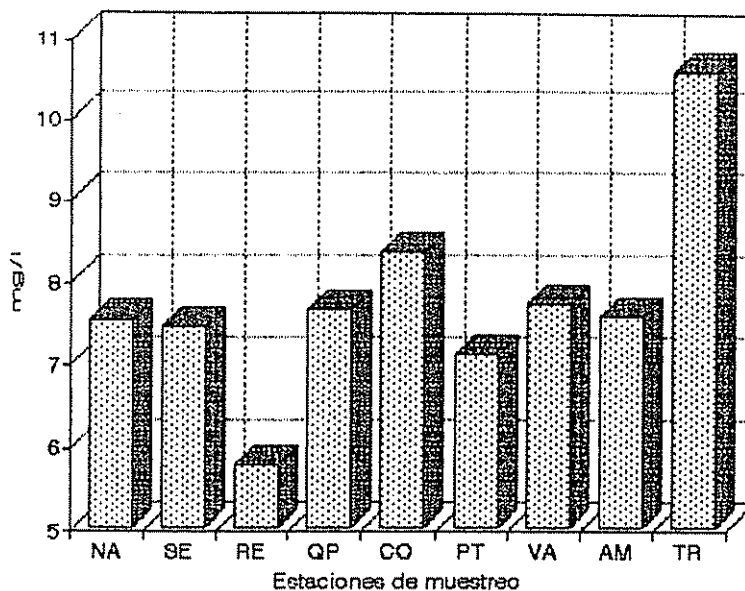


Figura 15. Concentraciones de potasio en la cuenca del río Reventado.

4.2.7. Oxígeno disuelto

Una disminución de los niveles de oxígeno disuelto por debajo de los estándares aceptables puede acabar con la vida acuática. Los niveles bajos de oxígeno disuelto usualmente indican altos niveles de aguas residuales y de desperdicios industriales.

Cuadro 14. Resumen estadístico de oxígeno disuelto en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	6.20	-
SE	6.20	9.90	8.46	14.29
RE	7.20	10.80	8.62	13.76
QP	7.90	9.60	8.89	7.06
CO	6.71	10.20	8.48	15.84
PT	7.30	10.10	8.87	10.80
VA	7.55	10.0	8.70	9.91
AM	6.90	10.10	8.12	13.87
TR	2.01	7.70	5.99	32.61

Criterio: El nivel mínimo para vida acuática es de 5 mg/l.

En la cuenca se observan diferencias significativas respecto a los puntos y fechas de muestreo, aunque el coeficiente de variación es relativamente bajo (18%). La separación de medias mediante Duncan muestra dos grupos: uno conformado por Taras; y el otro grupo por todos los demás puntos de muestreo, con valores muy semejantes, sin diferencias significativas entre estos últimos.

Las muestras extraídas de los sitios que están ubicados antes del tajo de San Blás, tienen un alto contenido de oxígeno disuelto, mayor a 5 mg/l que es el mínimo para vida acuática (figura 16).

En el punto de muestreo ubicado en el desagüe de la cuenca, la concentración de oxígeno disuelto puede disminuir considerablemente, a causa del arrojado de aguas residuales y materia orgánica en el último tramo del río, producto de actividades urbanas (cuadro 14). En el nacimiento del río, el

contenido de oxígeno disuelto puede ser un poco bajo, debido a que el agua está recién emergiendo.

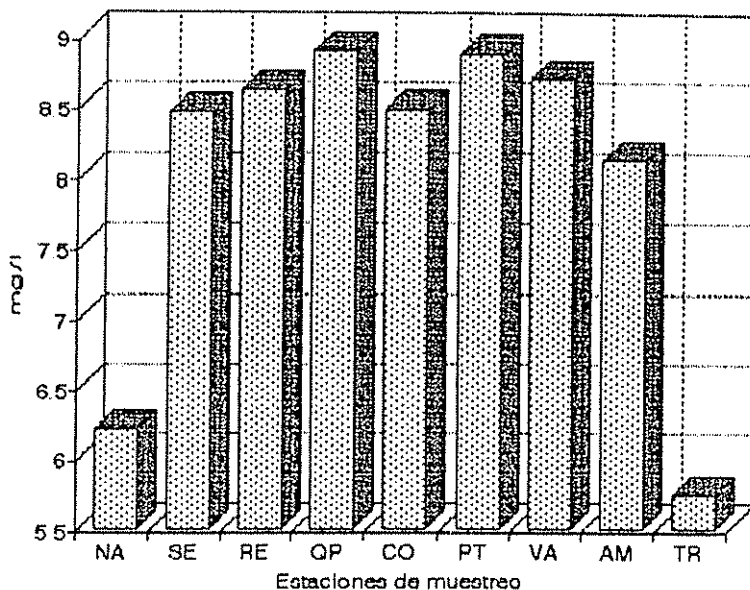


Figura 16. Concentraciones promedio de oxígeno disuelto en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.8. Cloruros

Se encontraron diferencias altamente significativas (nivel 1%) entre las concentraciones en los diferentes sitios de muestreo.

Las concentraciones más altas se dan en Taras, Senara y en el nacimiento del río y los más bajos en la Quebrada Rodeo y en Quebrada Pavas, por lo que el cloruro parece también presentarse en mayor concentración por la influencia volcánica (cuadro 15).

Cuadro 15. Resumen estadístico de cloruro en las aguas del río Reventado.

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	13.2	-
SE	10.6	23.66	13.87	32.89
RE	7.10	14.79	11.67	21.91
QP	5.32	14.79	8.67	37.59
CO	10.63	17.75	12.85	19.48
PT	10.0	14.2	12.2	13.43
VA	5.53	11.83	8.25	26.18
AM	8.86	11.83	9.86	13.63
TR	10.63	17.75	14.54	22.0

Criterio: La concentración máxima para riego es de 250 mg/l.

El cloruro es corrosivo para muchos usos industriales y es una sal muy tóxica del agua para riego (Dinius, 1972), sin embargo, los valores encontrados en la cuenca están lejos de considerarse peligrosos.

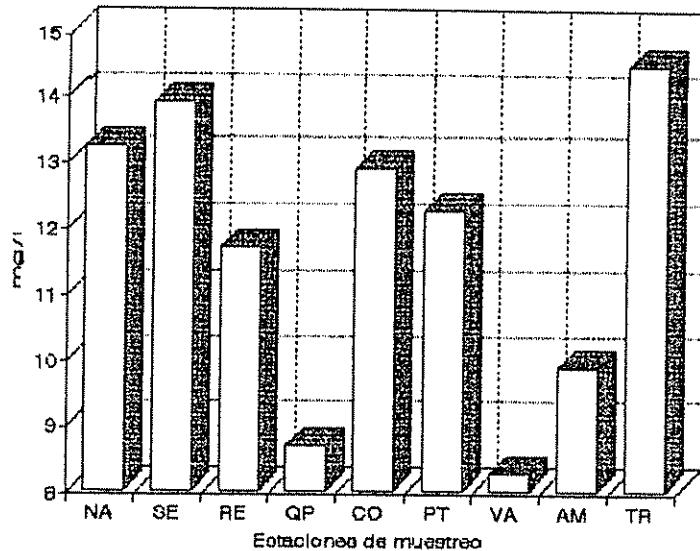


Figura 17. Valores promedio de cloruros encontrados en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.9. Sulfatos.

Se encontraron diferencias altamente significativas entre los contenidos de sulfato en los diferentes puntos muestreados.

Estas concentraciones fueron mayores en la zona alta de la cuenca debido a la influencia volcánica (cuadro 16). En la zona media toma valores bajos, y en el punto de muestreo más bajo, nuevamente la concentración es alta, esto como consecuencia de las operaciones de extracción de arena, que exponen una gran cantidad de material mineral a la corriente del río.

Cuadro 16. Resumen estadístico de sulfatos en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Promedio	C.V.
NA	-	-	326	-
SE	158.0	228.1	188.7	16.26
RE	85.9	174.0	126.6	23.04
QP	64.0	88.0	73.6	12.59
CO	112.8	191.1	147.4	21.17
PT	104.0	170.0	140.5	19.46
VA	17.6	41.8	31.9	32.15
AM	17.3	200.0	135.2	40.32
TR	136.9	269.7	178.8	31.31

Criterio: La concentración máxima deseable para uso doméstico es de 200 mg/l.

4.2.10. Fosfatos

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas al nivel de 5% en la cuenca respecto a fosfatos.

Las mayores concentraciones se dan en la zona media y baja de la cuenca, donde hay mayor actividad agrícola y extracción de arena y las menores en la zona alta, donde prevalece el bosque y charrales (figura 18).

La pérdida de fósforo del suelo en forma de escorrentía puede ser como fósforo disuelto o en sedimentos. La escorrentía proveniente de tierra de pastizales o de bosque acarrea poco sedimento y predomina el fósforo disuelto (Daniel, 1994).

Cuadro 17. Resumen estadístico de la concentración de fosfatos en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Promedio	C.V.
NA	-	-	0.20	-
SE	0.03	0.40	0.19	64.60
RE	0.08	0.80	0.29	79.54
QP	0.24	0.60	0.40	31.90
CO	0.23	0.64	0.37	38.77
PT	0.27	0.60	0.41	32.32
VA	0.63	1.73	0.94	42.58
AM	0.35	1.19	0.61	41.04
TR	0.10	1.20	0.50	75.12

Criterio: A partir de 0.01 mg/l ya se promueve el crecimiento de malezas acuáticas. Es común encontrar en las aguas de riego concentraciones entre que llegan hasta 2 mg/l.

Los suelos de la cuenca del Río Reventado en la zona media tienen baja retención de fósforo. En el estudio de suelos de parcelas de Tierra Blanca, elaborado por MAG/FAO, se reporta que en todos los perfiles muestreados se encuentra una alta disponibilidad de fósforo, esto puede ser causado por la alta fertilización de fósforo por muchos años, lo que es común en esta zona, en combinación con una retención del fósforo que es relativamente baja (Enckevort *et al.*, 1994).

El movimiento del fósforo disuelto en la escorrentía es un proceso que ocurre mientras la precipitación interactúa

con una delgada capa de la superficie del suelo (<2 cm), antes de abandonar el suelo como escorrentía (Daniel, 1994).

El fósforo se suministra a los cultivos hortícolas de la zona principalmente a través de fertilizante comercial, y en muy pocos casos como abono animal. La correlación altamente significativa entre fosfatos y precipitación parece confirmar que las pérdidas por escorrentía son generalmente mayores en el corto plazo.

Los resultados indican que existe suficiente fósforo en las aguas del río como para promover el crecimiento de plantas acuáticas.

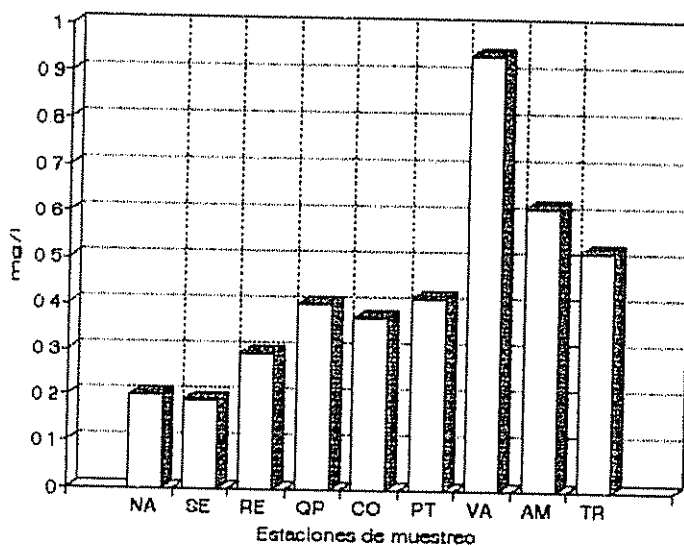


Figura 18. Valores promedio de fosfatos en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado.

4.2.11. Nitratos y amonio

Se encontraron diferencias altamente significativas para nitratos y amonio en los diferentes puntos de muestreo. En el caso del amonio se detectaron diferencias significativas incluso para fecha y hora de muestreo.

En general, ambos indicadores tuvieron promedios más altos en los puntos más bajos de la cuenca y las concentraciones disminuyen al ir ascendiendo (cuadro 18).

Cuadro 18. Resumen estadístico de las concentraciones de nitrato en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Promedio	C.V.
NA	-	-	0.0	-
SE	0.0	0.0	0.0	-
RE	0.0	4.45	0.77	213.0
QP	0.58	1.58	1.03	40.40
CO	0.0	0.79	0.29	118.73
PT	0.0	1.11	0.50	73.99
VA	0.82	4.15	2.76	44.28
AM	0.0	0.79	0.39	74.28
TR	0.32	1.50	0.79	<u>56.84</u>

Criterio: Concentraciones de 0.9 mg/l y mayores afectan la eutrofización de las aguas. Concentraciones menores a 5 mg/l no causan problemas para riego.

El nitrato existe de forma natural en el suelo y en las aguas. La mineralización transforma el nitrógeno orgánico en amonio (NH_4^+). La escorrentía de agua en los suelos agríco-

las es el flujo de agua sobre la superficie del suelo, de modo que no se infiltra en el campo, sino que fluye normalmente hacia terrenos mas bajos o cursos superficiales de agua. Se produce como consecuencia de lluvias o riegos excesivos y puede arrastrar cantidades variables de N. En general, estas pérdidas de N del suelo son pequeñas, excepto cuando la escorrentía se produce poco después de un abonado nitrogenado (Ramos y Ocio, 1992).

En la Quebrada Rodeo se registran las mayores concentraciones de nitratos, esta subcuenca es la de mayor porcentaje de uso agrícola. Las menores concentraciones se registran en la zona alta (figura 19).

El contenido de nitratos y de amonio es mayor después de que el agua pasa por el tajo.

Cuadro 19. Resumen estadístico de las concentraciones de amonio en las aguas del río Reventado (mg/l).

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Promedio	C.V.
NA	-	-	0.0	-
SE	0.00	0.37	0.05	264.58
RE	0.00	1.24	0.18	264.58
QP	0.00	1.30	0.22	244.95
CO	0.00	0.82	0.14	244.95
PT	0.00	1.73	0.25	264.58
VA	0.00	0.00	0.00	-
AM	0.00	1.24	0.39	130.36
TR	0.00	2.60	0.74	142.80

Criterio: 9 mg/l afecta la eutroficación de las aguas.

Las mayores concentraciones de amonio se registraron durante la época seca, esto podría ser debido a que en esta época se produce una mayor mineralización del nitrógeno.

Las concentraciones de nitrógeno están por debajo de los niveles establecidos como máximos para el agua potable, sin embargo, ya causan problemas de eutrofización de las aguas.

La eutrofización es el enriquecimiento en nutrientes de las aguas superficiales (ríos, lagos, embalses y océanos). Este enriquecimiento, aún en cantidades mínimas, produce el crecimiento de algas y microorganismos, y el incremento de materia orgánica, que al descomponerse consume el oxígeno, produciendo consecuencias negativas en el ambiente, como la muerte de organismos poco resistentes a concentraciones bajas de oxígeno (Verduin, 1970).

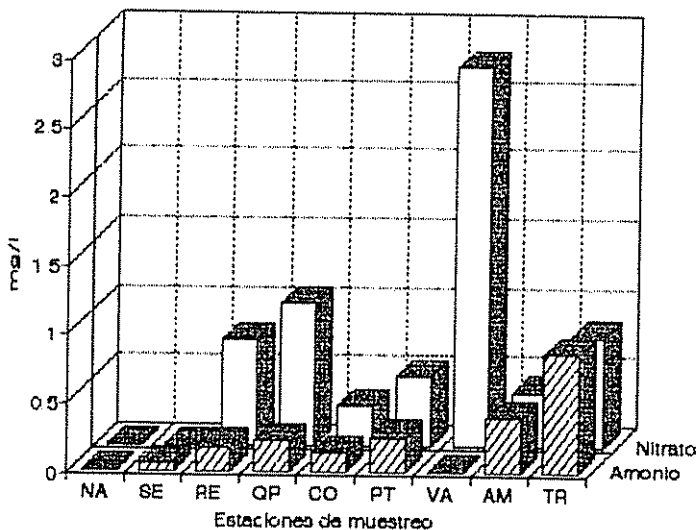


Figura 19. Valores promedio de nitrato y amonio en la cuenca del río Reventado.

Los nutrientes que normalmente estimulan el crecimiento de la vegetación acuática en estas aguas son el nitrógeno y el fósforo. El crecimiento de plantas acuáticas se considera perjudicial, porque, cuando éstas mueren y se descomponen, consumen el oxígeno y pueden producir la muerte de los peces, en otros casos, el crecimiento de algas y otras plantas acuáticas resulta indeseable porque dificulta el flujo del agua por los canales y ríos, y disminuye la capacidad de estas aguas en los embalses.

4.2.12. Sólidos totales, disueltos y en suspensión.

Los sólidos presentaron diferencias altamente significativas respecto a los sitios y fecha de muestreo. La clasificación de los promedios muestra que la estación de Taras se distancia considerablemente de todos los demás puntos de muestreo, esto es sin duda atribuible a las actividades de extracción de materiales de construcción (cuadro 20).

La posibilidad de encontrar mayor concentración de sólidos en el agua es mayor cuanto más bajo esté el punto de muestreo dentro de la cuenca (figura 20).

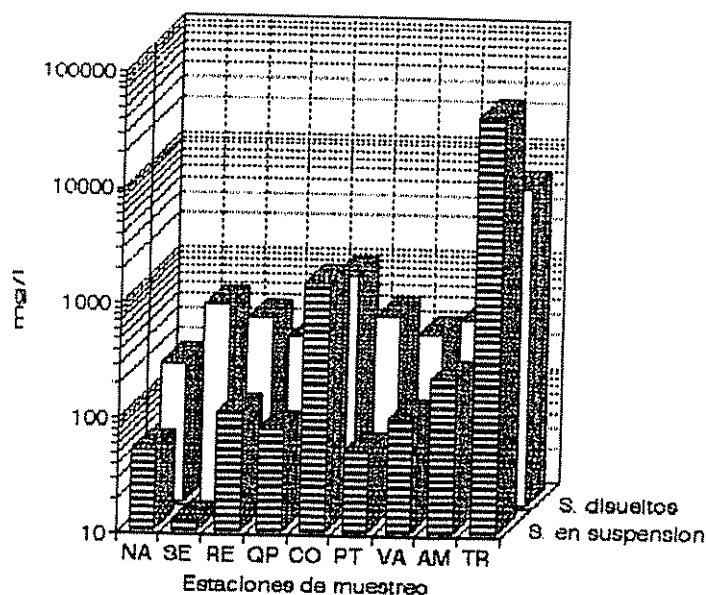


Figura 20. Valores promedio de sólidos disueltos y en suspensión en diferentes estaciones de muestreo en la cuenca del río Reventado. Escala logarítmica.

Cuadro 20. Resumen estadístico de los contenidos de sólidos disueltos en las aguas del río Reventado (mg/l).

Punto de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	11.5	-
SE	452	600	503.9	9.64
RE	324	517	398.4	20.68
QP	230	327	276.5	13.00
CO	410	3340	939.3	125.24
PT	400	450	417.4	4.07
VA	215	549	298.6	42.31
AM	287	620	404.7	23.65
TR	644	9490	4995.4	61.83

Criterio: El máximo aceptable para suministro doméstico es 250 mg/l y para riego el óptimo es menos de 450, mientras que más de 2000 mg/l presenta severas restricciones de uso.

Cuadro 21. Resumen estadístico de las concentraciones de sólidos en suspensión en las aguas del río Reventado.

Estación de muestreo	Mínimo	Máximo	Prome- dio	C.V.
NA	-	-	50	-
SE	4	22	12	46.65
RE	10	505	108.6	170.86
QP	3	360	77.2	181.11
CO	7	8420	1426.5	240.18
PT	5	240	51.6	163.45
VA	4	520	97.6	212.04
AM	10	1090	214.5	166.56
TR	5450	130100	35155.7	126.94

Criterio: El nivel tolerable para uso doméstico es de 100 mg/l.

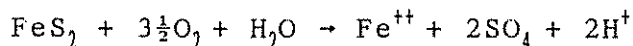
4.2.13. Hierro y aluminio

Cuando el pH del agua es menor que 4.5, metales como hierro, aluminio, cobre y níquel pueden disolverse y contaminar el agua (Curtis *et al.*, 1988).

Se hicieron análisis de la concentración de hierro y aluminio y se detectó su presencia en las estaciones de muestreo de Taras, toma de Senara y en el nacimiento del río, estos análisis no se hicieron rutinariamente y sólo en algunos puntos, por lo que no se presentan gráficos.

La oxidación amarillenta que se observa a lo largo del cauce del río en la zona alta de la cuenca puede deberse a la presencia de hidróxidos de hierro y sulfatos de hierro.

El proceso de oxidación del hierro o material pirítico no está completamente comprendido pero a menudo se describe por la ecuación:



la cual produce ión hidrógeno (H^+) que tiene un gran efecto ambiental por acidificar el agua.

La concentración de aluminio en la zona alta de la cuenca es de 3 mg/l, la cual está por encima del nivel tolerable para riego que es 1 mg/l, lo cual es un problema especialmente en la toma de agua del proyecto de riego de Tierra Blanca, porque puede causar toxicidad de aluminio en los cultivos.

La concentración de hierro de las muestras analizadas está dentro de los niveles aceptables.

4.2.14. Bacterias coliformes

En todos los puntos muestreados se encontró la presencia de bacterias coliformes (Cuadro 2D anexo), por lo que se aconseja hervir el agua antes de consumirla.

También se encontraron bacterias coliformes fecales en las muestras a excepción de la correspondiente al nacimiento.

Se hizo éste análisis en una sólo fecha y sólo en

algunas estaciones, sería interesante repetir el análisis en otras estaciones y épocas, para llegar a conclusiones más sólidas, considerando que éste es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua y del funcionamiento del ecosistema.

4.2.15. Residuos de plaguicidas

No se detectaron residuos de plaguicidas en las muestras analizadas (Cuadro 3D, Anexo). Esto no significa que no puedan existir residuos en el agua del río, posiblemente el lugar, momento y procedimiento de muestreo, o el método de análisis no fueron los más adecuados. Hay que recordar que es muy difícil encontrar residuos en las aguas superficiales, debido a que las concentraciones son tan bajas y se diluyen rápidamente.

4.3. Análisis multivariado

4.3.1. Análisis discriminante canónico

Este análisis produjo la derivación de variables canónicas (combinaciones lineales de las variables cuantitativas) que resumieron la variación entre clases (sitios de toma de muestras).

Las primera variable Can1 explica un 59.93% de la variación, con la segunda Can2 se llega a un 82.97% de variación acumulada y con la tercera a un 93.52%.

La primera variable Can1 está muy correlacionada con el pH, conductividad, calcio, sodio, cloruros, magnesio y sulfatos, en forma inversa con nitratos y fosfatos, es decir representa un componente químico. Las estaciones con los mayores promedios son las que están ubicadas en el cauce principal del río, y las estaciones con menores promedios son aquellas ubicadas en los cauces afluentes (figura 21), por lo que aparentemente esta variable está relacionada con la influencia volcánica sobre las aguas. Esto lo puede

explicar el hecho de que desde el mismo nacimiento del río, el pH es muy bajo, es decir es un agua ácida, con alta conductividad eléctrica, un contenido iónico mayor (sulfatos, sodio, cloruros). Este contenido vá disminuyendo su concentración en el río a medida que los afluentes se van anexando al mismo, y en la zona baja se produce un repunte por las actividades de las minas que afectan directamente la calidad del agua del río.

La segunda variable Can2 está asociada a temperatura, sólidos totales, turbidez y amonio, y en forma inversa con valores de pH neutro y oxígeno disuelto, es decir, parece ser un indicador de mala calidad del agua, especialmente por contenido de sedimentos y demás parámetros físicos. Los promedios más altos corresponden a las estaciones ubicadas en la zona más baja de la cuenca como Taras y tajo de San Blás y los promedios más bajos corresponden a estaciones de la parte alta de la cuenca y a quebradas afluentes del río donde el contenido de sólidos disueltos, amonio, turbidez es mucho menor, y el oxígeno disuelto mayor. El componente geográfico es también evidente ya que se distinguen grupos correspondientes a la zona alta, media y baja (figura 22).

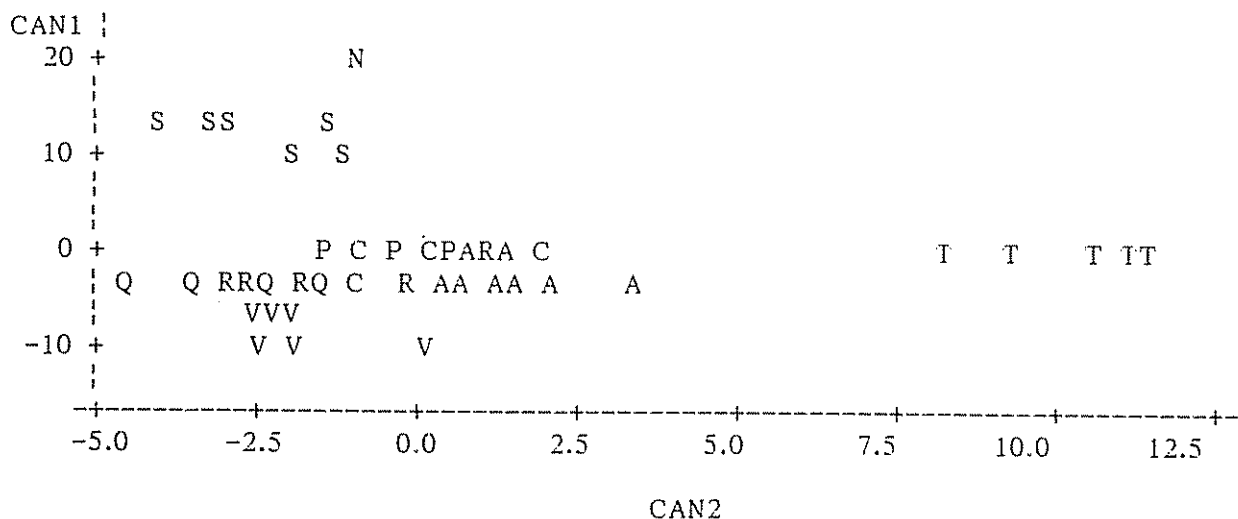
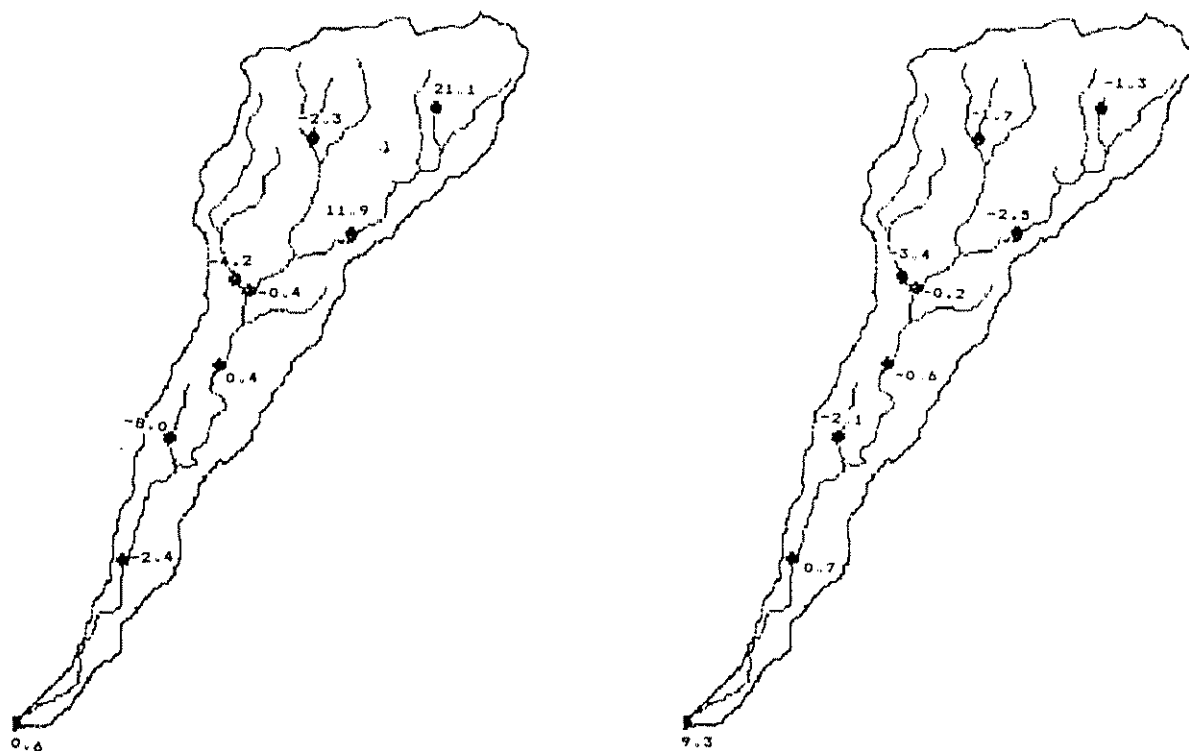


Figura 21. Relación entre variable canónica 1 y variable canónica 2.



Promedios de variable canónica 1

Promedios de variable canónica 2

Distribución de variables canónicas en la cuenca del río Reventado

4.3.1.2. Correlación entre las variables canónicas y las características de las áreas de drenaje.

Las características escogidas de las áreas de drenaje correspondientes a cada estación de muestreo fueron: número de orden de cauce, precipitación, latitud, longitud, altitud, distancia a la desembocadura, área y porcentaje de uso urbano, forestal, cultivos perennes, pastizales, hortícola y área de los tajos.

Como resultado de las correlaciones entre estas variables y la primera variable canónica que es un componente químico de las aguas a excepción de nitratos y fosfatos (de mucho uso en la agricultura), se obtuvo que las mayores correlaciones se asocian a número de orden de cauce, bosque y cultivos perennes y una correlación negativa con los porcentajes de uso hortícola, pastizales y urbano, lo que dá a entender que bajo estos tres últimos usos de la tierra se pueden esperar concentraciones más altas de nitratos y fosfatos.

El componente físico de la calidad del agua (temperatura, turbiedad, sólidos disueltos y en suspensión) tiene una correlación altamente significativa con número de orden de cauce, la distancia a la desembocadura, el porcentaje de uso urbano y tajos, y una correlación inversa significativa con altura, latitud, longitud, y la proporción de tierra dedicada a bosque y charral, la correlación con la horticultura fué significativa al 10% (cuadro 21).

Estas correlaciones demuestran que la calidad del agua en cuanto al contenido de sedimentos desmejora cuanto más bajo esté ubicado el sitio de muestreo, lo cual corresponde a latitudes y longitudes menores, y que actividades hortícolas y urbanizaciones, pero especialmente los tajos aportan una cantidad de sedimentos apreciablemente mayor que el resto de actividades en la cuenca.

Cuadro 22. Correlación entre variables canónicas y características de sitio.

ANALISIS DE CORRELACION
Coeficientes de correlación de Pearson

Variable	Can 1	Can 2
Orden de cauce	0.38851 **	0.51323 **
Longitud	0.08844 n.s.	-0.89466 **
Latitud	-0.07868 n.s.	-0.80515 **
Latitud	0.01844 n.s.	-0.79049 **
Distancia a desembocadura	-0.04114 n.s.	-0.82959 **
% Uso urbano	-0.23602 n.s.	0.63590 **
% Hortalizas	-0.38950 **	0.23958 n.s.
% Pastizales	-0.45587 **	0.07460 n.s.
% Bosques	0.38560 **	-0.25706 n.s.
% Perennes	0.60648 **	0.15952 n.s.
% Pastos	0.19029 n.s.	0.68430 **
% Precipitación	-0.11038 n.s.	0.10160 n.s.

14.3.2. Análisis Cluster

La aplicación del Análisis Cluster o Análisis de Conglomerados, permitió identificar los grupos de variables correlacionados a partir de la matriz de correlación (cuadro 22) y la similaridad con la que estos grupos se forman.

El dendrograma o árbol de similaridad de variables (figura 23) permite observar que se forman dos agrupaciones grandes, una con predominancia de variables físicas y la otra de variables químicas. Se observaron algunos grupos de variables estrechamente correlacionados: sólidos totales y sólidos en suspensión; calcio y sulfato; turbidez y potasio que se unen entre sí con un coeficientes de correlación de 0.99, 0.85 y 0.77 respectivamente. Para menores niveles de correlación se detectan nuevas agrupaciones, aunque por el valor de pseudo T, sólo 8 serían significativas.

La correlación entre sólidos totales y sólidos en suspensión es muy alta porque los sólidos en suspensión en este estudio son una fracción de los sólidos totales que queda luego de haber filtrado y secado la muestra. La relación entre calcio y sulfato se debe a que el sulfato no aparece solo sino principalmente formando sulfato de calcio. La relación entre turbidez y potasio probablemente se deba a que los sedimentos acarrear una concentración de potasio, que se incrementa paralelamente a mayores lecturas de turbidez, el potasio no suele ser contaminante de suelos o aguas por su facilidad de comportarse como catión de intercambio (Díaz, *et al.*, 1989).

Estas relaciones podrían tomarse en cuenta al momento de escoger indicadores ya que pueden servir como criterio para descartar algunos, en caso de que se presente una correlación altamente significativa entre ellos. En este caso se podría prescindir de potasio, magnesio y sulfatos o calcio. Aunque debe considerarse que los resultados obtenidos en este estudios son específicos para el área estudiada y no es

conveniente extrapolar hacia otras zonas de muestreo donde puede haber un comportamiento diferente de los mismos indicadores.

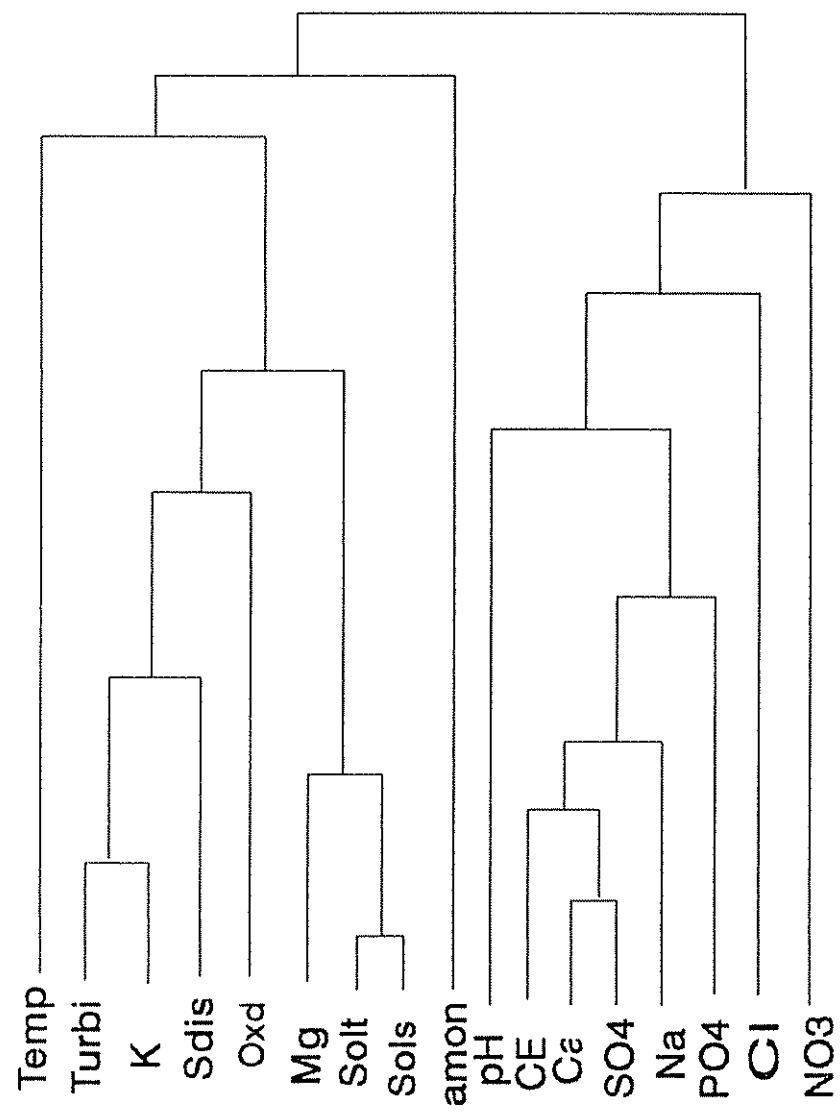


Figura 23. Dendrograma de similaridad de los indicadores de calidad de agua del río Reventado

Cuadro 23 Matriz de Correlacion para 17 constituyentes de calidad del agua en la Cuenca del Rio Reventado

	TEMP	PH	CONDE	TURBI	CALCI	OXID	SODIO	POT	CLOR	MGNE	SULF	FOSF	AMON	NITR	SOLTOT	SOLSUS	SOLDIS
TEMP	1																
PH	0.22386	1															
CONDE	0.19792	<u>-0.4248</u>	1														
TURBI	0.47037	-0.04124	-0.03075	1													
CALCI	0.2068	<u>-0.47871</u>	<u>0.79275</u>	0.01789	1												
OXID	<u>-0.45227</u>	0.12182	-0.19603	<u>-0.65402</u>	<u>-0.28028</u>	1											
SODIO	0.26394	<u>-0.99368</u>	<u>0.51477</u>	0.00234	<u>0.78688</u>	<u>-0.31539</u>	1										
POT	<u>0.97483</u>	-0.15483	0.03289	<u>0.77859</u>	-0.0308	<u>-0.49113</u>	-0.14562	1									
CLOR	0.04518	<u>-0.99562</u>	<u>0.65289</u>	0.17659	<u>0.50684</u>	-0.19367	<u>0.41475</u>	0.2224	1								
MGNE	<u>0.40488</u>	<u>-0.99514</u>	<u>0.70184</u>	0.27907	<u>0.80908</u>	<u>-0.48425</u>	0.80335	0.1831	<u>0.41985</u>	1							
SULF	0.0637	<u>-0.42873</u>	<u>0.67017</u>	0.04917	<u>0.85842</u>	-0.17048	<u>0.80745</u>	-0.01441	<u>0.54845</u>	<u>0.67347</u>	1						
FOSF	0.1841	0.91484	<u>-0.56703</u>	<u>0.9322</u>	<u>-0.58921</u>	-0.04723	<u>-0.44988</u>	<u>0.99199</u>	<u>-0.34419</u>	<u>-0.44912</u>	<u>-0.59085</u>	1					
AMON	<u>0.93844</u>	0.10113	-0.10823	<u>0.92789</u>	0.18147	<u>-0.405</u>	<u>0.95534</u>	0.25213	0.36413	0.22914	0.109	-0.01205	1				
NITR	0.01061	<u>0.92547</u>	<u>-0.48218</u>	-0.06708	<u>-0.52392</u>	0.04231	<u>-0.27193</u>	-0.16619	-0.23489	-0.23232	<u>-0.54684</u>	<u>0.45504</u>	0.05723	1			
SOLT	<u>0.97049</u>	-0.19113	0.96504	<u>0.52778</u>	<u>0.98206</u>	<u>-0.5681</u>	<u>0.28125</u>	<u>0.98518</u>	0.18776	<u>0.76853</u>	<u>0.93965</u>	-0.14799	0.15885	-0.02563	1		
SOLSUS	<u>0.94425</u>	-0.12775	<u>0.97104</u>	<u>0.48962</u>	<u>0.97748</u>	<u>-0.55358</u>	0.25824	<u>0.95659</u>	0.14856	<u>0.76443</u>	<u>0.99068</u>	-0.16019	0.11597	-0.02988	<u>0.99734</u>	1	
SOLDIS	<u>0.51521</u>	-0.11195	0.15878	<u>0.88429</u>	<u>0.2975</u>	<u>-0.50002</u>	<u>0.41074</u>	<u>0.5396</u>	<u>0.92927</u>	<u>0.48907</u>	<u>0.24318</u>	0.07088	<u>0.51677</u>	0.03557	<u>0.69868</u>	<u>0.5824</u>	1

Las correlaciones significativas al nivel de 5% aparecen subrayadas

4.4. Índices de calidad de agua

Los índices de calidad global del agua encontrados en la cuenca (cuadro 23) muestran diferencias entre la calidad del agua de las estaciones muestreadas.

El índice de calidad más bajo corresponde al de la estación de muestreo de Taras, en el desagüe de la cuenca en estudio (37), y el índice más alto es el de un nacimiento en el Parque Prusia del cual se canaliza el caudal para ser usado como abastecimiento de agua potable para la población de Llano Grande (93).

Un problema de este sistema consiste en fijar el nivel de cero polución. El sistema tal como está, asigna una polución cero (100% de calidad) al agua destilada. Sin embargo, se puede presentar contaminación por causas naturales, tal como sucede en este río, que desde el nacimiento tiene una alta concentración de minerales, la cual se vá diluyendo a medida que el caudal aumenta.

Debe considerarse que la presencia de algunas sustancias, especialmente minerales, podría ser incluso benéfica para mejorar el sabor del agua y por proveer nutrimentos valiosos.

En la figura 24 se puede apreciar la distribución espacial en la cuenca del río Reventado de los índices ponderados de calidad del agua.

Se hicieron correlaciones entre los índices obtenidos y el número de orden de cauce del punto de muestreo, la latitud, longitud y altitud del punto de muestreo, la precipitación, el porcentaje de uso de la tierra clasificado como bosque y charral, hortalizas, urbano, pasturas, cultivos perennes y tajos del área de drenaje de cada punto de muestreo, los resultados se presentan en el cuadro 24.

En dicho cuadro se confirma mucho de lo que ya se presumía, como por ejemplo que la calidad del agua es mejor cuando el punto de muestreo está ubicado en un segmento de

orden menor, es decir cuanto más cerca esté de un naciente, también el índice de calidad del agua es más alto cuando el punto del cual se toma la muestra está a mayor altitud, y en particular para esta cuenca, existe correlación entre mayor latitud y longitud con la calidad del agua, debido a que el sistema de coordenadas geográficas es la proyección Lambert (figura 7). En cuanto al efecto que el uso de la tierra pueda tener sobre la calidad del agua, se observa una fuerte relación inversa entre la calidad del agua y el porcentaje de área urbana y explotación de material de construcción. La relación inversa también se presenta cuando el uso de la tierra es de cultivos perennes, hortalizas y pastos, pero no es tan marcada. El uso de la tierra clasificado como bosque y charral aparece como el único uso de la tierra que no presenta relación negativa con la calidad del agua, aunque la correlación obtenida no es altamente significativa.

Finalmente se puede observar en el mismo cuadro que la precipitación tiene efecto negativo sobre la calidad del agua, lo cual es completamente justificable, debido a que la precipitación produce escorrentía y arrastre de sedimentos y sales minerales hacia los ríos. La precipitación como tal no debería causar un efecto negativo sobre la calidad del agua, pero el impacto de la lluvia sobre la calidad del agua, está condicionado en gran medida por el uso de la tierra y cobertura vegetal. Una relación significativa entre la intensidad de la lluvia y la concentración de sedimentos implica que existe influencia del uso de la tierra para propiciar la escorrentía superficial y arrastre de sedimentos.

Estas correlaciones pueden ser importantes al momento de considerar un uso sostenible de la tierra.

Cuadro 24. Indices de calidad de agua en la Cuenca del Río Reventado (promedios)

Estación de muestreo	NA	SE	RE	QP	CO	PT	VA	AM	TR
pH	26.35	36.28	100.00	93.36	93.48	89.21	96.66	97.94	96.75
Conductividad	48.93	57.34	65.75	70.63	61.25	62.03	76.55	64.38	59.25
Turbiedad	99.00	97.37	86.91	83.87	77.13	82.54	81.00	74.69	0.00
Calcio	22.00	47.84	64.18	75.45	60.00	57.11	81.40	62.90	51.96
Oxígeno disuelto	51.67	84.57	85.07	88.92	84.47	88.60	87.00	82.80	57.00
Sodio	67.60	71.89	77.46	81.42	76.96	77.10	84.69	78.53	72.33
Potasio	62.50	62.82	71.24	61.87	58.38	64.57	61.54	62.29	48.61
Cloruro	73.74	73.65	76.10	81.46	74.41	75.05	81.86	78.68	72.68
Sulfatos	0.00	24.50	49.37	70.55	41.05	43.82	87.23	47.88	29.61
Fosfatos	90.00	90.50	85.36	79.92	81.33	79.29	52.92	68.43	74.86
Amonio	100.00	94.13	85.71	83.33	84.81	85.71	100.00	72.06	59.52
Nitratos	100.00	100.00	70.79	12.41	67.78	47.46	1.48	56.19	27.62
Sólidos totales	80.91	53.10	53.91	67.85	46.44	56.97	63.97	48.91	0.00
Sólidos en suspens.	50.00	88.00	60.86	66.17	60.17	68.43	72.33	14.57	0.00
Sólidos disueltos	84.00	49.61	60.16	72.35	45.07	58.26	70.13	59.46	5.09
Dureza	41.65	29.49	51.91	64.23	47.01	41.65	69.31	48.90	27.74
INDICE PONDERADO	76	78	80	78	74	77	74	72	37

Cuadro 25. Correlación entre los índices de calidad del agua y algunas variables biofísicas y del uso de la tierra.

Variable	Coefficiente de correlación con el índice de calidad del agua
Orden de cauce	-0.43069 **
Longitud	0.68100 **
Latitud	0.67642 **
Altitud	0.61794 **
% Uso urbano	-0.52204 **
% Tajos	-0.53604 **
% Perennes	-0.22995
% Hortalizas	-0.14262
% Pastizal	-0.06863
% Bosque	0.18879
Precipitación	-0.28218 *

* Significativo ($P < 0.05$)

** Altamente significativo ($P < 0.01$)

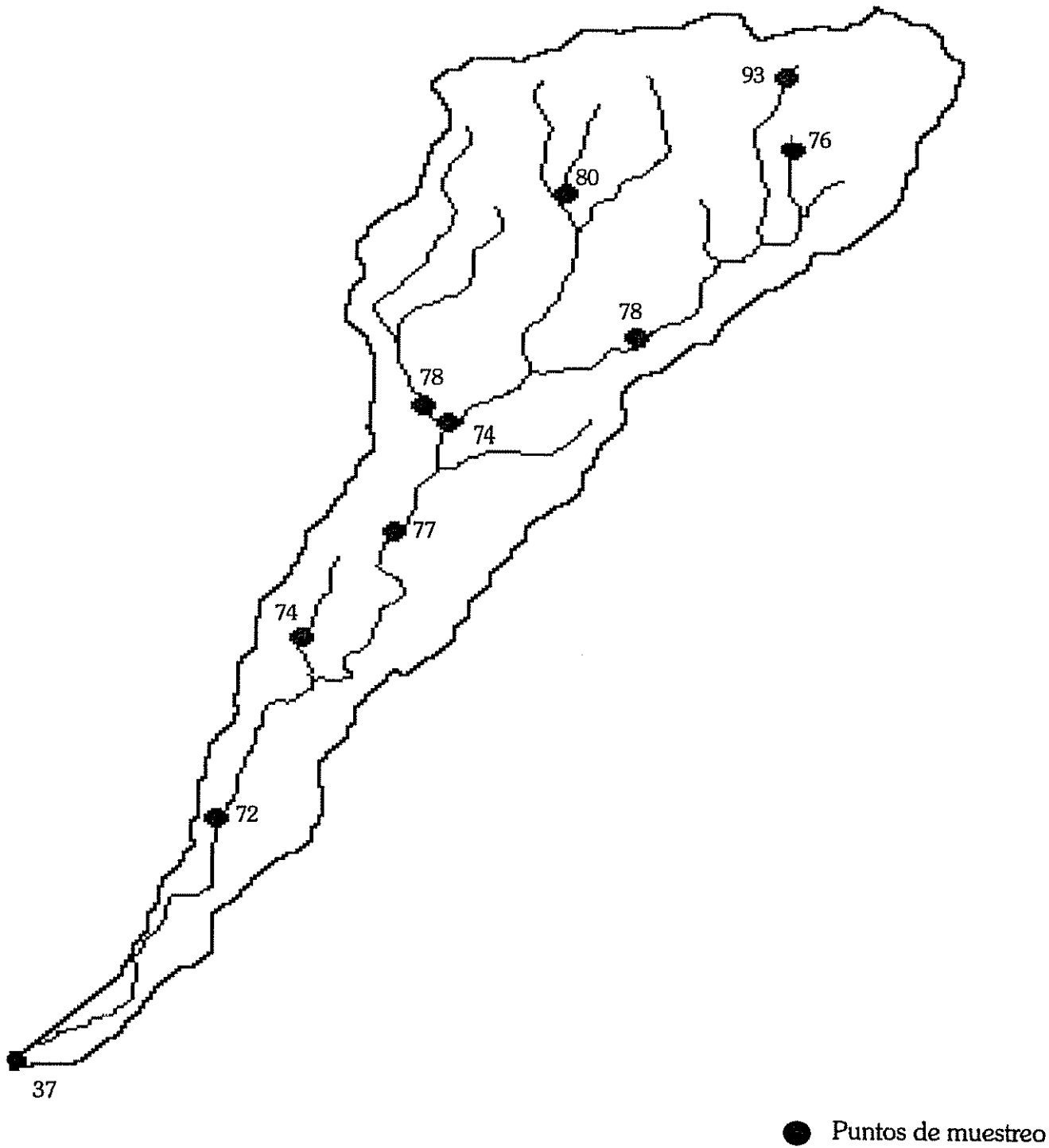


Figura 24. Índices de calidad del agua en la Cuenca del Río Reventado.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados de esta investigación se pueden llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Los indicadores analizados presentan diferencias espaciales y/o temporales estadísticamente significativas, como consecuencia de factores naturales y antropogénicos.

Entre los factores naturales que más influyen sobre la calidad del agua están: la influencia volcánica, debido a la proximidad del Volcán Irazú; la cobertura vegetal; la precipitación; y factores como el orden de cauce y ubicación geográfica de la estación de muestreo.

Entre los factores antropogénicos que más influyen, el principal es el uso de la tierra y el sistema de manejo que se hace dentro de cada categoría de uso de la tierra, es decir la contaminación difusa ocasionada por prácticas de labranza de la tierra, fertilización, empleo de agroquímicos, sobrepastoreo y carencia de obras de conservación de suelos en las áreas agrícolas. En áreas agrícolas y urbanas es crítica la descarga de residuos directamente sobre el cauce del río (contaminación puntual). La extracción de materiales de construcción es la principal responsable de la carga de sedimentos en el desagüe de la cuenca, pues el promedio de sólidos totales de la estación de muestreo ubicada antes de la mina o tajo donde se produce el dragado es apenas un 1.4% del promedio de la estación ubicada en el desagüe de la cuenca en estudio en Taras.

Las medidas conducentes a mejorar la calidad del agua del río Reventado deberían enfocarse hacia la adopción de prácticas de conservación de suelos y aguas en el área agrícola, y a la eliminación o regulamiento de las actividades de extracción de arena en la zona baja de la cuenca.

2. Siendo los parámetros de calidad de agua valores que miden la salud del ecosistema, pueden considerarse como

indicadores de la sostenibilidad de dicho ecosistema.

Se cumplió con varios de los requerimientos de la obtención de indicadores, como la medición de los mismos en diferentes circunstancias, cuando se escogieron puntos de muestreo cada uno de ellos con características biofísicas diferentes, y se tomaron las muestras periódicamente, en diferentes situaciones, como por ejemplo en época seca y lluviosa y durante eventos de precipitación. También se analizó la relación con otros indicadores, cuando se estudió la correlación entre ellos.

Los resultados muestran que hay actividades como la extracción de arena y el arrojado de residuos en áreas urbanas, que atentan seriamente y en forma constante contra la sostenibilidad ecológica, lo cual se manifiesta en una declinación de la calidad del agua por debajo de los niveles mínimos aceptables para diferentes usos, mientras que otras actividades como la horticultura, ganadería y cultivos perennes también disminuyen la calidad del agua, pero en función a factores como precipitación, cobertura del suelo y fertilización y sólo en determinadas situaciones caen por fuera de los niveles óptimos para los indicadores medidos.

3. Algunos indicadores de sostenibilidad de gran valor descriptivo como los residuos de plaguicidas y los conteos de bacterias coliformes, lamentablemente no cumplen con algunos atributos ideales debido a la dificultad en medirlos y a los elevados costos de los análisis correspondientes, lo cual dificulta el monitoreo intensivo de los mismos.

Mientras que otros indicadores, en particular: temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y sólidos totales son mucho más fáciles de medir, lo cual posibilita un monitoreo más frecuente y además la posibilidad de involucrar a la población local en su medición, tal como lo proponen De Camino y Müller (1993).

Factores que pueden considerarse al momento de la elección de los indicadores a ser monitoreados son: costos de la obtención de la información, conocimiento y comprensión de la relación ecosistema-indicador, correlación entre indicadores y correlación entre indicadores y aspectos biofísicos de la cuenca. Las altas correlaciones encontradas entre algunos indicadores pueden servir como criterio para, de ser necesario, estimar el comportamiento de un indicador conociendo el comportamiento de otro.

Bajo este criterio, los indicadores más importantes de este trabajo fueron la turbidez, el pH, la conductividad y los sólidos totales. La turbidez, por ser un indicador muy simple de medir pero a la vez muy importante para representar el contenido de sedimentos y otros materiales en las aguas analizadas. Los sólidos totales dan una medición más exacta de la cantidad de sedimentos en un volumen de agua, sedimentos que indican erosión en la zona alta y media de la cuenca y que van a depositarse en el embalse de Cachí, reduciendo su producción energética. La conductividad engloba la concentración de los diversos iones, algunos de los cuales podrían ser tóxicos para la agricultura bajo riego, al igual que el pH, que por su acidez podría llegar a ser perjudicial.

4. La mayoría de los indicadores de calidad de agua caen dentro de un rango aceptable según los criterios y normas, lo cual habilita a las aguas del río Reventado para una variedad de usos. Los indicadores que se identificaron como problemáticos son: el pH por su acidez, en la zona alta de la cuenca, en el tramo del cauce principal desde el nacimiento hasta Tierra Blanca, perjudicial para riego de cultivos; la turbidez y los sólidos totales y en suspensión en la zona baja de la cuenca, como consecuencia de las actividades del tajo y en la zona media cuando se presentan lluvias erosivas, son indicadores de erosión, perjudicial especialmente para el

embalse hidroenergético; los fosfatos y nitratos indicadores de la aplicación de agroquímicos, se detectan en concentraciones que propician la eutrofización; en ocasiones la concentración de oxígeno disuelto cae por debajo del nivel permisible mínimo (5 mg/l) en la estación de Taras, posiblemente por la influencia urbana que vierte desechos y materia orgánica sobre el cauce del río; la concentración de sulfatos en la naciente del río (326 mg/l) es alta, considerando que el nivel deseable máximo es de 200 mg/l, en el resto de estaciones de muestreo la concentración es menor; la concentración de aluminio en el mismo sitio (3.2 mg/l) también excede el nivel límite de 1 mg/l, por lo que puede resultar tóxico para los seres vivos.

La concentración de coliformes fecales especialmente en la zona media y baja de la cuenca, indica que existe contaminación y que el agua debería hervirse antes de ser consumida.

5. Si bien el análisis estadístico convencional nos permite estimar los parámetros descriptivos de cada variable como lo son la media, desviación estándar, coeficiente de variación, y diferencias significativas entre los promedios, es mediante el análisis multivariado que consistió en análisis de conglomerados o cluster y análisis discriminante, que se puede tener una visión más completa del comportamiento de todas las variables en conjunto y observar relaciones que de otra manera podrían pasar desapercibidas.

Para el caso, el análisis cluster dejó ver que hay variables con un comportamiento similar, lo cual permitió una mejor clasificación de las variables en grupos de variables físicas y químicas. Mientras que el análisis discriminante señala que hay factores que pueden afectar dicho comportamiento, como la influencia volcánica y la contaminación del agua por el contenido de minerales.

En el caso de los indicadores estudiados, las causas que

explican el comportamiento de los indicadores aparentemente son las mismas, es decir que varios de los indicadores presentan una tendencia semejante a lo largo de la cuenca, por lo que se facilita la explicación mediante el análisis de las combinaciones canónicas.

6. El sistema de información geográfica es indispensable para este tipo de investigaciones, ya que facilita el despliegue de imágenes que permiten relacionar los valores encontrados de calidad de agua con las características de la cuenca.

También se utilizó SIG para distribuir las estaciones de muestreo entre las diferentes zonas de la cuenca, de tal manera que fueran lo más representativas posible.

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica es muy útil cuando se trata de medir y proponer acciones conducentes a alcanzar la sostenibilidad y se deberá combinar varios niveles de datos (capas) como cambios en la calidad del agua, cobertura del suelo, infraestructura vial, información socioeconómica, etc. tal como recomiendan M. Strong y P. Thacher (GIS Role..., 1992). Es muy importante que esta información provenga de fuentes confiables y que se presente de forma que sea útil para los decisores y usuarios.

7. Se confirma que se producen grandes pérdidas de suelo en las zonas agrícolas, que se reflejan en el alto contenido de sedimentos en el cauce del río durante la época lluviosa.

Por ser la cuenca del río Reventado una cuenca pequeña con pendientes fuertes, es de respuesta rápida ante los fenómenos de precipitación, y el caudal aumenta rápidamente al igual que el contenido de sedimentos. Las actividades de manejo aún en fincas pequeñas pueden tener gran repercusión en las aguas del río.

Estas pérdidas de suelo constituyen una seria amenaza

contra la sostenibilidad del agroecosistema, y debería estudiarse bajo un enfoque holístico, es decir involucrando a varios sectores, como el gobierno, universidades, sector privado, agricultores, etc.

8. Los índices globales de calidad de agua hacen una síntesis de todas las variables analizadas y al representar los valores en una misma escala, permiten la comparación entre diferentes sitios y situaciones de una manera fácil de apreciar.

Los índices más altos (mejor calidad), se registraron en la zona alta de la cuenca: en un nacimiento del cual se captan las aguas para uso doméstico de la población de Llano Grande y en el río Retes, mientras que el índice más bajo (mayor contaminación), corresponde al de la estación de muestreo de Taras, en el desagüe de la cuenca.

La correlación entre los índices y las variables relativas a la ubicación de los puntos de muestreo y el uso de la tierra del área que drena a cada uno de ellos, indica que la calidad del agua se ve negativamente afectada por los diferentes usos de la tierra, a excepción de bosque y charral. Los usos de la tierra identificados como los más perjudiciales para la calidad del agua del río son la extracción de arena y lastre, y el área urbana. La precipitación ejerce una influencia negativa sobre la calidad del agua, especialmente cuando se produce arrastre de suelo hacia los cauces lo cual depende también del tipo de uso de la tierra.

9. El proceso de identificación, selección final y monitoreo de los indicadores de sostenibilidad es un proceso complejo y si no es bien planificado puede representar gastos excesivos de tiempo y dinero, por eso es importante desarrollar las actividades dentro de un marco metodológico que oriente hacia la obtención de dichos indicadores de la manera más eficiente posible.

Considerando que este marco metodológico se está poniendo a prueba, muchas lecciones se tendrán que aprender en el camino, tal es el caso de esta investigación, en la cual se tuvieron que modificar algunos planteamientos iniciales, pero sin perder de vista el objetivo final.

10. El método utilizado para relacionar el uso de la tierra y variables geográficas y biofísicas con las variables canónicas, consistió en procedimientos de correlación. Este método permitió confirmar hipótesis relativas a la influencia de los factores biofísicos sobre los indicadores. Este procedimiento es sólo una aproximación que posiblemente puede ser perfeccionado y sustituido por otros procedimientos estadísticos más sofisticados, sin embargo hay que considerar que evaluando a nivel de cuenca hidrográfica, la cual está constituida por componentes biofísicos, socioeconómicos y políticos, no es lo mismo que trabajar a nivel de parcela experimental, sobre la cual se puede tener un mayor control de los factores que intervienen. Por esta razón se considera recomendable redimensionar el área de estudio para estudiar un área menor en la cual se facilite el control y registro de los datos climatológicos, uso de la tierra, prácticas de manejo (fertilización, aplicaciones, preparación del suelo, etc.), registro de caudales y mayor frecuencia de toma de muestras. De esta manera se podrían entender mucho más las relaciones causa-efecto y la respuesta de los indicadores ante diferentes niveles de intervención.

Esta tesis, por estar dentro de los esfuerzos pioneros de lo que es la medición de la sostenibilidad a través de indicadores en una cuenca hidrográfica, sólo trató de establecer algunas pautas o lineamientos para encarar este complejo tema y transmitir las experiencias encontradas. La medición de la sostenibilidad se convierte en un tema de gran interés y es necesario uniformizar algunos criterios.

6. BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, G.E.; SCHMINCKE, H.U. 1993. Stratigraphic and sedimentological aspects of the rain-triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica. Zbl. Geol. Palaont. (Alemania) Teil 1, 1993: 513-530.
- AZOFEIFA, R.; TRUJILLO, J.M. 1994. Aspectos socioeconómicos de las áreas piloto Tierra Blanca. MAG/FAO. Documento de campo no. 18. San José, Costa Rica. 40 p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. FAO, Roma Italia. 174 p.
- BARBIROLI, G.; MAZZARACCHIO, P.; RAGGI, A.; ALLINEY, S. 1991. A proposal for a new method to develop synthetic quality indices for air and water. Journal of Environmental Management (EE.UU.) 36, 237-252.
- BARNETT, V. 1994. Statistical and Economic Aspects of Agricultural Sustainability. In Conference on Environmental Metrics. Ontario, Canada. 147 p.
- BASSO, L.A.; MACHIN, J.; PELLICER, F. 1992. Análisis estadístico multivariante aplicado a la calidad del agua de drenaje. Producción y protección vegetales. (España). 7(2):227-244.
- BEITIA M., A. 1989. Análisis de la problemática de la calidad del agua y formulación de recomendaciones para su manejo en la cuenca alta del Río Chiriquí Viejo, Panamá. Tesis Mg. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- BEL INGENIERIA S.A. 1987. Estudio de prefactibilidad para el riego de pequeñas áreas en la zona norte de Cartago y diseño de un plan piloto; Informe final. San José, Costa Rica. s.n.t.
- BERMUDEZ M., M. 1978. El problema del Río Reventado: 15 años después. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 8 p.
- BUTLER F., C. 1992. Building sustainable agriculture: A new application of farming systems research and extension. Journal of Sustainable Agriculture. Nueva York (Estados Unidos). 2(3). p. 37-49.

- CENTRO CIENTIFICO TROPICAL. 1985. Manual para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. San José, Costa Rica. 66 p.
- CHESTERS, G; SCHIEROW, L.J. 1985. A primer on nonpoint pollution. Journal of Soil and Water Conservation. (USA). 40(1):9-13.
- CORTES, V.M.; OCONITRILLO, G. 1993. Factores socioculturales asociados a la erosión hídrica en un sistema hortícola: El caso de Cot y Tierra Blanca de Cartago, Costa Rica. Anuario de Estudios Centroamericanos. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 19(1):79-90.
- CORTES G., V.M. 1993. Desgaste vertical de los suelos hortícolas en el flanco occidental del Volcán Irazú. Ciencias Sociales. UCR. Costa Rica. 62:83-91.
- CURTIS, W.R.; DYER, K.L.; WILLIAMS Jr., G.P. 1988? A manual for training reclamation inspectors in the fundamentals of hydrology. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Kentucky, Estados Unidos. 56 p.
- DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; EDWARDS, D.R.; WEDEPOHL, R.; LEMUNYON, J.L. 1994. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. Journal of Soil and Water Conservation. Nutrient Management Supplement. 49(2):30-38.
- DE CAMINO, R.; MÜLLER, S. 1993. Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible: Bases para establecer indicadores. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 134 p.
- DIAZ, A. 1993. Reforestación en la zona norte de Cartago. Cartago, Costa Rica. M.A.G. Citado por Rappaccioli 1993.
- DIAZ A., M.C.; GARRIDO V., S.; HIDALGO, R. 1989. Contaminación agraria difusa. Madrid, España. MOPU. 98 p.
- DINIUS, S.H. 1972. Social accounting system for evaluating water resources. Water Resources Research. vol. 8. no. 5. 1159-1177.

- DIXON, J.; EASTER, W.K. 1986. Integrated watershed management: An approach to resources management. In Watershed Resources management: An integrated framework with studies from Asia and Pacific. Ed. by K.W. Easter, J. Dixon, M. Hufschmidt. Honolulu, Hawaii. p. 17-31.
- FAUSTINO, J. 1987. Marco conceptual de cuencas hidrográficas. Turrialba, C.R., CATIE. 27 p.
- FELSOT, A.S. 1992. Measuring water quality. Illinois Research. Agricultural Experiment Station. Illinois. EE.UU. 34(4) p.4-10.
- FERREIRA, P. 1991. Estabilidad y sostenibilidad. Una visión comparativa. Manuscrito. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- GANEA, A. 1993. Uso potencial del suelo en la zona norte de Cartago. San José, Costa Rica. citado por Rappaccioli, G.; Solera, J.F.; Zamora, A. 1993. Evolución de la problemática ambiental en la zona norte de Cartago. Desarrollo Rural. U.C.R. 85 p.
- GIS ROLE VITAL IN NEW ECONOMIC PARADIGM. 1992. An interview with Maurice F. Strong: Data Needed for Decision Making Require a GIS - An Interview with Peter B. Thacher: GIS Will Help Economists Understand New Economics. GIS World (USA). Vol.5 No. 10. p.42-45
- HACHETTE. 1976. Vocabulaire de l'environnement. Conseil International de la Langue Française. Francia. Citado por: De Camino, V. y Müller, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales: Bases para establecer indicadores. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 134 p.
- HAMBLIN, A. 1992. Environmental indicators for sustainable agriculture: Report on a national workshop. Bureau of Rural Resources. Parkes, Australia. 96 p.
- HERNANDEZ C., I. 1988. Eficiencia económica del uso de plaguicidas en papa en la época de verano en la zona norte de la provincia de Cartago, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. UCR/CATIE. Turrialba, Costa Rica. 105 p.
- HILJE, L. 1993. Insectos en papa. In Opciones al uso unilateral de plaguicidas en el combate de plagas: Pasado, presente y futuro. García, J. y Fuentes, G. (editores). CATIE. 15 pag. (Manuscrito).

- HIRSCHI, M.C. 1992. Showered with challenges in water research. Illinois Research. (USA). 34(4) p.2
- ICRAF (CONSEJO INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACION SILVOAGROPECUARIA). 1989. Viewpoints and issues on agroforestry and sustainability. Nairobi, Kenya. Citado por: De Camino, V. y Müller, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales: Bases para establecer indicadores. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 134 p.
- INHABER, H. 1974. Environmental quality: Outline for a national index for Canada. Science (USA) 186, 798-805.
- INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL. 1989. Fotos Aéreas de 3/7/1989. San José, Costa Rica.
- INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL. 1981. Hoja Topográfica 3445 IV Istarú. Escala 1:50,000. San José, Costa Rica.
- INTERNATIONAL Standards for Drinking Water. 1971. World Health Organization. Third Edition. Geneva, Switzerland. citado por Robinson, T. 1993.
- JANSSON, M.B.; RODRIGUEZ, A. 1992. Sedimentological Studies in the Cachi Reservoir, Costa Rica: Sediment inflow, reservoir sedimentation and effects of flushing. UNGI Rapport N. 81. Suecia. 217 p.
- KUNKLE, S.; FLORA, M. 1987. Monitoring stream water quality for land-use impacts. Training manual. Forest Service. Washington, D.C. 102 p.
- LAL, R.; REGNIER, E.; ECKERT, D.J.; EDWARDS, W.M.; HAMMOND, R. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. In Cover Crops for Clean Water. Ed. por Hargrove, W. L. Iowa, SWCS. p. 1-10.
- MAGUIRE, D; GOODCHILD, M; RHIND, D.W. 1991. Geographical Information Systems. Principles. Essex, Inglaterra. Longman Scientific and Technical. v.1 649 p.
- MAGUIRE, D; GOODCHILD, M; RHIND, D.W. 1991. Geographical Information Systems. Applications. Essex, Inglaterra. Longman Scientific and Technical. v.2 447 p.
- MELO, H.M. 1991. La conservación de suelos en Tierra Blanca, Cartago, Costa Rica. Niveles de adopción y alternativas para incrementarlos. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 143 p.

- MOORE, J.G. 1968. Report of the Committee on Water Quality Criteria. USEPA. Washington, Estados Unidos. 234 p.
- MORA C., S.; ESTRADA, A.; DELGADO S., J. 1990. Análisis del deslizamientos de San Blas-Río Reventado, Cartago-Costa Rica. ICE. 19 p. San José.
- MORA, S. 1989. Análisis preliminar de la vulnerabilidad económica de la ciudad de Cartago, a causa de los efectos de una avalancha que transite por el Río Reventado, Costa Rica. 33 p. San José. sin publicar.
- MÜLLER, S. 1993. Propuesta para un proyecto de investigación sobre indicadores de sostenibilidad. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- MYERS, C.; MEEK, J.; TULLER, S.; WEINBERG, A. 1985. Journal of Soil and Water Conservation (USA). 40(1):14-18.
- NUÑEZ, J. 1994. Clasificación de suelos en la cuenca del río Reventado. Comunicación personal.
- OTT, W.R. 1978. Environmental Indices: Theory and Practice. Ann Arbor, Michigan citado por Barbirolli.
- PAZ, C.R.; RAMIREZ, L. 1994. Informe Cuenca del Río Reventado. 4 p. (Manuscrito).
- PEREZ, J.R. 1986. Fundamentos sobre planificación del uso de la tierra en el manejo de cuencas hidrográficas. In Fundamentos del Manejo de Cuencas. Seminario Taller. CATIE. Antigua Guatemala. 164 p.
- RAMOS M., C.; OCIO A., J.A. 1992. La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. Hojas divulgadoras. n. 7/92. 32 p.
- RAPPACCIOLI N., G.; SOLERA, J.F.; ZAMORA, A. 1993. Evolución de la problemática ambiental en la zona norte de Cartago. Desarrollo Rural. U.C.R. 85 p.
- ROBINSON, T.H. 1993. Fate and Transport of Agricultural Contaminants from Rice Paddies; Impact Sampling Strategies and the Potential Environmental Degradation to Dry Tropical Coastal Wetlands-Guanacaste, Costa Rica. Tesis Master of Arts. University of California. Santa Barbara. Estados Unidos. 48 p.

- RUITENBEEK, H.J. 1991. Indicators of ecologically sustainable development: Towards new fundamentals. The Canadian Environmental Advisory Council. 46 p.
- SANCHEZ E., O. 1993. Determinación de áreas críticas mediante Sistemas de Información Geográfica, Cuenca de Río Reventado, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 116 p.
- SAS INSTITUTE. 1988. SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. SAS Institute Inc. Cary, NC. Estados Unidos. 1028 p.
- SENACSA. 1991. Manual de Conservación de Suelos y Aguas. Segundo borrador. San José Costa Rica. SENACSA. p. 1-6, 25.
- SHARMA, P. 1993. Metodologías de Clasificación del Uso de la Tierra. In Apuntes de clase de Planificación del Uso de la Tierra. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- SHAXSON, T.F.; HUDSON, N.W.; SANDERS, D.W.; ROOSE, E.; MOLDENHAUER, W.C. 1989. Land Husbandry: A Framework for Soil and Water Conservation. Soil and Water Conservation Society. Iowa, U.S.A. 64 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1992. Keys to Soil Taxonomy, SMSS. Technical monograph No. 19, 5th edition. Virginia Polytechnic Inst. and State Univ. 542 p.
citado por: VAN ENCKEVORT, P.; UGALDE, M.; DOMIAN, F.; VASQUEZ, J. 1994. Estudio de suelos y capacidad de uso en las áreas-piloto 7. Tierra Blanca de Cartago. Documento de campo n. 12. MAG/FAO. San José, Costa Rica. p. irr.
- SOLIS, H. 1993. Abastecimiento de Agua: problemática de los recursos hídricos. In Apuntes de clase de Manejo de Cuencas. Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- U.S.E.P.A. 1976. Quality criteria for water. Washington, D.C. 256 p.
- VAN ENCKEVORT, P.; UGALDE, M.; DOMIAN, F.; VASQUEZ, J. 1994. Estudio de suelos y capacidad de uso en las áreas-piloto 7. Tierra Blanca de Cartago. Documento de campo n. 12. MAG/FAO. San José, Costa Rica. p. irr.

- VEGA M, L. 1994. Dicen médicos: Zonas agrícolas más propensas al desarrollo de cáncer gástrico. La República. Suplemento Nuestro Agro, San José (C.R.); Ago. 11:3C.
- VERDUIN, J. 1970. Significance of phosphorus in water supplies. In Agricultural Practices and Water Quality. Ed. L. Willrich and G. Smith. Iowa State University Press. Iowa. p. 63-71.
- ZELT, R.B. 1991. GIS technology used to manage and analyze hydrologic information. GIS-World. (USA). 4(5): 70-73.
- ZOU, S.; YU, Y.S. 1994. A general structural equation model for river water quality data. Journal of Hydrology. (Holanda) 162:197-209.

ANEXOS

ANEXO A

Cuadro 1A. pH y conductividad eléctrica de muestras obtenidas en el Proyecto Tierra Blanca.

Fecha	pH	CE mmhos
2/2/93	4.80	553
9/3/93	4.70	594
2/4/93	4.75	569
19/4/93	4.40	551

Fuente : SENARA

Cuadro 2A. Aforos realizados por SENARA en 1993.

Mes	Semana	Caudal (lps)
Enero	1	30.0
	2	24.8
	3	27.4
	4	30.0
Febrero	1	27.4
	2	24.8
	3	24.8
	4	22.2
Marzo	1	24.8
	2	19.7
	3	22.2
	4	22.2
Abril	1	19.7
	2	22.2
	3	17.3
	4	19.7

Se calcularon con las lecturas en cm del aforador sin cuello (H) y la fórmula

$$Q = 0.802084 * H^{1.369126}.$$

Cuadro 3A. Dosis en kg/ha aplicadas a los cultivos en la zona

Cultivo	Elem.	Rango	Media
Cebolla	N	75 a 227	150,3
	P ₂ O ₅	153 a 506	324,4
	K ₂ O	78 a 273	151,6
Papa	N	130 a 272	173,0
	P ₂ O ₅	214 a 584	394,0
	K ₂ O	130 a 272	173,0
Zanahoria	N	35 a 175	70,1
	P ₂ O ₅	10 a 317	118,2
	K ₂ O	29 a 146	68,0

Fuente: Melo, 1991.

ANEXO B

Anexo1B. Descripción de los parámetros seleccionados

Bacterias coliformes

Desde que se determinó la relación entre microbios fecales y transmisión de enfermedades a finales del siglo 17, el uso de organismos indicadores para definir la calidad del agua se convirtió en una práctica común. Se los usa para identificar cambios ambientales y cuantificar niveles de contaminación. Las bacterias coliformes están consideradas como principales indicadores de contaminación fecal.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es un constituyente principal en la determinación de la calidad del agua. Se considera que es un factor en la protección de las cualidades estéticas del agua y en la preservación de la vida acuática y la diversidad de peces. La capacidad del agua de retener oxígeno disminuye con aumentos en temperatura y/o salinidad. En un sistema hídrico, el oxígeno disuelto depende de condiciones como la descarga de desechos orgánicos (demanda bioquímica de oxígeno), la tasa de re-aereación, la fotosíntesis y la respiración. Insuficiente oxígeno disuelto produce condiciones adversas para la vida acuática, y su ausencia puede ocasionar olores desagradables asociados a respiración anaeróbica.

Nitratos y Amonio

El nitrógeno se presenta en el agua en varias formas, incluyendo nitrógeno molecular disuelto, amonio, nitratos, nitritos, y numerosas formas orgánicas. Las fuentes de nitrógeno incluyen entradas atmosféricas (precipitación, lluvias), fijación biológica, flujo desde áreas agrícolas de compuestos nitrogenados comúnmente aplicados como fertilizantes. Ya que los compuestos nitrogenados son macronutrientes importantes en sistemas acuáticos, son importantes para monitorear la productividad del sistema y evaluación de la eutroficación.

Los nitratos no son tóxicos por sí mismos, sólo cuando se convierten a nitrito en el cuerpo. El nitrito interfiere con la capacidad de transportar oxígeno de los glóbulos rojos reemplazando el oxígeno normalmente transportado por la hemoglobina.

Temperatura

La temperatura es un parámetro de la calidad del agua que afecta directamente la vida acuática, especialmente

debido a que el oxígeno se vuelve menos soluble en el agua cuando la temperatura del agua se incrementa. Incrementos de temperatura aceleran la biodegradación de material orgánico, incrementando la demanda de oxígeno de un sistema dado. Estas demandas crecientes pueden conducir a un agotamiento del oxígeno y condiciones nocivas. La temperatura también afecta al proceso de descomposición por el cual el agua se purifica a sí misma y por lo tanto las cualidades estéticas y sanitarias.

Cada especie acuática tiene una diferente tolerancia de temperatura. El agua caliente contiene menos oxígeno disuelto, y permite que las reacciones bioquímicas se realicen más rápidamente resultando en un consumo más acelerado del oxígeno disuelto.

Bajo éstas condiciones las especies que son susceptibles a los aumentos de temperatura del agua llegan a perecer. Los huevos de peces pueden afectarse por una elevación de la temperatura.

Turbidez o Turbiedad

Se aplica este término a aguas que contienen materia en suspensión tal que interfiere con el paso de la luz a través del agua, o en los que la profundidad visual es restringida. Los materiales que causan turbidez pueden ser sustancias inorgánicas o sustancias de origen orgánico. Pueden variar en tamaño desde partículas coloidales a materiales gruesos.

Una de las características de las aguas de desperdicio, tanto domésticas como industriales, es su falta de transparencia. Esto es causado en alto grado por la presencia de materiales muy finos suspendidos en el agua y por sustancias coloidales. Las sustancias sólidas llegan a depositarse sobre las branqueas de los peces afectando su fisiología.

También se reduce la penetración de la luz del sol, con el consiguiente resultado sobre el crecimiento vegetal. La prueba de turbidez mide en una muestra de agua la propiedad óptica que resulta de la dispersión y absorción de luz por las partículas presentes. La cantidad de turbidez registrada depende de variables como número, tamaño, forma e índices de refracción de las partículas. Se presenta turbidez en la mayoría de aguas superficiales como resultado de arcillas en suspensión, limo, material orgánico e inorgánico finamente dividido, plankton y otros microorganismos.

Fósforo

El fósforo en el agua puede presentarse en muchas formas, incluyendo fosfato reactivo soluble y fósforo total. Los fosfatos en desperdicios son la principal fuente de cantidades excesivas de nutrientes en aguas. Aguas artifi-

cialmente enriquecidas se alteran biológicamente, creando problemas de crecimiento de algas, malezas acuáticas y desaparición de especies de peces.

Sólidos suspendidos

La mayor parte de los sólidos suspendidos en las aguas naturales están compuestos por limo de erosión, detritos orgánicos y plankton. Sin embargo, las actividades humanas crean impactos que alteran e incrementan estos constituyentes. Fuentes primarias de estos efectos son la descarga de desperdicios líquidos, erosión de áreas deforestadas y en cultivo, lavado de grava y desmontes de minas y polvo que es acarreado por el viento a los cauces de agua.

Conductividad

La conductividad es una medida de la capacidad del agua de transmitir una corriente eléctrica. Es una indicación de las concentraciones de sustancias ionizadas.

La salinidad usualmente se expresa como conductividad en estudios para aguas usadas para riego o para cría de peces.

La conductividad eléctrica es la habilidad de una determinada sustancia para conducir la corriente eléctrica. Es justamente lo opuesto de la propiedad denominada resistencia eléctrica. La conductividad de cada material, al igual que su resistencia, es diferente.

El agua químicamente pura ostenta una conductividad eléctrica muy baja, significando esto que es un buen aislante. Sin embargo, con la adición de una pequeñísima cantidad de minerales disueltos, el agua se vuelve conductiva. Esto tiene lugar cuando el material disuelto se separa en iones que llevan sus cargas negativas y positivas. Cuanto mayor la cantidad de iones, mayor será la conductividad de la solución.

La unidad de medida de la conductividad es el inverso de ohmios, la unidad para expresar resistencia, y se escribe "mhos".

Es conveniente estimar la cantidad de sólidos disueltos totales mediante la medición de conductividad, puesto que ello puede hacerse muy rápidamente.

Las aguas con una conductividad específica alta causan corrosión del hierro y del acero, aunque otras propiedades no indiquen la posibilidad de un problema de corrosión. Puesto que la conductividad específica refleja la actividad de los iones cargados eléctricamente en el agua, se desprende que cuánto mayor la conductividad, más grande será la oportunidad para una acción electroquímica.

La concentración del Ión Hidrógeno (pH)

La concentración relativa de los iones de hidrógeno en el agua, es la que indica si ésta actuará como un ácido débil, o si se comportará como una solución alcalina.

Cuando la cantidad de iones de hidrógeno es excesiva en relación con otros iones en solución, tiene lugar una reacción ácida. Una agua tal, tiende a atacar los metales.

La concentración del ión hidrógeno del agua se expresa mediante su valor del pH. Un valor del pH de 7 indica una solución neutra. Un valor de pH menor de 7, indica una condición ácida; un pH mayor que 7, corresponde a una solución alcalina .

La escala de los valores del pH es tal, que un cambio de una unidad en éste, representa un cambio de 10 veces en la concentración del ión H. Supongamos, por ejemplo, que la adición de un poco de ácido al agua destilada cambia su pH a 6. Lo anterior significa que el número de iones H ha sido aumentado en 10 veces por la adición del ácido. En forma semejante un agua con un valor de pH de 8 contiene solamente 1/10 de los iones H presentes en el agua destilada y un valor del pH de 9 representa solamente 1/100 de los que habría a un valor neutro de 7.

El número de iones negativos OH, varía en la forma opuesta. Así pues, un agua con un valor del pH de 9, contiene 100 veces más iones OH, que un agua con valor neutro del pH de 7. Los iones OH son los que le imprimen al agua su reacción alcalina.

Sólidos disueltos totales

La concentración total de minerales disueltos en el agua es un índice general de la adaptabilidad del agua para diversos usos. Los sólidos totales se pueden determinar a partir del residuo seco que queda de una muestra de agua que se haya dejado evaporar. También se puede calcular sumando las concentraciones determinadas por separado de todos los iones presentes en el agua.

El agua que contiene mucha materia mineral disuelta no es satisfactoria para ciertos usos. Si el agua contiene menos de 500 ppm de sólidos disueltos, es por lo general adecuada para uso doméstico y para varios propósitos industriales.

Sodio

El sodio es un metal, parte de un grupo que se denomina metales alcalinos. Otro metal alcalino es el potasio. Aunque los metales alcalinos ostentan características químicas similares, el sodio es el único que se encuentra en cantida-

des significativas en las aguas naturales.

Cloruro

Para la mayoría de los propósitos, el agua que contiene menos de 150 ppm de cloruro resulta adecuada. Un contenido de cloruro mayor de 250 ppm ya es inconveniente cuando se trata de abastecimientos municipales de agua. Cuando el contenido es más de 350 ppm, resulta también inconveniente para la mayoría de los fines industriales o de riego.

Nitrato

El nitrato es un ión cargado negativamente, que consiste de una combinación de nitrógeno y oxígeno en la proporción de 1 átomo de nitrógeno por 3 átomos de oxígeno. Su símbolo químico es NO_3 . En los análisis de agua, se reporta ya sea en términos del ión nitrato o en términos del elemento nitrógeno. Una parte de nitrógeno es igual a 4.5 partes de nitrato.

Cuando el nitrato se halla en concentraciones mayores que 45 ppm, el agua es indeseable para fines domésticos, debido al posible efecto tóxico que puede tener sobre los niños. Este efecto se conoce como cianosis. La cianosis hace que el niño se vuelva apático y soñoliento y su piel toma un color azulado. Esta condición puede provenir cuando se usa agua con excesivo nitrato para la preparación de los alimentos del niño.

Debe hacerse notar que el nitrato no se puede eliminar mediante ebullición del agua. La única manera de removerlo es mediante la desmineralización del agua o destilando ésta.

ANEXO C

Anexo 1C. Programa de SAS para el análisis de
varianza

```
data a;
infile 'agua3.dat';
input n 1-2 cod $ fecha hora temp ph conde turbi calci oxid
sodio
pot clor mgmed sulf fosf amon nitr soltot solsus soldis
caud;

data b;
infile 'dist1.dat';
input cod $ dist;
proc sort data=a;by cod;
proc sort data=b;by cod;
data c;merge a b;by cod;
lsoltot=log(soltot);
lsolsusp=log(solsusp);
  if fecha=34443 then f=1;
  if fecha=34472 then f=2;
  if fecha=34500 or fecha=34501 then f=3;
  if fecha=34536 or fecha=34537 then f=4;
  if fecha=34562 then f=5;
  if fecha=34585 then f=6;
  if fecha=34611 or fecha=34613 then f=7;

proc glm; class cod f hora;model ph conde turbi calci oxid
sodio
pot clor mgmed sulf fosf amon nitr lsoltot lsolsusp soldis
caud = cod f hora/ss1;
  Means cod/duncan;
run;
```

Anexo2C. Programa de SAS para el análisis discriminante
canónico y correlación

```

data a;
infile 'agua3.dat';
input n 1-2 cod $ fecha hora temp ph conde turbi calci oxid
sodio
pot clor mgmed sulf fosf amon nitr soltot solsus soldis
caud;

data b;
infile 'dist1.dat';
input cod $ dist;

proc sort data=a;by cod;

proc means: mean std min max cv maxdec=2;
  by cod; var temp ph conde turbi calci oxid sodio pot clor
mgmed sulf
  fosf amon nitr soltot solsus soldis caud;

proc sort data=b;by cod;
data c;merge a b;by cod;

lsoltot=log(soltot);
lsolsusp=log(solsusp);
*if ph<6 or ph>8 then ph1=1;*else ph1=0;
ph1=abs((ph-7.0148)/0.9604);
proc candisc out=outcan ;
  class cod;
  var temp ph1 conde turbi calci oxid sodio
pot clor mgmed sulf fosf amon nitr soltot solsus soldis
caud;
proc plot;
plot can1*can2=cod;
proc plot;
plot can2*can1=cod;

proc corr;var can1 can2;
with fecha hora temp ph ph1 conde turbi calci oxid sodio
pot clor mgmed sulf fosf amon nitr soltot solsus soldis
caud dist;

run;

```


Anexo 3C. Programa de SAS para el análisis cluster

```

data a;
infile 'agua3.dat';
input n 1-2 cod $ fecha hora temp ph conde turbi calci oxid sodio
pot clor mgne sulf fosf amon nitr soltot sol susp soldis caud;

proc corr outp=cor1 noprint;
var temp ph conde turbi calci oxid sodio pot clor mgne
sulf fosf amon nitr soltot sol susp soldis;
data cor1; set cor1; keep temp ph conde turbi calci oxid sodio pot
clor mgne sulf fosf amon nitr soltot sol susp soldis;
*if _type_=corr;

data b;
set cor1;
if _N_<4 then delete;

data b(type=distance);set b;
temp=(1-temp**2)*100;
ph=(1-ph**2)*100;
conde=(1-conde**2)*100;
turbi=(1-turbi**2)*100;
calci=(1-calci**2)*100;
oxid=(1-oxid**2)*100;
sodio=(1-sodio**2)*100;
pot=(1-pot**2)*100;
clor=(1-clor**2)*100;
mgne=(1-mgne**2)*100;
sulf=(1-sulf**2)*100;
fosf=(1-fosf**2)*100;
amon=(1-amon**2)*100;
nitr=(1-nitr**2)*100;
soltot=(1-soltot**2)*100;
solsusp=(1-solsusp**2)*100;
soldis=(1-soldis**2)*100;

proc print;
proc cluster method=average pseudo ccc;
var temp ph conde turbi calci oxid sodio pot clor mgne
sulf fosf amon nitr soltot sol susp soldis;
proc plot;plot _psf_*_ncl_='F';

proc tree ncl=7 inc=.10 out=c;

run;

```

Anexo 4 C. Programa de SAS para correlación entre índices de calidad del agua y variables del uso de la tierra.

```
data a;
infile 'indi.prn';
input n cod $ fecha indi;

data b;
infile 'c:dist.dat';
input cod $ dist;

proc sort data=a;by cod;
proc sort data=b;by cod;
data c;merge a b;by cod;

data d;
infile 'c:precipi.dat';
input fecha precip;
proc sort data=c;by fecha;
data e;merge d c;by fecha;

data f;
infile 'c:estacion.dat';
input cod $ orden long lat alt urb hor pas bos per taj;
area=urb+hor+pas+bos+per+taj;
purb=urb/area;phor=hor/area;ppas=pas/area;pbos=bos/area;pper
=per/area;
ptaj=taj/area;
proc sort data=e;by cod;
proc sort data=f;by cod;
data g;merge e f;by cod;

proc corr;var indi;with
orden long lat alt urb hor pas bos per taj purb phor ppas
pbos pper ptaj fecha precip ;
run;
```

Cuadro 5C. Fórmulas usadas para la conversión de los valores en índices de calidad.

Parámetro	Unidad	Índice
pH ¹	pH	Si pH < 6.7 : $I_{pH} = 10 (0.2335 \cdot pH + 0.44)$ Si pH > 6.7 y pH < 7.6 : $I_{pH} = 100$ Si pH > 7.6 : $I_{pH} = 10 (8.22 - 0.2933 \cdot pH)$
Conductividad (CE) ¹	µmohs	$I_{CE} = 535 \cdot CE^{-0.3565}$
Turbidez (T)	JTU	$I_T = 100 \cdot (500 - T) / 500$
Oxígeno disuelto (OD)	mg/l	Si OD < 5 : $I_{OD} = 0$ Si 5 < OD < 10 : $I_{OD} = 100 \cdot (1 - (10 - OD) / 10)$ Si OD > 10 : $I_{OD} = 100$
Calcio (Ca)	mg/l	$I_{Ca} = 100 \cdot (100 - Ca) / 100$
Sodio (Na)	mg/l	$I_{Na} = 100 \cdot (50 - Na) / 50$
Potasio (K)	mg/l	$I_K = 100 \cdot (20 - K) / 20$
Cloruros (Cl) ¹	mg/l	$I_{Cl} = 125.8 \cdot Cl^{-0.207}$
Sulfato (Sulf)	mg/l	Si Sulf > 250 : $I_{Sulf} = 0$ Si Sulf < 250 : $I_{Sulf} = 100 \cdot (250 - Sulf) / 250$
Fosfatos (Fosf)	mg/l	$I_{Fosf} = 100 \cdot (2 - Fosf) / 2$
Amonio (Amon)	mg/l	Si Amon > 0.9 : $I_{Amon} = 0$ Si Amon < 0.9 : $I_{Amon} = 100 \cdot (0.9 - Amon) / 0.9$
Nitrato (Nitr)	mg/l	Si Nitr > 0.9 : $I_{Nitr} = 0$ Si Nitr < 0.9 : $I_{Nitr} = 100 \cdot (0.9 - Nitr) / 0.9$
Sólidos totales (Solt)	mg/l	Si Solt > 1100 : $I_{Solt} = 0$ Si Solt < 1100 : $I_{Solt} = 100 \cdot (1100^2 - Solt^2) / (1100^2 - 100^2)$
Sólidos en suspensión (Sols)	mg/l	Si Sols > 100 : $I_{Sols} = 0$ Si Sols < 100 : $I_{Sols} = 100 \cdot (100 - Sols) / 100$
Sólidos disueltos (Sold)	mg/l	Si Sold > 1000 : $I_{Sold} = 0$ Si Sold < 1000 : $I_{Sold} = 100 \cdot (1000^2 - Sold^2) / (1000^2 - 150^2)$
Dureza (Dur)	mg/l	Si Dur > 300 : $I_{Dur} = 0$ Si Dur < 300 : $I_{Dur} = 100 \cdot (300^2 - Dur^2) / 300^2$

¹ Dinius (1972)

Cuadro 5C. Continuación

Indice global ponderado:

$$(I_g) = (3 * I_{OD} + I_{CE} + 2 * I_{pH} + 0.5 I_{Ca} + 0.5 I_{Sulf} + 0.5 I_{Cl} - 0.5 I_{Na} + 2 * I_{Nit} + 0.5 I_{Amon} + 2 * I_{Fosf} + 0.5 * I_K + 3 * I_{Solt} + I_{Sols} + 2 * I_{Sold} + 3 * I_{Turbi}) / 22$$

Adaptado de Inhaber (1974) , Barbiroli *et al* (1992) y Dinius (1972).

Cuadro 6C. Cálculo de la dureza y de la relación de adsorción de sodio (SAR)

La fórmula empleada para calcular la dureza fué:

$$\text{Dureza} = ((\text{Ca}/20) + (\text{Mg}/12)) * 50.05$$

y la fórmula para calcular la relación de adsorción de sodio fué:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Sodio}^+}{\sqrt{\frac{\text{Calcio}^{++} + \text{Magnesio}^{++}}{2}}}$$

En la cual las concentraciones de los iones deben estar expresadas en equivalentes por millón.

Se transforma de mg/l a meq/millón multiplicando por las constantes:

0.04990 calcio
 0.08224 magnesio
 0.04350 sodio

ANEXO D



Cuadro 2 D. Resultado del análisis bacteriológico en diferentes puntos de la cuenca del río Reventado.

--- RESULTADO DE ANALISIS BACTERIOLOGICO ---

FECHA: 23 DE MAYO DE 1994. **SOLICITANTE:** IICA, PROYECTO GTZ.
ATENCION: ING. LAURA RAMIREZ.
MUESTREO: POR EL INTERESADO.

REFERENCIA: MUESTRAS DE AGUA DEL RIO REVENTADO, CARTAGO.

MUESTRA:	RECuento TOTAL AEROBIO (U.F.C./dL)	COLIFORMES TOTALES (U.F.C./dL)	COLIFORMES FECALES (U.F.C./dL)
# 1.....	9.2 X 10 ³	2.6 X 10 ³	1.0 X 10 ³
# 2.....	9.8 X 10 ³	4.3 X 10 ³	1.5 X 10 ³
# 3.....	4.2 X 10 ³	1.8 X 10 ³	5.0 X 10 ²
# 4.....	1.1 X 10 ⁴	3.1 X 10 ³	9.0 X 10 ²
# 5.....	6.6 X 10 ³	3.3 X 10 ³	9.0 X 10 ²
# 6.....	4.1 X 10 ³	7.0 X 10 ²	2.0 X 10 ²
# 7.....	4.1 X 10 ³	1.9 X 10 ³	8.0 X 10 ²
# 8.....	1.4 X 10 ³	1.0 X 10 ³	NEGATIVO
# 9.....	2.6 X 10 ³	5.0 X 10 ³	1.0 X 10 ²
# 10.....	1.7 X 10 ⁴	4.1 X 10 ³	1.5 X 10 ³

OBSERVACIONES:

* METODO ANALITICO: STANDAR METHODS FOR THE ANALYSIS OF WATER AND WASTE WATER
 * CONDICIONES PARA AGUA POTABLE: RECuento TOTAL MENOR A 500, COLIFORMES TOTALES MENORES A 3 Y COLIFORMES FECALES NO DEBEN DETECTARSE.

LABORATORIO QUIMICO
 LAMBDA
 Tel. 26-46-62 — Apdo. 577-1011
 San José - Costa Rica
 DRA. VIRGINIA MONTERO.
 COD. 733

NOTA:

Refiérase al número de este resultado para cualquier consulta.
 Resultado válido para la muestra preparada y enviada al Laboratorio por el interesado.

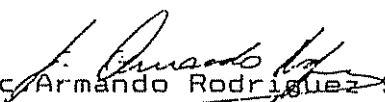
Cuadro 3D. Resultados del análisis de plaguicidas en diferentes puntos de muestreo en la cuenca del río Reventado.

Tipo de muestra: AGUA
Fecha de muestreo: 16/08/1994
Compañía/Finca:
Lugar: QUEBRAD RODEO
LLANO GRANDE DE OREAMUNO
Provincia: Cartago

RESIDUOS DETECTADOS

Plaguicida Detectado	Cantidad (mg/Kg)	Límites máx. permit. (mg/Kg)		
		EPA	CODEX	Nacional

— No se detectaron plaguicidas —


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas

EPA = Environmental Protection Agency, U.S.A.
CODEX = Codex Alimentarius (OMS - FAO)
NACIONAL = Establecido por M.E.I.C.

N.P. = No Permitido
N.E. = No Establecido

REPORTE DE ANALISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS


ANALISIS REALIZADOS

Organofosforados

ACEFATO	CLOPPIRIFOS
DEMETON-S-METIL	DIAZINON
DIMETOATO	DISULFOTON
ETION	FENAMIFOS
FENITROTION	MALATION
METAMIDOFOS	METIL-PARATION
MEVINFOS	MONOCROTOFOS
OMETOATO	PARATION ETIL
PIRIMIFOS METIL	PROFENOFOS
TERBUFOS	

Organoclorados

ALDRIN-DIELDRIN	CAPTAN
CLORDANO	CLOTALONIL
DDT	DIELDRIN
ENDOSULFAN	ENDRIN
HCH TOTAL	HEPTACLOR
HEXACLOROBENCENO	LINDANO
METOXICLOR	O,P-DDD
O,P-DDE	P,P'-DDD
P,P'-DDE	QUINTOCENO
VINCLOZOLIN	


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas


REPORTE DE ANALISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS

Tipo de muestra: AGUA
Fecha de muestreo: 16/08/1994
Compañía/Finca:
Lugar: QUEBRADA PAVAS
OREAMUNO, CARTAGO
Provincia: Cartago

RESIDUOS DETECTADOS

Plaguicida	Cantidad	Limites máx. permit. (mg/Kg)		
Detectado	(mg/Kg)	EPA	CODEX	Nacional

_____ No se detectaron plaguicidas _____


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas

EPA = Environmental Protection Agency, U.S.A.
CODEX = Codex Alimentarius (OMS - FAO)
NACIONAL = Establecido por M.E.I.C.

N.P. = No Permitido
N.E. = No Establecido

REPORTE DE ANALISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS


ANALISIS REALIZADOS

Organofosforados

ACEFATO	CLORPIRIFOS
DEMETON-S-METIL	DIAZINON
DIMETOATO	DISULFOTON
ETION	FENAMIFOS
FENITROTION	MALATION
METAMIDOFOS	METIL-PARATION
MEVINFOS	MONOCROTOFOS
OMETOATO	PARATION ETIL
PIRIMIFOS METIL	PROFENOFOS
TERBUFOS	

Organoclorados

ALDRIN-DIELDRIN	CAPTAN
CLORDANO	CLOROTALONIL
DDT	DIELDRIN
ENDOSULFAN	ENDRIN
HCH TOTAL	HEPTACLOR
HEXACLOROBENCENO	LINDANO
METOXICLOR	O,P-DDD
O,P-DDE	P,P'-DDD
P,P'-DDE	QUINTOCENO
VINCLOZOLIN	


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas


REPORTE DE ANALISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS

Tipo de muestra: AGUA
Fecha de muestreo: 16/08/1994
Compañía/Finca:
Lugar: RIO REVENTADO
TIERRA BLANCA
Provincia: Cartago

RESIDUOS DETECTADOS

Plaguicida Detectado	Cantidad (mg/Kg)	Limites máx. permit. (mg/Kg)		
		EPA	CODEX	Nacional

_____ No se detectaron plaguicidas _____


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas

REPORTE DE ANALISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS

ANALISIS REALIZADOS

Organofosforados


ACEFATO
DEMETON-S-METIL
DIMETOATO
ETION
FENITROTION
METAMIDOFOS
MEVINFOS
OMETOATO
PIRIMIFOS METIL
TERBUFOS

CLOPPIRIFOS
DIAZINON
DISULFOTON
FENAMIFOS
MALATION
METIL-PARATION
MONOCROTOFOS
PARATION ETIL
PROFENOFOS

Organoclorados

ALDRIN-DIELDRIN
CLORDANO
DDT
ENDOSULFAN
HCH TOTAL
HEXACLOROBENCENO
METOXICLOR
O,P-DDE
P,P'-DDE
VINCLOZOLIN

CAPTAN
CLOROTALONIL
DIELDRIN
ENDRIN
HEPTACLOR
LINDANO
O,P-DDD
P,P'-DDD
QUINTOCENO


Lic. Armando Rodríguez S.
Jefe del Laboratorio de Residuos
de Plaguicidas