

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA-  
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ESCUELA DE POSTGRADO

**“Evaluación de residuos de plaguicidas en agua y determinación de la  
vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea , en la Subcuenca del  
Río Poás, Costa Rica.”**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Postgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, como requisito parcial para optar al grado de:

Magíster Scientiae

Por

Jorge Eduardo Vargas Zúñiga

Turrialba, Costa Rica  
2004

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

***MAGÍSTER SCIENTIAE***

**FIRMANTES:**

---

Sergio Velásquez, M.Sc.

**Consejero Principal**

---

Sergio Abarca Monge, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

---

Manuel Carballo, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

---

Glenn Galloway, Ph.D.

**Director Programa de Educación y  
Decano de la Escuela de Postgrado**

---

Jorge Eduardo Vargas Zúñiga

**Candidato**

## DEDICATORIA



Toma Dios la culminación de esta etapa de mi vida como un tributo a tu grandeza e infinita misericordia.

Reciban Mami y Papi esto como un tributo a su titánico esfuerzo por brindarnos educación.

Acepten mi esposa Sarita, y mis hijas Angélica y Mariana, compartir conmigo la alegría de este triunfo.

Guarden Walter y Ana este esfuerzo como un motor de motivación y realización en sus vidas.



## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas y organizaciones por su apoyo y orientación durante este período de estudios y en múltiples momentos de mi vida.

Gracias de todo corazón por darle significa a las palabras: amistad, compañerismo, mística, vocación.

Al Ing. Sergio Velásquez Mazariegos M.Sc., por su incondicional apoyo, dirección y orientación en el desarrollo de esta investigación. Al Ing. Manuel Carballo M.Sc. por sus valiosos aportes como miembros del Comité Asesor. De forma muy especial al Ing. Sergio Abarca Monge M.Sc., porque su motivación y apoyo fue el motor para cumplir esta etapa de mi vida.

Al Servicio Fitosanitario del Estado, especialmente al personal de la Unidad Técnica de Apoyo y a la Unidad de SIG, gracias compañeros por su motivación y apoyo.

Al OIRSA, por su apoyo financiero, necesario para la realización de mis estudios y al CONICIT con aprecio y respeto por todo su apoyo.

A toda la grandiosa comunidad estudiantil del CATIE, especialmente a la promoción 2002-2003, han sido grandes compañeros y no dudo que serán grandes profesionales y mejor aún... grandes personas.

Al personal de postgrado CATIE, por sus esfuerzos para que mi estancia fuera muy placentera durante estos años, especialmente a Noily, Jeannette, José y Alfonso. Además, muy cariñosamente al personal de la Biblioteca Conmemorativa Orton.

Gracias de forma muy sincera a todos, sin su apoyo esto podría haber sido muy difícil, pero con su ayuda de verdad que fue gratificante.

***Que Dios los bendiga y los acompañe.***

# CONTENIDO

<b>I. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Hipótesis.....	3
<b>II. Revisión de literatura.....</b>	<b>3</b>
2.1 El agua recurso vital, escaso y de uso múltiple .....	3
2.2 Los recursos hídricos en Costa Rica.....	5
2.3 La agricultura como la principal fuente de contaminación .....	5
2.4 La contaminación no localizada.....	6
2.5 Los principales efectos de la contaminación de aguas por plaguicidas sobre la salud humana .....	8
2.6 La supervisión de residuos de plaguicidas .....	8
2.7 Mecanismo de contaminación de los acuíferos .....	11
2.8 Como se degradan y metabolizan los plaguicidas en el ambiente .....	11
2.9 Atenuación de los contaminantes.....	12
2.10 Determinación de la vulnerabilidad (Método DRASTIC).....	13
2.11 Algunas definiciones importantes .....	14
<b>III. Materiales y Métodos .....</b>	<b>15</b>
3.1 Localización del área de estudio .....	15
3.2 Muestreo.....	15
3.2.1 Selección de los sitios de muestreo.....	15
3.2.2 Sitio de muestreo .....	17
3.2.3 Frecuencia de muestreo.....	18
3.2.4 Toma de la muestra.....	18
3.2.5 Los recipientes de muestreo.....	18
3.2.6 El tamaño de la muestra.....	19
3.2.7 Manipulación de los recipientes y muestras.....	19
3.2.8 Preparación del equipo de muestreo.....	19
3.3 Análisis de las muestras.....	19
3.4 Plaguicidas a monitorear.....	20
3.5 Diseño experimental.....	20
3.6 Análisis estadístico.....	21

<b>IV. Resultados y Discusión</b> .....	22
4.1 Características generales de las fincas de helechos.....	22
4.2 Tipo de pesticidas y frecuencia de aplicación .....	23
4.3 Residuos en fuentes de agua.....	27
4.4 Residuos en aguas de escorrentía .....	28
4.5 Residuos en aguas de lavado .....	30
4.6 Residuos en sustratos de siembra.....	31
4.7 Metodología DRASTIC.....	31
4.7.1 Características generales del área de estudio .....	31
4.7.1.1 D Profundidad del agua (Depth) .....	33
4.7.1.2 R Recarga (Recharge).....	34
4.7.1.2.1 Factor Kp.....	36
4.7.1.2.2 Factor Kv.....	36
4.7.1.2.3 Factor Kfe.....	37
4.7.1.3 A Tipo de acuífero (Aquifer).....	39
4.7.1.4 S Tipo de Suelo (Soil).....	39
4.7.1.5 T Topografía (Topographic).....	40
4.7.1.6 I Impacto en la zona no saturada (Impact vadose zone).....	40
4.7.1.7 C Conductividad Hidráulica (Conductivity hydraulic).....	41
4.8 Índice DRASTIC pesticida.....	41
4.9 Índice DRASTIC no pesticida .....	44
V. Conclusiones .....	46
VI. Recomendaciones.....	48
VII. Bibliografía .....	50
VIII. Anexos .....	53

## LISTA DE CUADROS

N° de cuadro	Nombre	Página
1	Resumen de los procedimientos de laboratorio por grupos de pesticidas de los dos laboratorios utilizados y límites de cuantificación.....	20
2	Fuente de agua utilizada en las fincas de helechos de la Zona Norte de Alajuela y Heredia, para la producción de helecho ( <i>Rumora adiantiformis</i> ).....	22
3	Principales problemas sanitarios y productos funguicidas utilizados en la producción de helecho ( <i>Rumora adiantiformis</i> ) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.....	24
4	Principales problemas de plagas y productos insecticidas utilizados en la producción de helecho ( <i>Rumora adiantiformis</i> ) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.....	25
5	Principales problemas malezas y productos herbicidas utilizados en la producción de helecho ( <i>Rumora adiantiformis</i> ) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.....	27
6	Tipo y concentración de residuos de plaguicidas encontrados en los muestreos de aguas de escorrentía durante los meses de mayo y junio 2003 .....	30
7	Rango de profundidad del agua en el suelo, área y porcentaje total, para la zona de estudio .....	34
8	Clasificación de actividades de uso del suelo en la zona del proyecto, área y porcentaje de área .....	36
9	Componentes del coeficiente de infiltración y factores de ponderación .....	38
10	Volúmenes de recarga neta estimados, factor de clasificación y área de recarga.....	38
11	Rangos de pendiente, área y porcentaje del área total, para la zona de estudio .....	40
12	Vulnerabilidad relativa, rango de clasificación de índice DRASTIC pesticida, valor estimado de área y % del área total.....	41
13	Vulnerabilidad relativa, rango de clasificación de índice DRASTIC no pesticida, valor estimado de área y % del área total.....	44

## LISTA DE FIGURAS

<b>N° de figura</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
1	Detalle de la ubicación del área de estudio y las subcuencas estudiadas.....	16
2	Representación gráfica de la aplicación de la metodología DRASTIC para la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico a la contaminación por plaguicidas .....	32
3	Detalle de la interpolación de la profundidad del agua subterránea, a partir de la información de pozos del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento .....	35
4	Rango de clasificación de índice DRASTIC para contaminante pesticida, en la zona de estudio .....	43
5	Rango de clasificación de índice DRASTIC para contaminante no pesticida, en la zona de estudio .....	45

## LISTA DE ANEXOS

<b>N° de anexo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
1	Reporte de análisis realizado a las muestras de agua en el Laboratorio del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental.....	54
2	Encuesta realizada a los productores y/o encargados y/o administradores de las fincas productoras de helechos hoja de cuero en la zona del proyecto .....	58
3	Índices DRASTIC y factores de ponderación para contaminante pesticida y no pesticida .....	59
4	Rango de clasificación de índice DRASTIC para D Depth Profundidad del agua en el suelo, en la zona de estudio .....	63
5	Índice de clasificación del Factor Kp para el cálculo de la tasa de recargo neta...	64
6	Índice de clasificación del Factor Kv para el cálculo de la tasa de recargo neta...	65
7	Índice de clasificación del Factor Kfc para el cálculo de la tasa de recargo neta..	66
8	Rango de clasificación de índice DRASTIC para R Recharge Recarga Neta, en la zona de estudio .....	67
9	Rango de clasificación de índice DRASTIC para S Soil tipe Tipo de Suelo, en la zona de estudio .....	68
10	Rango de clasificación de índice DRASTIC para T Topografic (Pendiente), en la zona de estudio .....	69
11	Rango de clasificación de índice DRASTIC para C Conductivity Hidraulic Conductividad Hidráulica, para contaminante pesticida, en la zona de estudio....	70

Vargas Zúñiga JE. 2003. Evaluación de residuos de plaguicidas en agua y determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea , en la Subcuenca del Río Poás, Costa Rica. Tesis M.Sc. Turrialba, CATIE, 70 p.

**Palabras clave:** cuenca, Río Poás, Costa Rica, residuos plaguicidas, fuentes de agua, agua de escorrentía, sustratos, agua subterránea, vulnerabilidad, contaminación, DRASTIC, SIG.

## RESUMEN

En esta investigación se evaluó la presencia de residuos de plaguicidas, en la Zona norte de Alajuela y Heredia. Se establecieron puntos de muestreo en subcuencas donde predominará el uso del suelo para: pastos, café, helechos hoja de cuero, y bosque. Los sustratos sobre los que se realizaron los análisis fueron agua de escorrentía, tomas de agua, agua de lavado de helechos y sustrato de siembra de helechos.

Los residuos de plaguicidas analizados fueron organoclorados, organofosforados, piretroides, carbamatos y ditiocarbamatos (23 plaguicidas en el laborotio de MAG-SFE y 44 plaguicidas en el laboratorio de la UCR-CINA.

Los residuos detectados en los sustratos analizados fueron poco frecuentes y no fue posible evidenciar un proceso sistemático de contaminación, que permitiera asociar el uso agropecuario, con el tipo y frecuencia de los contaminantes.

Adicionalmente se determinó la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, para contaminantes pesticida y no pesticidas. Esto se realizó mediante la implementación de la Metodología DRASTIC, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Como producto de este proceso se logró evidenciar en forma gráfica las diferencias de vulnerabilidad de la zona y establecer de manera gráfica su relación con las actividades de uso actual, con lo cual se constituye en un importante insumo para la planificación e implementación de acciones en la zona.

Vargas Zúñiga JE. 2003. Pesticide pollution assesment and groundwater pollution vulnerability analysis in the Poas River Basin, Costa Rica. Thesis M.Sc. Turrialba Costa Rica, CATIE, 70 p.

**Key Words:** Pesticides, Water Pollution, Groundwater pollution, DRASTIC model, GIS, Vulnerability assesment, Poas River, Costa Rica, Watershed, Basin.

## SUMMARY

The presence of remainders of pesticides was evaluated at the Poas River Basin, Costa Rica. Sampling points were established under different landcovers and landuses. The landcovers and landuses considered were: grass, coffee, greenhouses (leather-leaf ferns) and forest. Substratums used were runoff water, water coming from springs, water coming from the fern leaves cleaning process and fern mulch. The samples were analized at the Ministry of Agriculture and University of Costa Rica Labs. Five groups of pesticides were analized: Organophosphate, Carbamate, Organochlorine, Pyretroids and Ditiocarbamate. In addition, a groundwater pesticide pollution vulnerability assesment analysis was performed using the DRASTIC model.

As a result of this study, it was found that for all the substratums analyzed the presence of remainder of pesticide was few frequent. For this reason, it was not possible to have evidencies that a systematic pollution process is ocurrying and associate it to the landuse, landcover, type and frequency of the pollutants.

The groundwater pollution vulnerability analysis allowed to establish differences among the study area and in a graphic way relate it to the different landcovers and associated landuses. In short, this research contributes with important inputs to the planning process.

## **I. Introducción**

El agua es parte esencial de la naturaleza física del hombre y de los demás seres vivos, plantas y animales. Dentro de los ciclos de vida realiza importantes funciones como activador y regulador que moldean el entorno. El agua es un recurso de uso múltiple, se ha constituido en uno de los más importantes recurso a conservar, proteger y mejorar por los países.

El crecimiento de las actividades agrícolas se realizó a expensas de áreas boscosas, en muchos casos sin ninguna planificación más que la necesidad de terrenos para sembrar. No se consideró el papel de ciertas áreas en los procesos de carga y recarga de los acuíferos que también son indispensables para el proceso productivo, como parte esencial del proceso de captura, almacenamiento y transporte del agua

Es frecuente encontrar actividades agrícolas en las áreas de recarga de los acuíferos, en donde interfieren o modifican los procesos naturales de infiltración y drenaje, además de que en algunos casos producen importantes aportes de sustancias contaminantes de las aguas, excretas de animales o bien deriva de plaguicidas que los productores utilizan para la producción.

La frontera agrícola se encuentra agotada y la posibilidad de habilitar nuevas áreas de producción es escasa. Además el modelo agroexportador en que se basó nuestro país logró acelerar los procesos de erosión, contaminación y desbalances en los niveles de plagas. Estos elementos hacen cada vez más difícil la producción y en algunos casos ha sido necesario abandonar las siembras o bien barbechar los terrenos por períodos largos de tiempo.

Dentro de toda esta dinámica el productor se ha visto forzado a realizar un uso más intensivo del recurso suelo, generando mayores volúmenes de producción y a cumplir con más requisitos de calidad, principalmente relacionados con la impecable apariencia de los productos. En este proceso se ha involucrado a los productores en un uso más intensivo de fertilizantes y plaguicidas que les ayuden a producir, los productos que el mercado consume y no lo que sus tierras pueden producir, generando importantes conflictos de uso de suelo y un evidente deterioro ambiental.

El crecimiento de la población es otro elemento que realiza presión sobre los alimentos y sobre la tierra misma, desplazando las actividades agrícolas hacia terrenos menos aptos para la producción y además demandando mayores servicios. Es necesario evaluar el impacto de las diferentes actividades antropocéntricas que se realizan en una cuenca, con el objetivo de establecer estrategias o regulaciones tendientes al mantenimiento y mejora del recurso agua.

La contaminación ambiental de esta manera se constituye en el mayor problema de nivel mundial. En el caso específico del recurso agua, la agricultura es la fuente de contaminación más frecuente y de mayor impacto. Es inminente corregir los daños y abusos cometidos contra nuestros recursos hídricos. Por lo tanto es necesario determinar las causas de la degradación de la calidad del agua, y cuantificar la magnitud de los numerosos factores del proceso de contaminación.

Se deben establecer procedimientos estándar para la evaluación y monitoreo de estos recursos y desde luego concertar una acción sinérgica de todos los actores, para evitar que se incrementen las opiniones y acciones contradictorias, propiciando mejor la potencialización de los programas y recursos destinados a acabar con la contaminación o a reducirla.

El agua tiene un papel fundamental en el desarrollo de los pueblos, donde además del plano agrícola se reconoce su importancia a en el desarrollo industrial, social y sanitario. Es ahora evidente para muchos que la escasez del agua incide directamente sobre la estabilidad del mundo. Sin embargo es conocido que las actividades agrícolas pueden contribuir al deterioro de la calidad del agua mediante la descarga de varios materiales: sedimentos, plaguicidas, abonos animales, fertilizantes y otras fuentes de materia orgánica e inorgánica. Muchos de estos contaminantes llegan a los recursos superficiales y subterráneos como consecuencia de fenómenos muy generalizados de escorrentía y precolación.

### **1.1 Objetivo general:**

Determinar la presencia y distribución en el espacio y tiempo de agroquímicos disueltos en el agua (a nivel de agua de escorrentía en finca, fuentes de agua potable, aguas de lavado) así como evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, en la zona alta de Alajuela y Heredia.

### **1.2 Objetivos específicos:**

- ☞ Determinar si existe contaminación por pesticidas en las fuentes de agua, en el agua de escorrentía, en los sustratos de siembra de helechos y en las aguas de lavado de las empacadoras de helecho. .
- ☞ Monitorear el tipo de agroquímico que provoca la contaminación, en fuentes de agua y agua de escorrentía de fincas modelo de los sistemas de manejo más frecuentes en la zona.
- ☞ Caracterizar el uso y manejo de pesticidas más frecuentes en los principales sistemas de producción del área de estudio

- ✂✂ Proponer un diseño de muestreo que considerando los componentes: uso actual del suelo, geología, morfología, topografía y movimiento de aguas subterráneas permita establecer con claridad las áreas de carga y los puntos de monitoreo de calidad de agua
- ✂✂ Correlacionar las actividades agropecuarias con los tipos de residuos contaminantes, mediante la evaluación del uso actual del suelo, en las áreas de recarga de los acuíferos.
- ✂✂ Monitorear el gradiente de contaminación de flujos de agua a partir de las fincas modelo o tipo seleccionadas, en la zona, en el tiempo y espacio.
- ✂✂ Implementar la metodología DRASTIC utilizando Sistemas de Información Geográfica, para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona de estudio.

### **1.3 Hipótesis**

Existe contaminación por pesticidas en las fuentes de agua y la presencia y tipo de residuos está en relación al tipo de actividad agrícola desarrollada en la zona de carga del acuífero y a la época del año en que se realice el muestreo (invierno o verano).

## **II. Revisión de literatura.**

### **2.1 El agua recurso vital, escaso y de uso múltiple.**

En su evaluación sobre las fuentes de agua potable en el mundo, la Asociación Mundial para el Agua, en 1999 estimó que un 70% de la superficie de la tierra es agua, pero la mayor parte de ésta es oceánica. En volumen, sólo 3% de toda el agua del mundo es agua dulce, y en su mayor parte no se halla generalmente disponible. Unas tres cuartas partes de toda el agua dulce se halla inaccesible, en forma de casquetes de hielo y glaciares situados en zonas polares muy alejadas de la mayor parte de los centros de población; sólo un 1% es agua dulce superficial fácilmente accesible. Ésta es primordialmente el agua que se encuentra en los lagos y ríos y a poca profundidad en el suelo, de donde puede extraerse sin mayor costo. Sólo esa cantidad de agua se renueva habitualmente con la lluvia y las nevadas y es, por tanto, un recurso sostenible. En total, sólo un centésimo del uno por ciento del suministro total de agua del mundo se considera fácilmente accesible para uso humano.

Olskansky et al, 1987 consideran que el uso excesivo y la contaminación de los recursos de agua dulce del mundo son fenómenos de reciente data. Se desconocen las consecuencias a largo plazo, pero ya han infligido grave daño al medio ambiente y presentan riesgos crecientes a numerosas especies. El agua contaminada y la falta de saneamiento también están incubando una tragedia

sanitaria humana. Las enfermedades relacionadas con el agua son una tragedia humana que todos los años causan la muerte de millones de personas, impiden que millones más gocen de una vida saludable y menoscaban los esfuerzos en favor del desarrollo. En todo el mundo unos 2.300 millones de personas padecen enfermedades vinculadas con el agua.

La O.M.S, 1998 estima que un 60% de la mortalidad de niños menores de un año está relacionada con enfermedades infecciosas y parasitarias, en su mayor parte vinculadas con el agua. La contaminación está muy generalizada. Pocos países, sea en desarrollo o industrializados, han protegido adecuadamente la calidad del agua y han controlado su contaminación. Muchos países carecen de normas para controlar el agua de manera adecuada, mientras que otros no pueden hacer cumplir las normas de calidad del agua.

La tremenda producción de contaminantes del mundo pone a prueba la capacidad de las corrientes de agua para asimilar o librarse de la contaminación. Los ingenieros hidráulicos tienen un dicho: "la solución de la contaminación es la dilución". Este axioma está asumiendo dimensiones alarmantes. Todos los años se arrojan a los ríos, arroyos y lagos aproximadamente 450 kilómetros cúbicos de aguas servidas. Para diluir y transportar esta agua sucia antes de volverla a usar se necesitan otros 6.000 kilómetros cúbicos de agua limpia —un volumen igual a unas dos terceras partes del total anual de la escorrentía de agua dulce utilizable del mundo. De continuar las tendencias actuales, a mediados del próximo siglo se necesitaría todo el caudal fluvial estable del mundo sólo para el transporte y dilución de los contaminantes, según estima la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Gallego, 2000 informa que en Europa y Norteamérica confrontan ya enormes problemas de contaminación del agua. Más de 90% de los ríos de Europa tienen altas concentraciones de nitrato, sobre todo de productos químicos utilizados en la agricultura, y 5% de ellos tienen concentraciones por lo menos 200 veces mayores que los niveles naturales de nitrato comunes de los ríos no contaminados. En Polonia, tres cuartas partes del agua de los ríos del país están demasiado contaminadas aun para uso industrial.

La Asociación Mundial para el Agua (GWP), 1999 considera que unos de los peores contaminantes son las sustancias químicas sintéticas. En el mundo se usan comúnmente unas 70.000 sustancias químicas diferentes. Se estima que todos los años se introducen 1.000 compuestos nuevos. Muchos de ellos llegan a los ríos, lagos y acuíferos subterráneos. En los Estados Unidos solamente, se han detectado más de 700 sustancias químicas en el agua para beber, 129 de las cuales se consideran sumamente tóxicas.

## **2.2 Los recursos Hídricos en Costa Rica.**

En su informe sobre el estado de los recursos hídricos, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 1997 indica que en Costa Rica el agua está en todas partes, porque nuestro territorio tiene una posición geográfica privilegiada. En términos generales, el clima de Costa Rica es tropical lluvioso. Por su cercanía a los mares Atlántico y Pacífico y por su condición ístmica, puede considerarse marítimo.

El territorio costarricense tiene cinco zonas montañosas: la Cordillera Volcánica de Guanacaste, la Cordillera de Tilarán, la Cordillera Volcánica Central, la Cordillera de Talamanca y la Fila o Cordillera Costeña. Todas estas cordilleras presentan un relieve y una evolución muy variada, determinada por la existencia de diversas unidades geológicas, que con el discurrir del tiempo, han sido modificadas por la acción de las aguas superficiales, AyA, 1997.

Estas formas del relieve determinan la existencia de tres zonas o vertientes principales: Vertiente Pacífica, Vertiente Atlántica o Caribe y la Subvertiente Norte. En conjunto, las condiciones mencionadas hacen que el país posea un gran potencial de recursos hídricos, que en muy buena parte, son utilizados para beneficiar a la población y a todas aquellas actividades de desarrollo, AyA, 1997.

En Costa Rica el deterioro de las cuencas según Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 1997 se puede conceptualizar en dos grandes temas: la alteración y la contaminación ambiental, aspectos que están relacionados entre sí y que se analizan a continuación. La alteración se manifiesta especialmente como consecuencia de la deforestación, del cambio de uso de la tierra, de la explotación de recursos minerales y de los asentamientos humanos.

Gallego 2000, anota que en otras épocas, los ríos diluían los desechos, la materia orgánica era oxidada y la inorgánica era disuelta o llevada. Hoy en día en muchos lugares, la capacidad natural de autopurificación del agua ha llegado a su límite. Ya no se puede seguir asimilando y estabilizando los desechos. Los ríos están tan turbios que la luz del sol no penetra lo suficiente y la vida vegetal de los ríos muere por falta de luz para la fotosíntesis que absorbe el dióxido de carbono y desprende oxígeno en el agua.

## **2.3 La agricultura como la principal fuente de contaminación.**

Según la FAO, 1993 la agricultura es el sector que más contaminación produce, más aún que las industrias y las municipalidades. En prácticamente todos los países en los que se aplican

fertilizantes agrícolas y plaguicidas, se han contaminado acuíferos subterráneos y el agua de superficie. Los desechos animales son otra fuente de contaminación persistente en algunas zonas. El agua que vuelve a los ríos y arroyos después de haberse utilizado para el riego está a menudo seriamente degradada por el exceso de nutrientes, salinidad, agentes patógenos y sedimentos que suelen dejarla inservible para cualquier otro uso posterior, a menos de tratarla —habitualmente a gran costo— en instalaciones depuradoras de agua.

En Estados Unidos, los productos químicos usados en la agricultura, los sedimentos de la erosión y los desechos animales han ensuciado más de 278.000 kilómetros de vías fluviales. Se dice que la agricultura es responsable de 70% de la actual contaminación del agua en los Estados Unidos. En la India, que depende de la agricultura de regadío para abastecerse de alimentos, más de 4 millones de hectáreas de tierra de alta calidad han quedado abandonadas a raíz de la salinización y el anegamiento causados por el riego excesivo OMS, 1998.

Según Ayers y Westcot, 1987 la agricultura es al mismo tiempo causa y víctima de la contaminación de los recursos hídricos. Es causa, por la descarga de contaminantes y sedimentos en las aguas superficiales y/o subterráneas, por la pérdida neta de suelo como resultado de prácticas agrícolas desacertadas y por la salinización y anegamiento de las tierras de regadío. Es víctima, por el uso de aguas residuales y aguas superficiales y subterráneas contaminadas, que contaminan a su vez los cultivos y transmiten enfermedades a los consumidores y trabajadores agrícolas.

#### **2.4 La contaminación no localizada.**

Chesters y Schierow, 1985 indican que la contaminación "difusa", es resultado de un amplio grupo de actividades humanas en las que los contaminantes no tienen un punto claro de ingreso en los cursos de agua que los reciben. Por el contrario, la contaminación procedente de fuentes localizadas está asociada a las actividades en que el agua residual va a parar directamente a las masas de agua receptoras, por ejemplo, mediante cañerías de descarga, en las que se pueden fácilmente cuantificar y controlar. Obviamente, la contaminación de fuentes no localizadas es mucho más difícil de identificar, medir y controlar. Debe evitarse el término "fuente difusa", ya que en los Estados Unidos tiene connotaciones jurídicas que pueden incluir ahora a determinados tipos de fuentes localizadas.

Según FAO, 1993 en la mayor parte de los países, todos los tipos de prácticas agrícolas y formas de utilización de la tierra, incluidas las operaciones de alimentación animal (granjas de engorde), se consideran como fuentes no localizadas. Las características principales de las fuentes no localizadas

son que responden a las condiciones hidrológicas, presentan dificultades para la medición o control directo (y, por ello, son difíciles de regular), y se concentran en las prácticas de ordenación de la tierra y otras afines.

Los contaminantes de procedencia no localizada, cualquiera que sea la fuente, se desplazan por la superficie terrestre o penetran en el suelo, arrastrados por el agua de lluvia y la nieve derretida. Estos contaminantes consiguen abrirse paso hasta las aguas subterráneas, tierras húmedas, ríos y lagos y, finalmente, hasta los océanos en forma de sedimentos y cargas químicas transportadas por los ríos. La repercusión ecológica de estos contaminantes puede ir desde pequeños trastornos hasta graves catástrofes ecológicas, con repercusiones en los peces, las aves y mamíferos y sobre la salud humana Ongley, 1997.

En un estudio que es, sin duda ninguna, el primero y más detallado de todos los análisis efectuados sobre la contaminación de fuentes no localizadas, el Canadá y los Estados Unidos emprendieron en los años setenta un amplio programa de identificación de las fuentes localizadas y no localizadas en toda la cuenca de los Grandes Lagos. Ello se debió en gran parte a la presión de la opinión pública (por ejemplo, artículos de prensa con títulos como "¡El lago Erie ha muerto!"), preocupada por el deterioro de la calidad del agua y, en particular, por los casos visibles de proliferación de algas y la multiplicación de las malas hierbas acuáticas. En términos científicos, la situación podía calificarse de hipertrófica en el lago Erie y eutrófica (enriquecimiento de nutrientes en el agua) en el lago Ontario, debido a la aportación excesiva de fósforo procedente de fuentes localizadas y no localizadas, Ongley 1997.

Desde los años setenta se ha observado también en Europa una preocupación creciente por el aumento de los residuos de nitrógeno, fósforo y plaguicidas en las aguas superficiales y subterráneas. La intensificación de los cultivos y las actividades ganaderas "industriales" han llevado a la conclusión, ya alcanzada en Francia en 1980, de que la agricultura es un importante factor de contaminación no localizada en las aguas superficiales y subterráneas (Ignazi, 1993 citado por Ongley, 1997).

La contaminación agrícola es causa tanto directa como indirecta de efectos en la salud humana. Según informes de la OMS, 1998 los niveles de nitrógeno en el agua subterránea han aumentado en muchas partes del mundo como consecuencia de la "intensificación de las prácticas agrícolas". Este fenómeno es bien conocido en algunas partes de Europa. Los niveles de nitrato han aumentado en algunos países hasta el punto de que más del 10 por ciento de la población bebe agua con niveles de nitrato superiores a la norma de 10 mg/l. Aunque la OMS considera que no hay ninguna vinculación

significativa entre el nitrato y el nitrito y los cánceres humanos, la directriz sobre el agua potable se ha establecido con la finalidad de evitar la metahemoglobinemia, a la que están especialmente expuestos los lactantes (OMS, 1998).

Según Ongley, 1997 y Chesters y Schierow, 1985 la principal característica de la contaminación de fuentes no localizadas es que los mecanismos primarios de transferencia de la tierra al agua son impulsados por los procesos hidrológicos que dan lugar a la escorrentía de nutrientes, sedimentos y plaguicidas. Ello es importante, no sólo porque ayuda a comprender la naturaleza de la contaminación agrícola sino también porque la elaboración de modelos de los procesos hidrológicos es el mecanismo principal a través del cual los agrónomos estiman y prevén la escorrentía agrícola y los efectos acuáticos. Si se exceptúan los casos en que los productos químicos agrícolas se vierten directamente en cursos de agua, casi todas las otras técnicas de control de las fuentes no localizadas, en el sector de la agricultura, suponen el control o modificación de los procesos de escorrentía mediante diversas técnicas de ordenación de la tierra y los (abonos) animales.

### **2.5 Los principales efectos de la contaminación de aguas por plaguicidas sobre la salud humana.**

Para la OMS, 1998, la degradación de la calidad del agua por la escorrentía de plaguicidas tiene dos efectos principales en la salud humana. El primero es el consumo de pescado y mariscos contaminados por plaguicidas; este problema puede revestir especial importancia en las economías pesqueras de subsistencia que se encuentran aguas abajo de importantes zonas agrícolas. El segundo es el consumo directo de agua contaminada con plaguicidas. Se han establecido directrices para el agua potable en relación con 33 plaguicidas. Muchos organismos encargados de la protección de la salud y el medio ambiente han establecido valores de "ingesta diaria admisible" (IDA), que indican la ingestión máxima diaria admisible durante la vida de una persona sin riesgo apreciable para su salud.

### **2.6 La supervisión de residuos de plaguicidas.**

Según la OMS, 1998 los plaguicidas fundamentales (más utilizados) se incluyen en los planes de supervisión de la mayor parte de los países occidentales, pero el costo del análisis y la necesidad de tomar muestras en momentos críticos del año (relacionados con los períodos de utilización de los plaguicidas) impiden muchas veces el establecimiento de una base de datos completa. Muchos países en desarrollo tienen dificultades para realizar análisis químicos orgánicos, debido a problemas asociados a la falta de instalaciones, impureza de los reactivos y dificultades financieras.

Los problemas analíticos asociados al bajo nivel de detección y el deficiente control de calidad en muchos laboratorios de los países en desarrollo, más el hecho de que las tasas de recuperación (parte del procedimiento analítico) pueden oscilar entre el 50 y el 150 por ciento en los compuestos orgánicos, los datos de supervisión derivados de las muestras de agua son por lo general un índice poco fiable del nivel de contaminación por plaguicidas en compuestos que están fundamentalmente asociados con la fase sólida. El número de ND (no detectables) en muchas bases de datos es, casi con certeza resultado de la mala elección del medio de muestreo (agua) y, en algunos casos, de la inadecuación de los procedimientos y servicios analíticos. Sin duda, ello hace de la evaluación de los plaguicidas en el agua una tarea difícil en muchos lugares del mundo (Sedar 2002).

Los niveles de detección analítica en la supervisión habitual de algunos plaguicidas pueden ser demasiado elevados para determinar la presencia o ausencia de los mismos en orden a la protección de la salud humana. Gilliom 1984, citado por Ongley, 1997 observó que la Red de Supervisión de Plaguicidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos tenía para ese año un límite de detección de 0,5 microgramos/l en el caso del DDT, mientras que el criterio para la vida acuática es de 0,001 microgramos/l y el criterio para la salud humana es de 0,0002 microgramos/l - en ambos casos, mucho menos que el límite habitual de detección del programa. Los valores ND no constituyen, por lo tanto, prueba de que el producto químico no esté presente en concentraciones que puedan ser nocivas para la vida acuática y la salud humana. El hecho de que este problema analítico se diera en los Estados Unidos permite pensar que el problema de obtener datos sobre la calidad del agua que se puedan utilizar para proteger la salud humana frente a la acción de los plaguicidas tiene que ser sumamente grave en los países en desarrollo.

FAO, 1998 indica que para la supervisión de los plaguicidas se requieren programas de campo y de laboratorio sumamente flexibles que puedan adaptarse a los períodos de aplicación de plaguicidas, utilizar muestras del medio más adecuado (agua, sedimentos, biota), aplicar niveles de detección que tengan significado para la protección de la salud humana y del ecosistema y distinguir entre los plaguicidas que aparecen como resultado de usos anteriores y los que se están utilizando en el presente.

Sedar, 2002 considera que para los plaguicidas que son muy solubles en agua, la supervisión debe estar estrechamente vinculada a los períodos de utilización de los plaguicidas. Informa además de que en los Estados Unidos, donde se han realizado importantes estudios sobre el comportamiento de la escorrentía de plaguicidas, las triazinas (atrazina y cianazina) y el alacloro (acetamina clorada) figuran entre los herbicidas más utilizados. Éstos se aplican fundamentalmente en primavera (mayo). Según sus estudios a lograd determinar que entre el 55 y el 80 por ciento de la escorrentía

de plaguicidas tiene lugar en el mes de junio. Recalca además que la importancia de la supervisión de estos fenómenos es que muchos de los nuevos plaguicidas solubles sólo se pueden detectar inmediatamente después de la aplicación. Por ello, los programas de supervisión que se aplican con periodicidad mensual o trimestral (práctica habitual en muchos países) probablemente no consigan cuantificar la presencia ni determinar la importancia de los plaguicidas en las aguas superficiales. Los plaguicidas que tienen aplicación limitada son todavía más difíciles de detectar en las aguas superficiales. Existe el peligro de que las autoridades lleguen a convencerse de que los valores ND (no detectables) sean demostración de la ausencia de plaguicidas. Es muy posible que ello signifique únicamente que los programas de supervisión no consiguieron recopilar datos en el momento oportuno o que no analizaron el medio más indicado.

El U.S Geological Survey, 1999, evaluó la relación entre la concentración de pesticidas con la estación del año, el uso de la tierra y su posición en la corriente de flujo, en siete cuencas de New Jersey. Lográndose determinar mediante muestras de agua tomadas del cauce de los ríos, que la concentración individual y total de los pesticidas, así como el número de pesticidas detectados en la muestras varía con la estación y las condiciones de flujo del agua (ubicación del sitio de muestreo). La concentración de los pesticidas fue baja y poco variable durante la estación de no crecimiento. Alta y variable durante la estación de crecimiento de los cultivos.

La metodología de selección de sitios de muestreo utilizada por el U.S Geological Survey, 1999 consistió en buscar subcuencas que fueran representativas de la variedad de usos de la tierra, de las condiciones fisiográficas y de drenaje, características del área de estudio. De esta forma se seleccionaron pequeñas subcuencas con tipos específicos de uso y condiciones fisiográficas. Se muestreo el agua en el río y el agua de escorrentía. Se tomaron 146 muestras de las cuales en 145 se detectaron pesticidas, 41 de los 85 pesticidas analizados fueron detectados en estas muestras. Mas del 97% de las muestras contenían al menos 5 plaguicidas y un 49% de las muestras contenían nueve o más pesticidas.

Serdar 2002, tratando de estimar la relación entre la aplicación de pesticidas y su persistencia en la corriente de agua, en Misión Creek. Escogió los sitios de muestreo mediante la evaluación del uso de la tierra, estableciendo puntos de muestreo en subcuencas de acuerdo a la actividad agrícola predominante y tomando muestras en cada punto en cinco ocasiones (Abril-Octubre 2000). Mediante esta metodología logro encontrara 11 pesticidas en el agua incluyendo 6 sobre el criterio o recomendación para la protección de la vida acuática.

Auge y Nagy s.f. suponían un alto grado de deterioro en la calidad del agua subterránea en La Plata-Buenos Aires, dado que se aplica una gran cantidad de pesticidas y se utiliza intensivamente el riego, sin un nivel adecuado de eficiencia, fundamentalmente por la magnitud del retorno. Muestrearon diferentes pozos a tomas de agua y encontraron un bajo índice de contaminación, menor en todas las muestras a los límites de potabilidad más exigentes, lo que apunta a una efectiva capacidad de fijación por parte del suelo y el cultivo.

Rincón, citado por Agüero, 2000, indica en su análisis de sensibilidad del cambio de uso de la tierra sobre los procesos hidrológicos, que sea través de la información cartográfica, fotografía aérea e imágenes de satélite, complementado con visitas de campo, se debe establecer el uso de la tierra, con la finalidad del ubicar los sitios de muestreo de acuerdo en los puntos más significativos de la clasificación de uso.

## **2.7 Mecanismo de contaminación de los acuíferos.**

La contaminación de un acuífero se realiza mediante un proceso de deposición, transportación y atenuación de los contaminantes. Este proceso lo describe Torres, 2003 a continuación:

El recorrido del contaminante tiene tres etapas: paso de la superficie al subsuelo, flujo en el medio no saturado (entre el subsuelo y la superficie freática) y flujo en el medio saturado (dentro del acuífero).

La primera etapa depende del contenido de humedad del suelo, de la carga hidráulica, de la intensidad de la lluvia y de las características propias del suelo. El contaminante puede provenir de diferentes fuentes o formas a saber: del aire cuando se disuelve en la precipitación, del suelo cuando es arrastrado por la escorrentía, o puede ser un contaminante líquido cuando es producto de derrames o vertidos.

En la segunda etapa, la velocidad con que avanza el contaminante depende del contenido de humedad, de la conductividad hidráulica de la fase no saturada y del gradiente hidráulico no saturado, las cuales dependen de la distribución de los poros y de la fisuración del medio.

En la tercera etapa, el flujo en medio saturado, el régimen es laminar, la conductividad hidráulica saturada y la diferencia de carga se establece entre dos puntos del acuífero.

## **2.8 Como se degradan y metabolizan los plaguicidas en el ambiente.**

Muchos plaguicidas se disipan o degradan rápidamente en los suelos. Se trata de un proceso de mineralización y el resultado es la conversión del plaguicida en compuestos más simples, como

H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>. Si bien parte de este proceso es resultado de reacciones químicas, por ejemplo hidrólisis y fotólisis, el principal instrumento de mineralización es el metabolismo y catabolismo microbiológico. La microbiota del suelo utiliza los plaguicidas como fuente de carbono y otros nutrientes. Algunos productos químicos, por ejemplo, el 2,4-D se descomponen muy rápidamente en el suelo, mientras que otros resisten durante más tiempo (2,4,5-T). Algunos productos químicos son muy persistentes y tardan mucho tiempo en descomponerse (atrazina)" (Stephenson y Solomon, 1993, citados por Serdar 2002).

Según Ongley, 1997 el metabolismo de los plaguicidas en los animales es un mecanismo importante en virtud del cual los organismos se protegen frente a los efectos tóxicos de las sustancias xenobióticas (productos químicos) que se encuentran en su suministro alimentario. En el organismo, el producto químico se transforma en una forma menos tóxica y o bien se elimina mediante las excreciones o se almacena en el organismo. Pueden verse afectados en este proceso diferentes órganos, en especial el hígado, según cuál sea el producto químico. Las enzimas desempeñan un papel importante en el proceso metabólico y la presencia de determinadas enzimas, en particular las oxigenasas de función mixta (OFM) en el hígado, se utiliza ahora como indicador de que el organismo ha estado expuesto a productos químicos externos.

## **2.9 Atenuación de los contaminantes.**

Freeze & Cherry, citados por Torres, 2003, indican que la capacidad de atenuación de las capas litológicas y del suelo es limitada, depende del perfil del suelo, del proceso de contaminación y del tipo de contaminante.

Foster e Hirata, 1991 describen que la atenuación ocurre por medio de procesos de dilución, retardación y eliminación y este proceso continúa en menor grado aún a mayores profundidades. Estos procesos ocurren en la zona no saturada en la cual el flujo del agua es lento, existen poros pequeños, mayor superficie específica, condiciones aeróbicas y alcalinas. Sin embargo en el caso de los contaminantes móviles y persistentes, la zona no saturada no produce atenuación sino solo retarda la llegada al acuífero.

Matthess, citados por Torres, 2003, anota que la eliminación de contaminantes que son transportados en el subsuelo, ocurre por procesos de degradación bioquímica o reacción química, incluyendo la volatilización, además la dispersión hidrodinámica produce dilución de los contaminantes móviles y persistentes principalmente por debajo del nivel freático.

## 2.10 Determinación de la vulnerabilidad (Método DRASTIC)

La vulnerabilidad la define Foster e Hidrata, 1991, como la sensibilidad en la calidad del agua subterránea ante una carga contaminante impuesta, la cual es determinada por las características del acuífero. Por lo tanto la vulnerabilidad es inversa a la capacidad de atenuación de contaminantes del acuífero.

Agüero, 2000 describe que el riesgo de contaminación está formado por la interacción de dos partes:

- ✂✂ la pasiva, representada por la vulnerabilidad que no depende de la actividad humana y no cambia con el tiempo.
- ✂✂ la activa, representada por la amenaza, que depende directamente de la actividad humana en la superficie y puede cambiar con el tiempo

La determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación se puede realizar de formas muy variadas. Esto depende principalmente del conocimiento de las variables intrínsecas del medio, de su contribución en términos de vulnerabilidad o protección que realiza al acuífero. Foster e Hirata, 1991 considera además de mucha importancia el tipo de contaminante, lo cual resulta en un análisis más complejo y que en algunos casos puede obedecer a condiciones muy propias del sitio o momento que disminuyen el potencial de la técnica empleada, por su carácter particular.

Agüero, 2000, indica que en el año 1987, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), patrocinó a Aller *et al*, para que desarrollaran un método capaz de sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada.

El nombre DRASTIC es un acróstico producto de las siglas en inglés de los factores biofísicos que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad. Los cuales son:

<b>D</b>	Depth	Profundidad del agua subterránea
<b>R</b>	Recharge	Tasa de Recarga
<b>A</b>	Aquifer	Media Tipo de Acuífero
<b>S</b>	Soil	Tipo de suelo
<b>T</b>	Topographic	Topografía
<b>I</b>	Impact vadose zone	Impacto de la zona no saturada
<b>C</b>	Conductivity hydraulic	Conductividad hidráulica

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

Agüero, 2000 indica que los factores de clasificación se establecen del 1 al 10, mientras los factores de ponderación varían según el factor implicado. Añade que los factores más importantes son la profundidad del nivel de agua, el tipo de suelo y el impacto de la zona no saturada. Además los factores de ponderación cambian cuando se trata de agentes contaminantes pesticidas. Estas diferencias fueron consideradas, porque los pesticidas son menos volátiles y persistentes en el medio. En el anexo 2 se presenta un detalle de los valores asignados a cada factor y de los valores de ponderación para el tipo de contaminante analizado.

### **2.11 Algunas definiciones importantes.**

El desarrollo sostenible es el manejo y conservación de la base de recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e institucional de tal manera que se asegure la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras. Este desarrollo sostenible (en los sectores agrícola, forestal y pesquero) conserva la tierra, el agua y los recursos genéticos vegetales y animales, no degrada el medio ambiente y es técnicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable, FAO, 1993.

La contaminación es el cambio no deseado de las características físicas, químicas o biológicas del aire, agua o tierra que puede o podría afectar peligrosamente la vida humana o la de otras especies, nuestros procesos industriales, las condiciones de vida, nuestros valores culturales o que puede o podría desgastar o deteriorar nuestros recursos de materias primas. (Science Advisory Board, U.S.EPA, citado por Ongley, 1997)

Escorrentía superficial es el volumen de agua disponible en la superficie después de descontadas todas las pérdidas. En éstas se incluyen la evapotranspiración de las plantas, el agua que se almacena en depresiones superficiales causadas por las irregularidades de la superficie del suelo, y el agua que se infiltra en el suelo. La interacción entre velocidad de infiltración y intensidad de precipitación regula en buena parte el volumen de la escorrentía superficial. Las tormentas de gran intensidad suelen producir abundante escorrentía superficial, pues la intensidad de precipitación supera con creces la velocidad de infiltración. De la misma manera, en las zonas de lluvias monzónicas y de tormentas tropicales, la duración e intensidad de la precipitación suele superar la capacidad de infiltración. La destrucción de la vegetación superficial protectora y la compactación

del suelo, sobre todo en zonas tropicales, da lugar a importantes fenómenos de erosión provocada por el gran volumen de la escorrentía superficial. Con excepción del nitrógeno que se encuentra normalmente en las aguas subterráneas de las zonas agrícolas, la escorrentía superficial es la fuente principal de productos químicos agrícolas, desechos animales y sedimentos en los cauces fluviales, Ongley, 1997.

Todd, 1964, describe un acuífero como una formación rocosa o un material permeable que puede retener y transmitir grandes cantidades de agua. Los cuales son grandes reservas subterráneas de agua y están constituidos por roca sin consolidar, grava y arena.

### **III. Materiales y Métodos.**

#### **3.1 Localización del área de estudio:**

El trabajo se desarrolló en la parte alta de los cantones de Alajuela Centro, Poás de Alajuela y Santa Bárbara de Heredia. En estos cantones se concentra la mayor cantidad de tomas de agua. Su importancia radica en que son la principal fuente de suministro de agua de las poblaciones de Alajuela y Heredia.

El área de estudio se definió como la subcuenca del río Poás, a partir de la confluencia con los ríos Itiquis y Tacáres en su parte más baja y la parte aguas esta definida por las cumbres de los Volcanes Poás y Barva. El área total de la cuenca ronda las 20.060 hectáreas. En la figura 1 se presenta un detalle de los aspectos de localización.

#### **3.2 Muestreo.**

##### **3.2.1 Selección de los sitios de muestreo.**

Se procesó una imagen de satélite del año 2002, lográndose determinar los principales actividades agrícolas desarrolladas en la zona del proyecto, Con esta información se determinaron los tres principales usos en términos del área ocupada (Pasto, Café, Bosque y Helechos). Con ayuda del modelo de elevación digital se procedió a delimitar tres subcuencas en las que predominara cada una de las actividades más importantes.

Utilizando la información uso actual del suelo, geología, morfología, topografía y movimiento de aguas subterráneas para establecer las áreas de carga y puntos de monitoreo de calidad de agua. El objetivo es establecer puntos de muestreo en cinco tipos de subcuencas, del área de estudio.

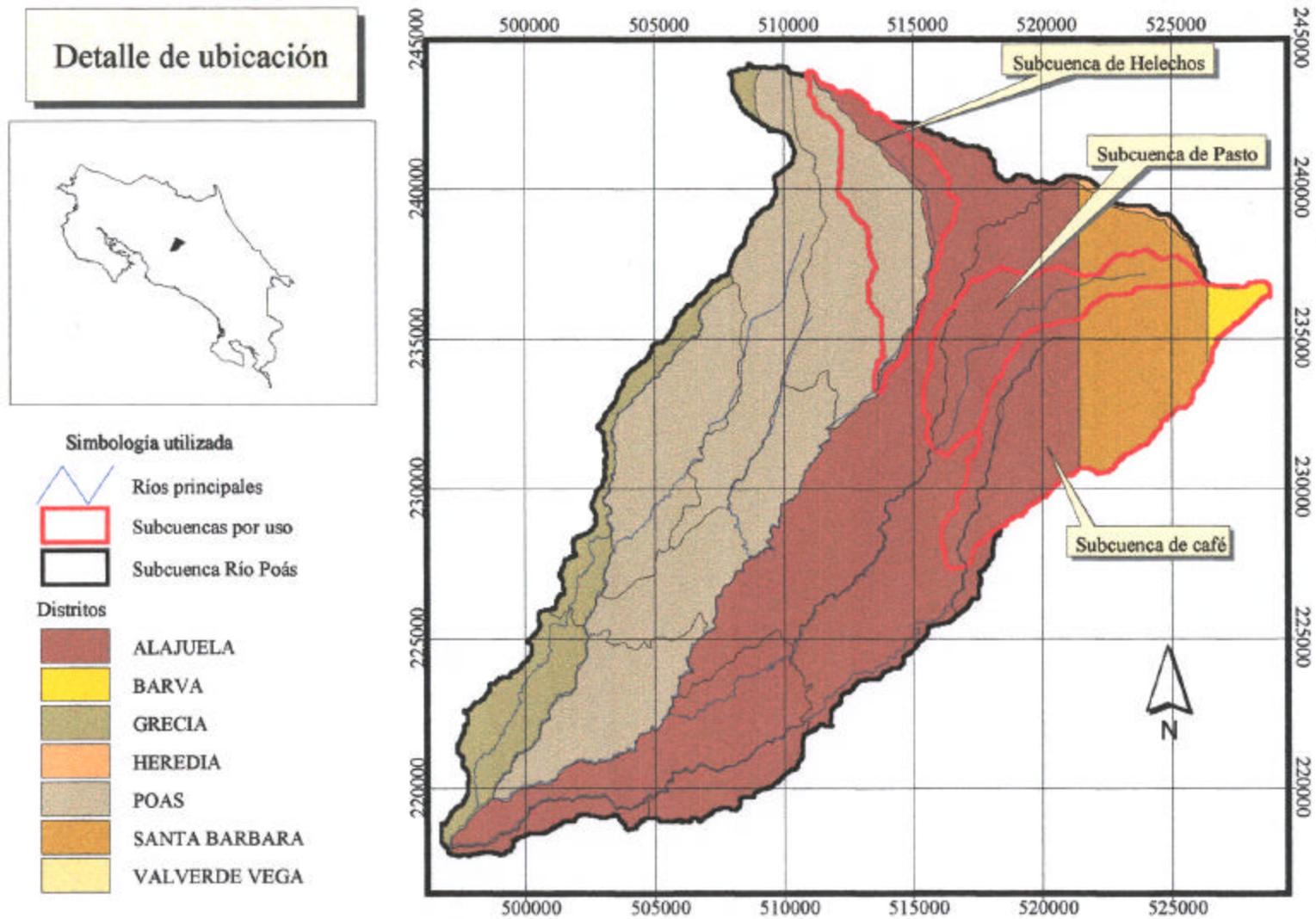


Figura 1. Detalle de la ubicación del área de estudio y las subcuencas estudiadas.

Los puntos de muestreo se establecieron en sitios caracterizados de la siguiente manera:

- a- Subcuenca con gran cantidad de fincas dedicadas a la producción de helecho hoja de cuero (*Rumora adiantiformis*)(Forst),
- b- Subcuenca con gran cantidad de fincas de café,
- c- Subcuenca con gran cantidad de fincas de pasto (lecherías)
- d- Subcuenca con predominancia de áreas boscosa o área protegida.

Las evaluaciones de residuos de plaguicidas se realizaron en los siguientes sustratos:

- ☒ Fuentes de agua para uso humano.
- ☒ Parcelas de escorrentía.
- ☒ Sustrato de siembra (mulch de burucha)
- ☒ Agua de lavado o enjuague (aquella utilizada para el lavado de los helechos que vienen del campo y van a ser acondicionados en a la empacadora, para ser exportados).

### **3.2.2 Sitio de muestreo.**

Las fuentes de agua a monitorear se escogieron del total de fuentes de la zona (usadas para consumo humano) seleccionando la fuente más baja de la subcuenca. En cada fuente se utilizó el rebalse para tomar la muestra.

Además se muestrearon dos puntos aguas arriba de la toma de agua para uso humano, con la finalidad de determinar una gradiente de contaminación hacia la fuente. Estos puntos de muestreo se ubicaron a 100 y 200 metros lineales de toma de agua, mediante el uso de G.P.S.

Una vez iniciadas las lluvias se establecieron parcelas de escorrentía dentro de las subcuencas con predominancia del cultivo de café, pasto y helechos. Se seleccionó una finca modelo o tipo del sistema de producción predominante, en este caso dentro de cada finca y específicamente en las áreas de producción del cultivo donde se establecieron las parcelas de escorrentía.

En el caso de agua de escorrentía, se utilizó una barda de hierro galvanizado a manera de embudo recolector, que canalizó el agua hacia un recipiente de almacenamiento, el recipiente se protegió de acciones de merodeo y pisoteo por animales en el caso de las fincas de pasto.

Sólo en la subcuenca con gran cantidad de fincas dedicadas a la producción de helechos se evaluaron residuos de plaguicidas en el sustrato de siembra (mulch de burucha) y en el agua de lavado o enjuague. En el caso del sustrato se escogieron lotes de producción de helechos con al menos 10 años de edad de producción. Se escogieron al azar las camas de cada lote y forma aleatoria se muestrearon al menos 20 puntos por cama, para luego cuartear la muestra y dejar sólo 1 kilogramo, este se mezcló en una bolsa plástica con dos litros de agua y se mantuvo en afitación por dos horas. Luego con un filtro de mayas se eliminaron las partículas más grandes de la mezcla.

### **3.2.3 Frecuencia de muestreo.**

Las fuentes de agua fueron muestreadas de mes por medio, dos veces en verano y dos veces en invierno. El día de muestreo se definió en forma aleatoria y el único aspecto que condicionó la definición de fechas para todos los muestreos fue la capacidad del laboratorio. Cuando sucedió esta situación el laboratorio se encargó de almacenar las muestras a menos 4 grados centígrados.

En las parcelas de escorrentía se tomarán muestras del efluente, desde el mes de inicio de lluvias y tres veces más consecutivas, por mes. Se construyeron seis parcelas de escorrentía por sistema de producción y se tomó muestras para laboratorio sólo de tres. Esto debido a que daños por ganado y/o obstrucciones impedían que en algunas parcelas se recolectaba agua pudiendo dificultar la evaluación.

Los sustratos de siembra y las aguas de lavado, se muestrearon en cuatro ocasiones, una vez por mes.

### **3.2.4 Toma de la muestra.**

Para organofosforados, organoclorados, piretroides, ditiocarbamatos y carbamatos, se recogió la muestra sin enjuague previo de la botella y se preservan con diclorometano. Estas botellas no se llenaron completamente.

Para determinar ditiocarbamatos no se utilizó diclorometano, como preservante. Se realizan tres enjuagues previos, con la muestra en los recipientes.

Todas la botellas se almacenaron en hieleras y se transportan al laboratorio con hielo y en todos los muestreos se entregaron el mismo día antes de las 12 medio día.

### **3.2.5 Los recipientes de muestreo.**

En el caso de análisis de organoclorados, organofosforados y carbamatos se utilizó botella de vidrio ámbar, con sello de teflón. Para el análisis de ditiocarbamatos se utilizó botella plástica oscura, con sello de teflón.

### **3.2.6 El tamaño de la muestra.**

El tamaño de la muestra fue de un litro y otro adicional para el análisis de ditiocarbamatos. En el caso de las muestras de escorrentía recolectadas durante una semana, previo a la toma de la muestra se procedió a homogenizar el volumen total colectado, mediante agitación. La capacidad de recipiente de almacenamiento fue de 5 galones, siempre se contó con suficiente cantidad de agua para la toma de la muestra. Cada vez que se muestreaba una parcela de escorrentía se procedía a eliminar toda el agua colectada y se volvían a colocar los colectores 8 días antes del siguiente muestreo.

### **3.2.7 Manipulación de los recipientes y muestras.**

Las botellas de muestreo se limpiaron y esterilizaron en el laboratorio. El mismo laboratorio se encargó de colocar la cantidad de preservante adecuado en las botellas, de acuerdo al tipo de análisis requerido. Las botellas fueron transportadas en hieleras, con refrigerante. El muestreo se iniciaba cerca de las 6 a.m. para poder entregar las muestras antes del medio día.

### **3.2.8 Preparación del equipo de muestreo.**

Todas las botellas a utilizar en el muestreo se enjuagaron con acetona y se dejaron en detergente libre de fosfatos por 24 horas. Al día siguiente, se removió el detergente, se enjuagaron con agua destilada (y desionizada) y con acetona, Se colocaron en un horno a 150°C por 3 horas (con excepción de las botellas plásticas). Pasadas las tres horas, se dejaron enfriar evitando que se contaminaran y se taparon.

Ningún material de muestreo se limpió en el campo, siempre se contó con botellas adicionales. Se utilizaron guantes estériles para la toma y manipulación (almacenamiento y transporte) de la muestra.

## **3.3 Análisis de las muestras.**

El análisis de los residuos en las muestras se realizó mediante la metodología establecida por FAO, en el Laboratorio de Residuos de Plaguicidas (LABRES) del Ministerio de Agricultura y Ganadería y en el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ciencias Ambientales de la Universidad de Costa Rica

**Cuadro 1. Resumen de los procedimientos de laboratorio por grupos de pesticidas de los dos laboratorios utilizados y límites de cuantificación.**

<b>Grupo de Pesticida</b>	<b>Procedimiento de determinación</b>	<b>Límite de cuantificación microgramos/ml</b>
Organofosforados	Cromatografía de gases y detector FPD	0,3
Organoclorados y Piretroides	Cromatografía de gases y detector ECD	1,3
Carbamatos	Cromatografía líquida de alta resolución, con derivación post columna y detector de fluorescencia	0,3
Ditiocarbamatos	Curva de patrones de CS <sub>2</sub> Espectrofotometro UV-VIS	0,4

En el anexo 1 se presentan un ejemplar de informe o reporte de los análisis realizados a las muestras, en donde se consigna el laboratorio que realizó el análisis, los plaguicidas analizados y los resultados obtenidos en dichos análisis. En el caso del laboratorio del CICA-UCR además se realiza reporte de los límites de cuantificación y los límites de detección para cada plaguicida.

### **3.4 Plaguicidas a monitorear.**

Para la definición de los plaguicidas a monitorear se realizaron entrevistas en fincas de los sistemas a monitorear, con el objetivo de establecer los problemas fitosanitarios asociados con la producción para la época de verano e invierno, los productos utilizados en el control y su frecuencia de aplicación. Además se tomó de base el monitoreo de plaguicidas realizado por el Servicio Fitosanitario del Estado, en el mismo sitio entre mayo del 2001 y abril del 2002, para seleccionar los productos a monitorear.

### **3.5 Diseño experimental.**

Par el primer experimento (residuos en fuentes de agua) se utilizó un Diseño Irrestricto al Azar. El arreglo de sería de parcelas divididas en el tiempo, debido a que no se puede contar con repeticiones de subcuencas, pues es imposible conseguir subcuencas iguales par realizar repeticiones. La parcela grande correspondería a la cuenca y la parcela pequeña corresponde a la distancia

El modelo matemático que describe el diseño es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + e_{K(i)} + D_j + e_{(K)ij} + (DC)_{ij} + e_{K(ji)}$$

En donde

. i = subcuena  $e_{(K)ij}$  = error en la medición de la distancia

. k = tiempo

. j = distancia.

En un primer caso se estaría evaluando el error del factor distancia dado de que esta va a ser fija para todas las subcuenas, por ende no será aleatorizada y se evaluará el error de la distancia. En caso de que se considere que el error no aleatorizado de la medición de la distancia es no significativo el modelo se simplificará de la siguiente manera:

$$Y_{ijk} = \mu_i + C_i + e_{K(i)} + D_j + (DC)_{ij} + e_{K(ji)}$$

Con los demás sustratos (agua de escorrentía, sustrato de siembra y agua de lavado) se pretendía utilizar también un Diseño Irrestricto al azar, dispuesto en un arreglo de parcelas divididas, que corresponde al tiempo como parcela grande y a la submuestra como parcela pequeña, producto de la repeticiones.

El modelo matemático que describe el diseño es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu_i + C_i + e_K + T_j + (CT)_{ij} + b(X_i - X) + e_{(K)ij}$$

En donde:

. i = subcuena  $b(X_i - X)$  = covariable

. T = tiempo

. K = repetición.

.  $X_i$  = volumen total de escorrentía, sustrato de siembra y agua de lavado.

### 3.6 Análisis estadístico.

La primera hipótesis planteada en esta investigación era si existía o no contaminación por plaguicidas, en los diferentes sustratos analizados. La cantidad de residuos encontrados así como la frecuencia de aparición de los mismos demuestra que no existe un proceso de contaminación significativo en los sustratos analizados.

Debido a estos resultados no se pudo realizar el análisis estadístico propuesto en el anteproyecto, sin embargo se deja planteado el diseño experimental, que describe la forma en la cual se dispusieron los sitios de muestreo y la calendarización de la toma de muestras, frecuencia y cantidad.

Adicionalmente se realizó una evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea, mediante la metodología DRASTIC, tanto para contaminantes pesticidas, como para no pesticidas.

#### IV. Resultados y Discusión.

##### 4.1 Características generales de las fincas productoras de helechos.

Para determinar el tipo y la frecuencia de los pesticidas utilizados en la producción de helechos se realizó una encuesta en fincas productoras de helechos (ver anexo 2). Las fincas encuestadas se encuentran dentro del área de estudio y en pocos casos cerca del límite político definido para este estudio, pero fueron consideradas para un posterior análisis (espacial) de su información.

Se entrevistó a los administradores y encargados de las fincas de helechos. Se procedió a ubicar con ayuda de un G.P.S. (Global Position System), las coordenadas de la empacadora o de la entrada principal de la finca. Esta información se utilizó para seleccionar los pesticidas a monitorear y el tipo de análisis químico que se realizó.

Se realizó la encuesta en 54 fincas, el área total de las fincas según lo indicado es de 1037,5 hectáreas, en las cuales se dedican 713,4 hectáreas a la producción de helechos. Debido a que en la zona se manifiesta una época seca marcada, se indagó sobre la fuente de agua utilizada para la producción, considerando el agua de riego de las plantaciones y el agua de lavado para acondicionamiento de los helechos. Los resultados se muestran en el cuadro 2, las diferencias con el total de fincas fue porque algunos entrevistados no indicaron la fuente.

**Cuadro 2. Fuente de agua utilizada en las fincas de helechos de la Zona Norte de Alajuela y Heredia, para la producción de helecho (*Rumora adiantiformis*).**

Fuente de agua	Número de fincas
Pozo dentro de la finca	9
Río	17
Cañería, acueducto	2
Naciente propia	3
Reservorio	1

Sólo en 36 de las 54 fincas se indicó que utilizan riego por aspersión, sin embargo se comprobó que poseen sistemas móviles de riego que se trasladan de acuerdo a la necesidad.

La fuente de agua más utilizada en las fincas de helechos son los ríos, los cuales son abundantes en la zona. Sin embargo esto se constituye en un factor de riesgo a la contaminación, pues también pueden ser utilizados en el llenado de equipo de aplicación y el lavado de los mismos, propiciando que productos químicos en concentraciones altas entren en contacto con el agua.

La segunda fuente utilizada son los pozos dentro de las fincas, los cuales son vías directas de acceso al acuífero. Por lo tanto deben de contar con la adecuada protección, normas de manejo y construcción que impidan que disminuyan el riesgo a contaminar el acuífero. Perforados para acceder directamente al acuífero, también pueden ser una vía fácil y directa de llegada de pesticidas al manto acuífero si realizan derrames o lavados de equipos cerca de ellos.

#### **4.2 Tipo de pesticidas y frecuencia de aplicación.**

Se seleccionaron aquellos productos pesticidas que más de 70% de los encuestados dijeron utilizar. Existe poca variabilidad de los ingredientes activos de los pesticidas. Sin embargo la gama de productos comerciales utilizados fue amplia. Además se indagó sobre los problemas fitosanitarios, la época de aparición, el producto utilizado y su frecuencia de uso.

En el cuadro 3 se resumen los principales problemas de enfermedades relacionados con la producción de helechos en la zona y de los agroquímicos más utilizados en su control.

Los productos fungicidas más utilizados en el área del proyecto fueron el Carbendazin y el Benomil, ambos utilizados para el control de la Antracnosis y *Cylindrocladium*. Estos problemas se manifiestan tanto en verano como en invierno.

El Mancozeb, el Metil-tiofanato y el Clorotalonil son productos más específicos para el control de la Antracnosis, que se ubican en segundo lugar de uso. Con una frecuencia media de uso se ubican el Propineb, Captán (tóxico para el helecho), Carbendazol, Triforine, y el Procloraz, este último producto indicaron los entrevistados que lo utilizan sólo para hacer aplicaciones muy focales o localizadas.

El mayor problema de enfermedades en helecho para esta zona es la Antracnosis. Con menor frecuencia se mencionan las enfermedades de raíz, provocadas por *Phytium* y *Phytophthora*, las cuales se comportan más localizadas en ciertas áreas de producción, mientras que la antracnosis tiene una distribución más generalizada.

**Cuadro 3. Principales problemas sanitarios y productos funguicidas utilizados en la producción de helecho (*Rumora adiantiformis*) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.**

Época	Enfermedad	Producto, nombre comercial	Producto nombre, genérico	Frecuencia
Verano-invierno	Antracnosis y <i>Cylindrocladium</i>	Carbendacina	Carbendazim	5
Verano-invierno	Antracnosis y <i>Cylindrocladium</i>	Benlate	Benomyl	5
Verano-invierno	Antracnosis	Manzate	Mancoseb	4
Invierno	Antracnosis	Cycosin	Metil-tiofanato	4
Verano-invierno	Antracnosis	Cobrethane	Óxido de cobre	2
Verano-invierno	Antracnosis	Antracol	Propineb	3
Verano	Antracnosis	Polyram-combi	Metiram	2
Verano-invierno	Antracnosis	Daconil	Clorotabnil	4
Verano	Antracnosis	Orthocide	Captán	3
Invierno	Antracnosis y <i>Cylindrocladium</i>	Derosal	Carbendazol	3
Verano-invierno	Phytium- Phythophtora	Cloroneb	Cloroneb	1
Verano-invierno	Phytium- Phythophtora	Banrot	Mezcla de Metiltiofanato y carboxin	1
Verano	Phytium- Phythophtora	Vitavax	Carboxin	1
Invierno	Antracnosis	Saprol	Triforine	3
Verano	Antracnosis	Fore	Captán-Mancoseb	2
Verano	Antracnosis	Folpan	Folpet	1
Invierno	Antracnosis	Octave	Procloraz	3

Frecuencia:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Muy poco ? menos de una vez por mes (bimensual, trimestral, semestral, anual). | 3. Medio ? dos veces al mes.               |
| 2. Poco ? una vez al mes  | 5. Muy alto ? más de cuatro veces por mes. |
| 4.. Alto ? tres o cuatro veces por mes.   |  |

Todos los productos funguicidas utilizados en la producción de helecho hoja de cuero, son clasificados de acuerdo a su toxicidad como productos de banda verde, de acuerdo a la clasificación de FAO, para plaguicidas. En esta categoría se ubican los productos menos peligrosos, en el centro de su etiqueta solamente se les realiza solo una anotación de precaución.

De la lista de funguicidas utilizados solamente el Folpet y el Cloroneb están registrados para helecho hoja de cuero (en forma exclusiva), sin embargo el resto de los funguicidas están registrados en una categoría más general que corresponde a ornamentales. Todos los productos funguicidas que dijeron los productores utilizar han sido registrados y por tanto su uso está autorizado.

Las principales plagas denunciadas fueron: el picudo, los ácaros y la cochinilla gigante, ver cuadro 4. Los principales problemas de plagas en helechos se dan durante el verano, de forma tal que se realizan aplicaciones de control y prevención durante los meses de verano. En la época de invierno aparecen las mismas plagas aunque con menores grados de daño, por lo que su control es menos intenso.

**Cuadro 4. Principales problemas plagas y productos insecticidas utilizados en la producción de helecho (*Rumora adiantiformis*) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.**

Época	Plagas	Producto Nombre comercial	Producto Nombre genérico	Frecuencia
Verano	Picudo, ácaro	Thiodán	Endosulfán	2-3
Verano	Cochinilla gigante	Vapan	Metam-sodio	2-3
Verano-invierno	Picudo, abejoncillo negro	Sunfire	Clorfenapir	2-3
Verano-invierno	Picudo, abejoncillo negro	Regent	Fipronil	2-3
Verano	Nematodos, abejoncillo	Vydate	Oxamil	1
Verano	Nematodos, abejoncillo	Furadan	Carbofuran	1

Dentro de los productos utilizados en el control de insectos, destaca el Endosulfán, el Metam-sodio y el Clorfenapir, como los productos de mayor frecuencia de uso. Los demás productos insecticidas indicaron utilizarlos menos, por el comportamiento mismo de las plagas, es decir más focales en el tiempo y el espacio. Por ejemplo para combate de ácaros se usa una mezcla de Thiodán más sales potásicas más un reductor de tensión superficial y se aplica en el término de 6 semanas 3 veces consecutivas cuando el brote es fuerte y en forma localizada, como regla general en la mayoría de las fincas.

En la categoría de insecticidas y nematocidas se ubican los productos utilizados con mayores toxicidades. Destaca el Furadán clasificado como extremadamente tóxico (banda roja) y autorizado para café, arroz, banano y caña de azúcar. Luego sigue el Vydate clasificado como Ib (banda roja), altamente tóxico (banda roja), producto autorizado para ornamentales.

El Endosulfán y el Fipronil son clasificados como categoría III, producto moderadamente peligroso (banda amarilla), el uso de estos dos productos están autorizados para ornamentales. El Clorfenapir se ubica en la misma banda de toxicidad que los dos anteriores (banda amarilla), moderadamente peligroso, sin embargo es un producto autorizado para repollo y no para ornamentales.

El Metan sodio se clasifica como un fumigante, sin embargo se ubicó por su uso en el control de cochinilla gigante como insecticida. Este producto es el menos peligroso, se ubica en banda verde, toxicidad grado IV,

En el caso de los nematocidas en la mayoría de los casos se reportó una frecuencia de aplicación de una vez por año. Pocos reportaron utilizarlos dos veces por año, indicaron que esto dependía de los conteos de población que se tengan.

Los principales problemas de malezas están relacionados con plantas de hoja ancha tales como Oxalis e Hidrocotile, sin embargo en áreas de borde y caminos de acceso las gramíneas son muy importantes. En general los problemas de malezas son manejables y poco importantes, prácticamente se trata de un mantenimiento de áreas. Ver cuadro 5.

Los herbicidas Scepter (Imazaquin) y Bladex (Cianazina) indicaron que los utilizan mezclados, de otra forma no funcionan y su frecuencia de uso es de cada 6-8 semanas. El Paraquat y el Glifosato se utilizan en forma más localizada y preferiblemente fuera de las áreas de producción, su frecuencia de uso es de cada 8-12 semanas dependiendo de la época.

**Cuadro 5. Principales problemas malezas y productos herbicidas utilizados en la producción de helecho (*Rumora adiantiformis*) en la Zona Norte de Alajuela y Heredia, durante la época de verano e invierno y su frecuencia de uso.**

Época	Malezas	Producto, nombre comercial	Producto nombre, genérico	Frecuencia
Verano-invierno	Oxalis, Hydrocotile	Scepter	Imazaquin	1
Verano-invierno	Oxalis, Hydrocotile	Bladex	Cianazina	1
Invierno-verano	Malezas en general	Gramoxone	Paraquat	1
Verano-invierno	Malezas gramíneas	Round-up	Glifosato	1

Los productos Imazaquin y Paraquat se clasifican en la banda de toxicidad amarilla, clase II, el Imazaquin se encuentra autorizado para helecho hoja de cuero, mientras que el Paraquat no esta autorizado para este cultivo, sin embargo como se anotó anteriormente su uso principalmente es para el mantenimiento de caminos y áreas fuera de la plantación.

Los otros dos herbicidas, Cianazina y Glifosato son productos de banda verde. Clase IV de toxicidad, sin embargo solo la Cianazina se encuentra autorizada para helecho hoja de cuero.

Los productos Paraquat y Glifosato se encuentran registrados para un promedio de más de 20 cultivos comestibles, algodón y forestales, sin embargo no están registrados para ornamentales y menos para helecho hoja de cuero. En el caso de los funguicidas utilizados solamente el Carboxin (autorizado para arroz y frijol) y el Proclorax (autorizado para arroz, café y mango), se indicó su uso en helecho pero no están autorizados para esta actividad. En el caso de los insecticidas solamente el producto Clorfenapir (autorizado para repollo) no está autorizado para usarse en helechos. De los 27 productos seleccionados en esta investigación solamente 5 no están autorizados para helechos.

#### **4.3 Residuos en fuentes de Agua.**

Las fuentes de agua se muestrearon en los meses de febrero, abril, junio y agosto, con la finalidad de observar diferencias en cuanto a la cantidad y tipo de residuos que pudieran detectarse en las fuentes de agua y de esta manera relacionar los residuos con las actividades agrícolas predominantes en la subcuenca y con las variaciones de manejo que implican el inicio de lluvias sobre las plagas y enfermedades y por ende en el uso de pesticidas.

En este experimento sólo se detectaron residuos en la última fecha de muestreo (agosto), relacionados con la fuente de agua Colara, que se encuentra en la parte más baja de subcuenca donde predominan los helechos.

Los residuos fueron detectados en los puntos de control ubicados arriba de la toma de agua, aproximadamente cuatro meses después de iniciadas las lluvias. El producto encontrado fue Ethoprofos, un nematicida cuyo nombre comercial es MOCAP. En las encuestas realizadas en las fincas de helechos no se mencionó en ninguna el uso de este producto, aunque es un producto autorizado para helechos.

En el punto de muestreo a 100 m. de la fuente se detectó Ethoprofos con una concentración de  $0.000647 \pm 0.000096$ . Además en el punto de muestreo ubicado a 200 m. de la fuente se detectó el mismo producto con una concentración  $0.000126 \pm 0.000043$ . En la fuente propiamente dicha no se encontró evidencia de residuo alguno para esa fecha.

El residuo se detectó en menor concentración a los 200 m. y en mayor concentración a los 100 m. de la fuente de agua en donde no se detectó. Las fuentes de contaminación difusa no muestran una linealidad con respecto a un solo factor sino por el contrario obedecen a una variedad más amplia de factores, en este caso específico, las variables distancia y pendiente no permiten explicar la dinámica de concentración del residuo.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por el Servicio Fitosanitario del Estado, 2003 el cual realizó durante 12 meses un monitoreo de ocho fuentes de agua en la zona. Durante este período informaron que no se detectaron residuos de plaguicidas en la mayoría de las tomas monitoreadas. Solamente se encontró presencia aislada de carboturán (por debajo del límite de tolerancia 5 $\mu$ g/L), diclorfluanid y endosulfán (los dos últimos sin tolerancias permitidas indicadas por OMS).

#### **4.4 Residuos en aguas de escorrentía.**

El primer muestreo del agua de escorrentía se realizó el 20 de mayo una vez que iniciaron las lluvias en la zona de estudio. En esa primera fecha se detectaron residuos en todas las parcelas de escorrentía ubicadas en las fincas dedicadas a la producción de café. Los residuos detectados fueron Endosulfán- $\beta$  y Endosulfán sulfato, ambos organoclorados.

El mismo tipo de residuo fue detectado el siguiente mes (3 de junio) en las parcelas de escorrentía ubicadas en las fincas de helechos. Con excepción de una parcela (N<sup>o</sup>2), en donde para esa fecha

sólo se detectaron residuos de Endosulfán Sulfato. En el cuadro 6 se presentan los resultados de ambos muestreos.

Se realizaron dos muestreos más, durante los meses de julio y agosto. En estas dos ocasiones no se detectó la presencia de residuo alguno.

El sistema de cultivo de café se realiza en hileras y se mantiene mediante ciclos de poda que fluctúan de cinco y tres años, lo cual favorece que existan porciones importantes de la plantación en donde la cobertura del suelo no es total. Esta condición de suelo desnudo o poco protegido, podría justificar que con las primeras lluvias se movilizaran con mayor rapidez los residuos de plaguicidas, que se encontraban asociados en este cultivo.

El helecho hoja de cuero se siembra en camas, con densidades de siembra 50 y 63 mil plantas por hectárea ( $6-9/m^2$ ), además con la finalidad de favorecer su crecimiento se coloca una cubierta de polietileno, que regula los niveles de sombra y que intercepta la lluvia, modificando la capacidad erosiva de los eventos de precipitación. Es probable que estos aspectos hayan sido determinantes en el hecho de que los residuos de plaguicidas en estas parcelas aparecieran hasta el segundo mes de iniciadas las lluvias.

En el caso del Endosulfán se reporta que su degradabilidad es mayor de 120 días, tienen una Toxicidad en Peces (96horas) de 0.002 mg/l, el coeficiente de partición octanol-agua  $K_{ow}$  es de 4.74 Log P y su solubilidad en agua es de 0.33 mg/l. Estas características demuestran su largo período de persistencia en el campo y su alta toxicidad.

El Proyecto Agua Viva, 2003 evaluó el agua de escorrentía de una finca productora de helechos en la zona de Cartago (Finca FARNAN). Durante los todos los doce meses del estudio logró detectar residuos de endosulfan y solo el primer mes determinaron diazinon. Es importante anotar que dicha finca se encuentra en condiciones climatológicas muy dsímiles a la del área de estudio, aunque demuestran el uso del endosulfán en toda la actividad de producción de helechos del país.

**Cuadro 6. Tipo y concentración de residuos de plaguicidas encontrados en los muestreos de aguas de escorrentía durante los meses de mayo y junio 2003.**

Muestreo 20 de mayo 2002			Muestreo 3 de junio 2002		
Identificación de la parcela	Residuo detectado	Concentración ppm.	Identificación de la parcela	Residuo detectado	Concentración ppm.
Café 1	Endosulfán -β	< 2,0	Helechos 1	Endosulfán -β	< 2,0
	Endosulfán Sulfato	5,4		Endosulfán Sulfato	6,0
Café 2	Endosulfán -β	< 2,0	Helechos 2	Endosulfán -β	< 2,0
	Endosulfán Sulfato	4,5			
Café 4	Endosulfán -β	< 2,0	Helechos 4	Endosulfán -β	< 2,0
	Endosulfán Sulfato	8,3		Endosulfán Sulfato	4,0

#### 4.5 Residuos en aguas de lavado.

La evaluación de aguas de lavado se realizó durante tres meses seguidos, una vez al mes. En la primera evaluación del mes de julio no se encontraron residuos.

En la segunda evaluación se detectaron residuos de dos plaguicidas en una muestra tomada en una pila de lavado. Los productos encontrados fueron: un insecticida-nematicida el 3Hidroxicarbofuram ( $90,9 \pm 9,9$ ) y un insecticida el Mithiocarb ( $929 \pm 130$ ). El primer residuo está asociado con la degradación del Carbofurán, producto que en las encuestas fue indicado su uso y que se utiliza principalmente por su acción nematicida. El segundo el Mithiocarb tiene una acción bastante específica sobre caracoles y lepidópteros, plagas muy esporádicas en la zona, pero que si han existido en los helechos.

En el mes de septiembre se encontraron residuos en dos muestras de las pilas de lavado, de las tres recolectadas de las empacadoras de helechos. Nuevamente se detectó el Methiocarb en ambas parcelas: Helecho 1, ( $0.737 \pm 0.017$ ) y Helecho 2, ( $0.781 \pm 0.017$ ). Adicionalmente en la parcela Helecho 2 también se encontró Oxamil ( $3.44 \pm 0.30$ ), que es un nematicida, cuyo nombre comercial es Vydate y su uso fue indicado en las encuestas realizadas.

En las aguas de lavado fue donde más tipos de residuos pesticidas fueron diagnosticados. Se encontró un insecticida Methiocarb, un insecticida nematicida Carbofurán y un nematicida el Oxamil.

#### **4.6 Residuos en sustratos de siembra.**

La evaluación de residuos de pesticidas en el sustrato se realizó en la época lluviosa, durante tres meses consecutivos, una vez al mes. En ninguno de los muestreos se encontraron residuos.

Las plantas de helecho produce una gran cantidad de hojas y la disposición de las mismas genera una buena cobertura del suelo. Debido al uso reiterado de pesticidas y a sus características de solubilidad y persistencia, se consideró que podrían monitorear los residuos mediante un lavado del sustrato. Sin embargo la técnica empleada no logró movilizar los residuos ubicados en el sustrato. Aunque no se debe descartar, que efectivamente las concentraciones de los mismos se mantienen por debajo de los límites de detección de los laboratorios utilizados.

Debido a la poca cantidad de residuos detectados en todos los sustratos analizados en esta investigación, se decidió realizar un análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, en la zona del proyecto. Con este nuevo objetivo se decidió implementar este análisis mediante la metodología DRASTIC. Según Fallas, s.f. es una metodología de las más utilizadas debido a su flexibilidad, sustento técnico y facilidad de implementarla utilizando un SIG.

#### **4.7 Metodología DRASTIC.**

##### **4.7.1 Características generales del área de estudio.**

Se determinó el comportamiento de las variables biofísicas consideradas en la metodología DRASTIC. La escala de valoración esta definida por enteros de 1 a 10, en donde 1 significa un riesgo de contaminación mínimo y 10 un riesgo extremadamente alto.

Los valores de ponderación utilizados así como la escala de valoración son los mismos propuestos por Aller *et al* en 1987, citados por Agüero aparecen en el Anexo 3. Estos factores de ponderación varían cuando se trata de agentes contaminantes pesticidas y no pesticidas. Dentro de ellos los más importantes son la profundidad del agua en el suelo, el tipo de suelo y el impacto en la zona no saturada.

En la figura 2 se muestra en forma gráfica la aplicación de la metodología. A partir de mapas topográficos, mapas de suelos, mapas geológicos y archivos de información de pozos y estaciones meteorológicas se generan capas de información en formato grid.

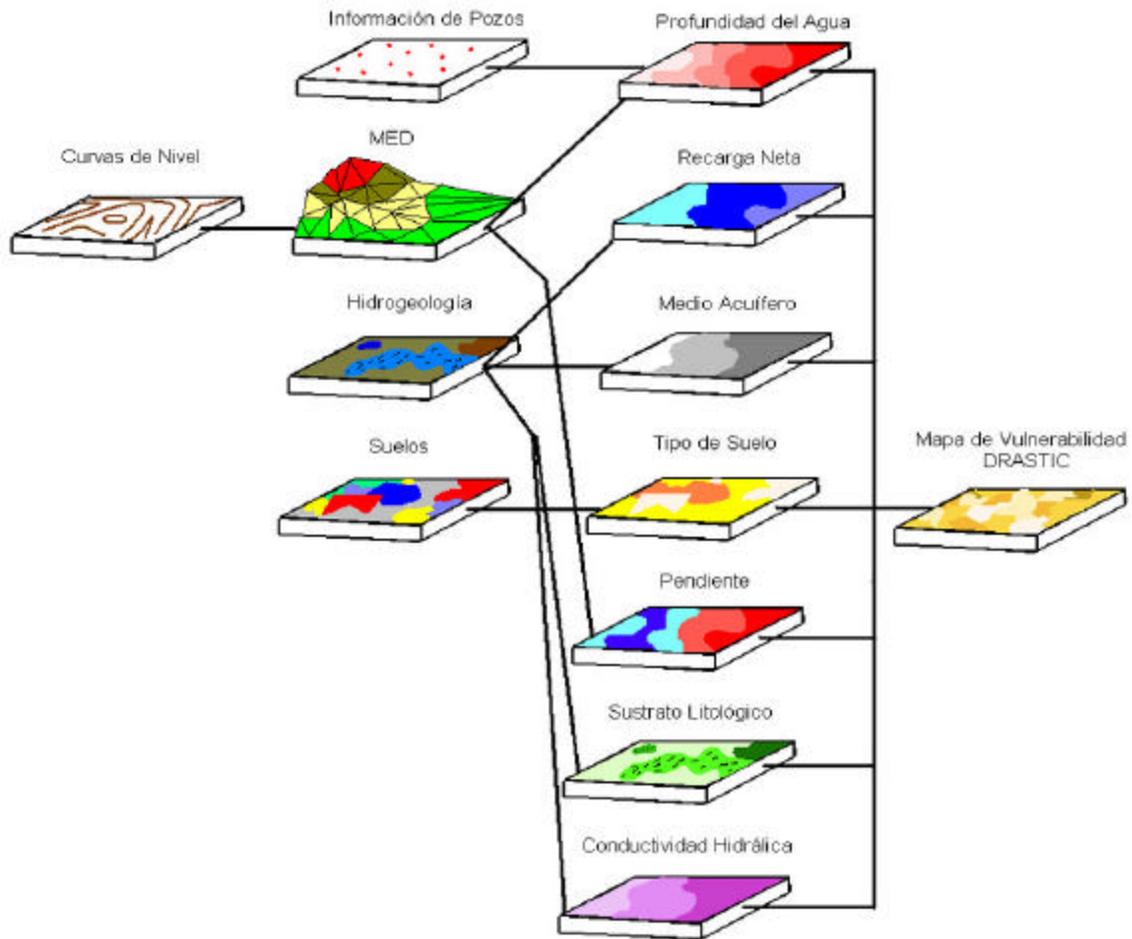


Figura 2. Representación gráfica de la aplicación de la metodología DRASTIC para la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico a la contaminación por plaguicidas, tomado de Agüero, 2000.

Cada una de estas variables son reclasificadas de acuerdo a su índice DRASTIC y multiplicadas por un factor DRASTIC de ponderación (Anexo 2). La distribución espacial de la variable es representada en formato grid o cuadrícula de forma tal que se realizaron múltiples funciones del álgebra de mapas, tales como: reclasificar, sumar, multiplicar. El método propone que la vulnerabilidad es función de la suma de los factores debidamente ponderados.

$$\text{Vulnerabilidad} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

En donde r es el índice y w es el factor de ponderación.

Una vez depuradas, reclasificadas y ponderadas las capas de información se procede a sumarlas, mediante el Map calculator y la salida es reclasificada en rangos de vulnerabilidad.

#### **4.7.1.1 D Profundidad del agua (Depth).**

Para determinar la profundidad del agua se utilizaron los archivos de ubicación de pozos del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento. Se utilizó el nivel estático de dichos pozos, con la finalidad de realizar una interpolación utilizando el Método Kriging, mediante ArcView 3.2<sup>a</sup>. Los porcentajes de pendiente fueron reclasificados de acuerdo a los valores indicados en el anexo 3. Además estos valores fueron multiplicados por cinco como valor de ponderación, para contaminantes pesticidas y no pesticidas. Los resultados de este procedimiento se muestran en forma gráfica en el anexo 4.

Se utilizaron un total de 463 pozos del registro del SENARA. El promedio de profundidad fue 30-72 metros, con valores mínimos de 0.5 metros y valores máximos de 190 metros. En el caso de los pozos más superficiales se trata de pozos colgados favorecidos por la presencia de una capa arcillosa bastante impermeable, lo cual fue descrito por Sáenz, 2003 comunicación personal en la descripción litológica del perfil. La desviación estándar fue sólo de 27.79, lo cual se relaciona con la dinámica de pendientes de la zona y por las diferencias en la profundidad de los perfiles.

Esteller et al, 2002 evaluando métodos de interpolación con sistemas de información geográfica para cartografía de la profundidad del nivel piezométrico, concluyeron que el método de Kriging genera mejores resultados, es decir los más próximos a las observaciones reales, RMS de 13.45, al comparar el valor interpolado con el observado.

En la figura 3 se muestra el detalle de la ubicación de los pozos utilizados para la interpolación realizada para calcular la profundidad del agua y el resultado obtenido. A partir de este mapa se procedió a seleccionar el área de interés y los valores de profundidad fueron reclasificados de acuerdo a los índices DRASTIC para esta variable. En cuadro 7 se muestra el detalle de profundidades para la zona de estudio.

En el 54.36% del área del proyecto el agua se encuentra a una profundidad mayor a los 32 metros, en el resto del área el agua se encuentra entre los 13 y 32 metros. Estos valores como se indicó con anterioridad están influenciados por la presencia de pozos colgados que se forman por la presencia de capas impermeables, que impiden que el agua profundice, sin embargo es una condición real, que se estimó que se debía de incluir, pues estos pozos son utilizados en múltiples actividades tanto agrícolas como se uso doméstico.

**Cuadro 7. Rango de profundidad del agua en el suelo, área y porcentaje total, para la zona de estudio.**

<b>Rango de profundidad metros</b>	<b>Área</b>	<b>% área</b>
13.01 – 19.45	1324.37	6.60
19.45 - 25.89	3380.58	16.86
25.89 – 32.33	4447.72	22.18
32.33 – 38.77	2258.54	11.26
38.77 – 45.21	2353.33	11.73
45.21 – 51.65	2058.89	10.27
51.65 – 58.09	1203.1	6.00
58.09 – 64.53	2292.25	11.43
64.53 – 70.97	736.87	3.67

En el resultado de la interpolación se puede observar la distribución espacial de los pozos, la cual no fue tan homogénea como se hubiera deseado. Sin embargo los rangos de distribución concuerdan adecuadamente con lo expresado por Sáenz 1993.

#### **4.7.1.2. R Recarga (Recharge).**

Debido a la poca disponibilidad de datos sobre esta variable, se procedió a estimarla mediante un procedimiento alternativo. Se utilizó el modelo para determinar la infiltración potencial, propuesto por Losilla & Schodinsky, 2000, que indica que la infiltración potencial está dada por:

$$I = 0.88 * C * P$$

Donde

I = infiltración potencial

C= coeficiente de infiltración dado =  $K_p + K_v + K_{fc}$

$K_p$  = efecto de la pendiente

$K_v$  = efecto de la vegetación

$K_{fc}$  = efecto por textura del suelo.

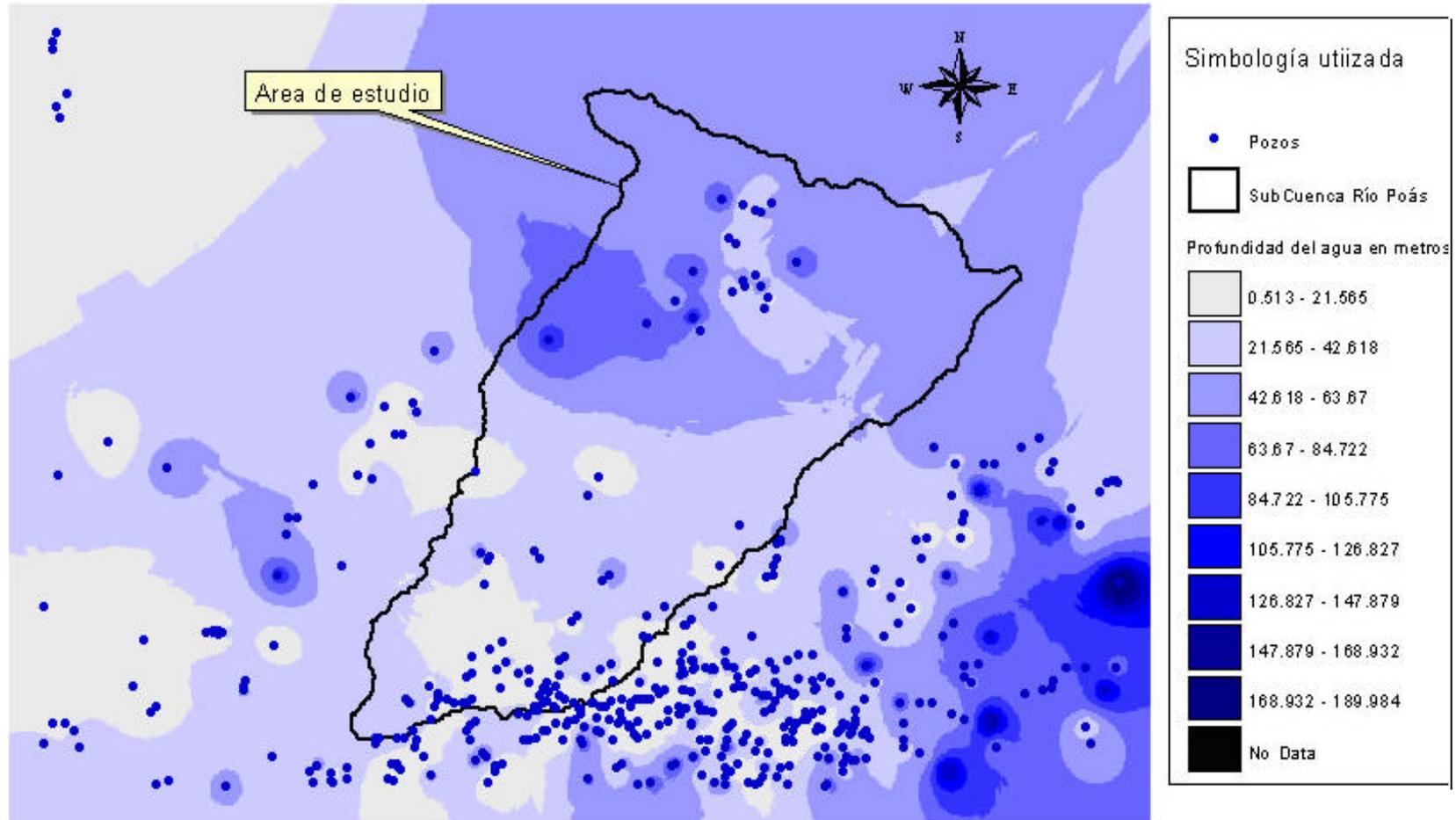


Figura 3: Detalle de la interpolación de la profundidad del agua subterránea, a partir de la información de pozos del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento, 2003.

#### 4.7.1.2.1. Factor Kp.

Para obtener este factor se utilizaron las curvas de nivel 1:25.000 de la cartografía generada por el Proyecto Terra, 1998. Se transformaron las curvas de nivel de líneas a puntos y se procedió a estimar el modelo de elevación digital, mediante interpolación, también con Kriging.

En el anexo 5 se muestra un detalle del modelo de elevación digital realizado. Se incluye en una delimitación del área de estudio y de las subcuencas seleccionadas por el uso, además se muestran los principales ríos y se indica la posición de los Volcanes Poás y Barva como un detalle de ubicación para el lector.

A partir del modelo de elevación digital se estimó la pendiente en porcentaje y luego esta fue reclasificada de acuerdo a los valores que componen el coeficiente de infiltración sugeridos en el Manual de Estudios Hidrológicos (ONU, 1972, citado por Losilla & Schodinsky, 2000, ver cuadro 9.

#### 4.7.1.2.2. Factor Kv

Para determinar la cobertura vegetal se utilizó una imagen Landsat 2002 previamente reclasificada, en el laboratorio de SIG del CATIE. Se realizó un proceso de comprobación en campo sólo en el área de estudio, el cual demostró una excelente concordancia con la clasificación de la imagen. En el anexo 6 se muestra un detalle de la reclasificación realizada para el área de estudio.

**Cuadro 8. Clasificación de actividades de uso del suelo en la zona del proyecto, área y porcentaje de área**

Actividad de uso	Área	% de área
Bosque	4788.38	23.05
Potrero	3919.35	18.86
Cultivos permanentes	11305.14	54.41
Cultivos anuales	207.37	1
Suelo desnudo	85.85	0.41
Urbano	279.01	1.34
Agua	14.05	0.07
Otros	178.61	0.86

La actividad de uso más importante en la zona del proyecto es la producción de café, para lo cual la zona reúne excelentes condiciones de altura, suelo e influencia climatológica de la Vertiente Pacífica. Estos factores le permiten ser una zona de producción de los cotizados cafés de calidad. La producción se concentra en la parte media de la cuenca, dejando relegadas las áreas más altas de la cuenca para los pastos utilizados en lecherías altamente especializadas y las zonas de protección y Parques Nacionales: Volcán Poás, Cordillera Volcánica Central, Area de Protección de Grecia y una pequeña parte del Parque Braulio Carrillo.

Las áreas dedicadas a la producción de cultivos anuales corresponden la mayoría de los casos a terrenos donde realizan podas totales de cafetales lo cual les permite utilizarlos por 1 o 2 años, con cultivos anuales. La mayoría son arriendos dedicados a la producción de chile dulce y tomate, que dependen mucho de aspectos de mercado (precios). Otras áreas de similar uso, son las que se dedican a la producción de papa y crucíferas, las cuales generalmente son áreas de potrero, que el ganadero se interesa en renovar y que arrienda por períodos cortos de tiempo. En esta zona la producción de cultivos anuales es bastante móvil, por el sistema de arriendos, lo cual dificulta mucho su monitoreo con imágenes de satélite.

El 23.05% del área de la cuenca tiene cobertura forestal y en las áreas más altas es donde predomina este tipo de uso. En la zona media y baja los reductos de bosque son tan pequeños que no se logran diferenciar con este tipo de sensor.

#### **4.7.1.2.3. Factor K<sub>fc</sub>**

Para la estimación del coeficiente de infiltración se utilizó el mapa de suelos del Centro Científico Tropical (CCT), realizado por el Ing. Alexis Vásquez, en escala 1:200.000. Utilizando la información de texturas, se reclasificaron de acuerdo a los coeficientes de infiltración sugeridos en el Manual de Estudios Hidrológicos (ONU, 1972) citado por Losilla & Schodinsky, 2000, ver cuadro 9.

Los mapas de cada uno de los factores se transformaron a formato grid y con ayuda del Map Calculator de ArcView se procedió a sumarlos, para obtener el valor del coeficiente de infiltración. Una vez realizada esta suma mediante el álgebra de mapas (Map calculator, ArcView) se multiplicó por 0.88, para obtener el valor de la infiltración potencial. Finalmente el valor de la infiltración se multiplicó por 0.33, para obtener la recarga neta. Los valores estimados de recarga neta de acuerdo al área se muestran en el cuadro 10.

**Cuadro 9. Componentes del coeficiente de infiltración y factores de ponderación.**

<b>Por Textura del suelo</b>		<b>K<sub>fc</sub></b>
	Arcilla compacta impermeable	0.10
	Combinación de limo y arcilla	0.20
	Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40
<b>Por pendiente</b>		<b>K<sub>p</sub></b>
	Plana 0.02% - 0.06%	0.30
	Moderada 0.3% - 0.4%	0.20
	Colinas 3% - 4 %	0.10
<b>Por cobertura vegetal</b>		<b>K<sub>v</sub></b>
	Terrenos cultivados	0.10
	Bosques	0.20

*Fuente ONU, 1974 (citado por Losilla & Schodinsky, 2000)*

**Cuadro 10. Volúmenes de recarga neta estimados, factor de clasificación y área de recarga.**

<b>Recarga Neta</b>	<b>Indice Drastic</b>	<b>Área</b>	<b>% área</b>
< 200	1	910.53	4.55
200 a 400	3	6067.75	30.29
400 a 600	5	9082.99	45.34
600 a 800	6	3797.59	18.96
800 a 1000	7	159.04	0.79
1000 a 1500	8	14.38	0.07

En la zona de estudio la mayor cantidad de área tiene recargas estimadas entre los 200 y los 800 mm, siendo la más importante en cobertura la recarga de 400 a 600 mm, los demás niveles de recarga son poco significativos en términos de cobertura.

Para utilizar este valor calculado de recarga neta (que corresponde a milímetros de agua), se procedió a reclasificar estos valores de acuerdo a los valores indicados en el anexo 3 y multiplicarlos por el valor de ponderación  $R_w=4$ , para pesticida y no pesticida simultáneamente.

#### **4.7.1.3. A Tipo de acuífero (Aquifer).**

Para definir el tipo de acuífero se contó con la información de litología del mapa geológico de la Dirección General de Geología y Minas, 1978, el cual fue realizado en escala 1:700.000, que luego fue proyectado a escala 1:50.000 y por último se cuenta con una escala 1:25.000 implementada por el Proyecto Terra 1998.

Mediante comunicación personal, el geólogo Ing. Luis Sáenz del ICE, indica que los suelos del área de estudio tienen un desarrollo entre los 4 a 5 metros, y se formaron a partir de deposiciones de cenizas y materiales orgánicos. Estos horizontes se encuentran seguidos en algunas ocasiones por una delgada capa de arcillas rojas ubicadas entre los 4 y 15 metros de profundidad. La siguiente capa son ignimbritas, producto de coladas de lava del Volcán Barva, muy vesiculares y porosas, que favorecen niveles freáticos profundos (30-90 metros). De acuerdo a este perfil y a la clasificación del mapa geológico toda la cuenca del proyecto se considera como tobas, ignimbritas y lavas.

Agüero 2000, coincide con lo indicado por Sáenz, 2003, e indica que todos los acuíferos del Valle Central se encuentran esencialmente en formaciones de lavas, que van desde lavas brechosas hasta lavas densas y en algunos casos las capas de lavas son atravesadas por estratos de tobas e ignimbritas. Por lo tanto se les asocia un valor de clasificación de 5. Se utiliza el valor más alto del intervalo por la condición de fracturación de las lavas que aumenta la vulnerabilidad. Los valores fueron reclasificados de acuerdo a los parámetros de anexo 3 y se ponderaron multiplicándolos por 3 para contaminante pesticida y no pesticida.

#### **4.7.1.4. S Tipo de Suelo (Soil).**

A partir del mapa de suelos de Acón y Asociados, 1991. y con el detalle de los órdenes de suelos, se obtuvo la clasificación de suelos en la zona de estudio. Es necesario recordar que este mapa no consigna información para las áreas protegidas y que en el área existen los Parques Nacionales Volcán Poás y Volcán Barva, lo cual obligó a utilizar en esas áreas el mapa del Centro Científico Tropical.

Se delimitaron dos tipos de suelos. El primero ubicado en la principalmente en la parte baja, lo describe Agüero 2002 como un suelo con arcillas pegajosas y adhesivas que se agrietan en verano, de color oscuro seco por más de 90 días acumulativos, algunos menos, contenido de arcillas 2:1 y otros con mayor contenido de materia orgánica. Por su buen contenido de arcillas recomienda este autor se le asigne un valor de clasificación DRASTIC de 3.

El otro tipo de suelo encontrado en la zona lo describe Acón 1980, como un suelo oscuro y profundo de buen contenido de materia orgánica y bajo en bases derivado de cenizas volcánicas. Este suelo se asocia con texturas gruesas y baja saturación de bases. Este tipo de suelo Agüero 2002 lo clasificó con un valor DRASTIC de 5.

Esta descripción de suelos fue reclasificada de acuerdo a los parámetros del anexo 2, para el cálculo del factor Sr y luego los valores se ponderaron multiplicándolos por 5 para contaminante pesticida y por 2 para contaminante no pesticida.

#### **4.7.1.5. T Topografía (Topographic).**

Utilizando el mapa de pendiente en porcentaje generado para el cálculo de la recarga neta, únicamente fue necesario reclasificar los porcentajes de pendiente acorde a los valores propuestos en el anexo 3. El factor topografía se ponderó multiplicando por 3 para contaminante pesticida y por 1 para no pesticida.

En el cuadro 10 se presenta un resumen de los resultados de modelación de la pendiente que se realizó. La zona presenta un rango de pendientes bastante suaves, muy atractiva para la producción agropecuaria. Predominan las pendientes muy suaves entre 0 y 18.4%, con un 50.89% del área, seguidas por pendientes moderadas de 18.4 a 36.8%, con un 35.75%. Luego a partir de estas pendientes se presentan suaves transiciones para áreas más quebradas, las cuales están asociadas con cañones de ríos, los cuales son bastante profundos.

**Cuadro 11. Rangos de pendiente, área y porcentaje del área total, para la zona de estudio.**

<b>Pendiente porcentaje</b>	<b>Área (Has.)</b>	<b>Porcentaje del área total</b>
0 – 18.4	10205.76	50.89
18.4 – 36.8	7165.51	35.73
36.8 – 55.2	2092.52	10.43
55.2 - 73.6	483.13	2.41
73.6 – 92.00	89.10	0.44
92.00 – 165.60	19.66	0.09

#### **4.7.1.6. I Impacto en la zona no saturada (Impact vadose zone)**

Como se indicó anteriormente este factor fue estimado a partir de la información litológica, del mapa de Geología y de la información de Sáenz, 2003.

Toda el área del proyecto corresponde a lavas y tobas, las primeras con una buena permeabilidad y con un buen grado de fracturación. Las tobas por su parte presentan una menor permeabilidad, por lo que se decidió utilizar al igual que Agüero 2000 un valor típico de rocas ígneas de 4 para establecer el índice DRASTIC. El valor de ponderación de esta variable es de 4 para pesticida y de 5 para no pesticida, de acuerdo al anexo 2.

#### 4.7.1.7. C Conductividad Hidráulica (Conductivity hydraulic)

Debido a la falta de este tipo de datos se utilizó la metodología implementada por Fallas s.f. Se considera que la conductividad hidráulica de un suelo está en función de su capacidad de drenaje, de esta forma se derivó de la información de drenaje del mapa de asociaciones de subgrupos de suelos de Costa Rica a escala 1:200.000 (Acón y Asociados, 1991).

#### 4.8. Índice DRASTIC pesticida.

El valor promedio para el índice DRASTIC pesticida estimado fue de 120. El valor mínimo obtenido fue de 88 y valor máximo alcanzado fue de 157. La desviación estándar de los valores calculados fue de 17.

En el cuadro 11 se observa que para el índice DRASTIC pesticida no se clasificaron tierras en el área de estudio en las categorías Muy Baja y Muy Alta. La categoría con mayor área fue la de vulnerabilidad media con un total del 96.22% del área de la cuenca. La categoría baja apenas alcanzó un 3.63% y ventajosamente sólo se logró clasificar un 0.14% del área de la cuenca en categoría de vulnerabilidad alta.

**Cuadro 12. Vulnerabilidad relativa, rango de clasificación de índice DRASTIC pesticida, valor estimado de área y % del área total.**

Vulnerabilidad relativa	Índice DRATIC	Area (Has)	% área total
Muy baja	27 – 75.6	0	0
Baja	75.6 – 124.2	727.86	3.63
Media	124.2 – 172.8	19276.07	96.22
Alta	172.8 – 221.4	28.35	0.14
Muy alta	221.4 – 270	0	0

El área clasificada de vulnerabilidad baja es pequeña, para esta zona en particular el factor topografía y el factor recarga obtuvieron los índices más altos y actuaron como un disparador de la vulnerabilidad. en razón de ser una de las zonas más planas de la cuenca y con mayores recargas.

En la figura 4 se puede observar que la zona de vulnerabilidad baja se distribuye por toda la cuenca. Sin embargo las zonas con vulnerabilidad baja y alta se ubican de la parte media de la cuenca hacia las zonas más bajas.

Considerando las variables de profundidad del agua subterránea, tipos de suelo y conductividad hidráulica de los mismos, la vulnerabilidad propuesta es bastante lógica. En las pendientes más suaves se favorece mayor recarga, aunado a la mayor superficialidad del agua en estas zonas, lo que propicia una mayor vulnerabilidad del recurso hídrico.

Ninguna zona de la cuenca fue ubicada en el rango de vulnerabilidad muy baja, lo cual evidencia la necesidad de normar adecuadamente el desarrollo de actividades en la zona con el objetivo de mantener y porque no mejor el potencial de la zona, para la protección de los acuíferos.

En el detalle del uso de la tierra anexo 5 se nota la marcada alteración de la cuenca por el uso del suelo en actividades agrícolas en donde se utilizan pesticidas tales como café, helechos, cultivos anuales como fresa, chile dulce, tomate, lo cual hace necesaria el monitoreo constante y de la implementación de medidas de producción poco contaminantes. Estos dos elementos vulnerabilidad y el grado de alteración del medio, implican un manejo adecuado del riesgo.

Agüero, 2000 encontró un comportamiento parecido cuando evaluó la vulnerabilidad de una sección acuíferos del Valle Central, usando DRASTIC. Este investigador trabajo el área vecina inmediata del oeste, de la zona de esta investigación. También encontró pequeñas porciones de terreno con vulnerabilidades alta (1.02%) y muy alta (0.12%), mientras que la mayor parte del área fue ubicada en la categoría de media ( 60.26%) y baja (38.6%).

Torres, 2003, evaluó la vulnerabilidad del recurso hídrico de un sector de la Gran Area Metropolitana, mediante la metodología GOD, la cual considera en forma indirecta algunas de las variables del DRASTIC. En su estudio concluye que la mayoría del su área de estudio presenta vulnerabilidad moderada debido a las tobas que protegen el acuífero y se presenta un índice de vulnerabilidad alta cerca de los márgenes de los ríos, donde hay menores profundidades del nivel freático y se presentan lavas fracturadas.

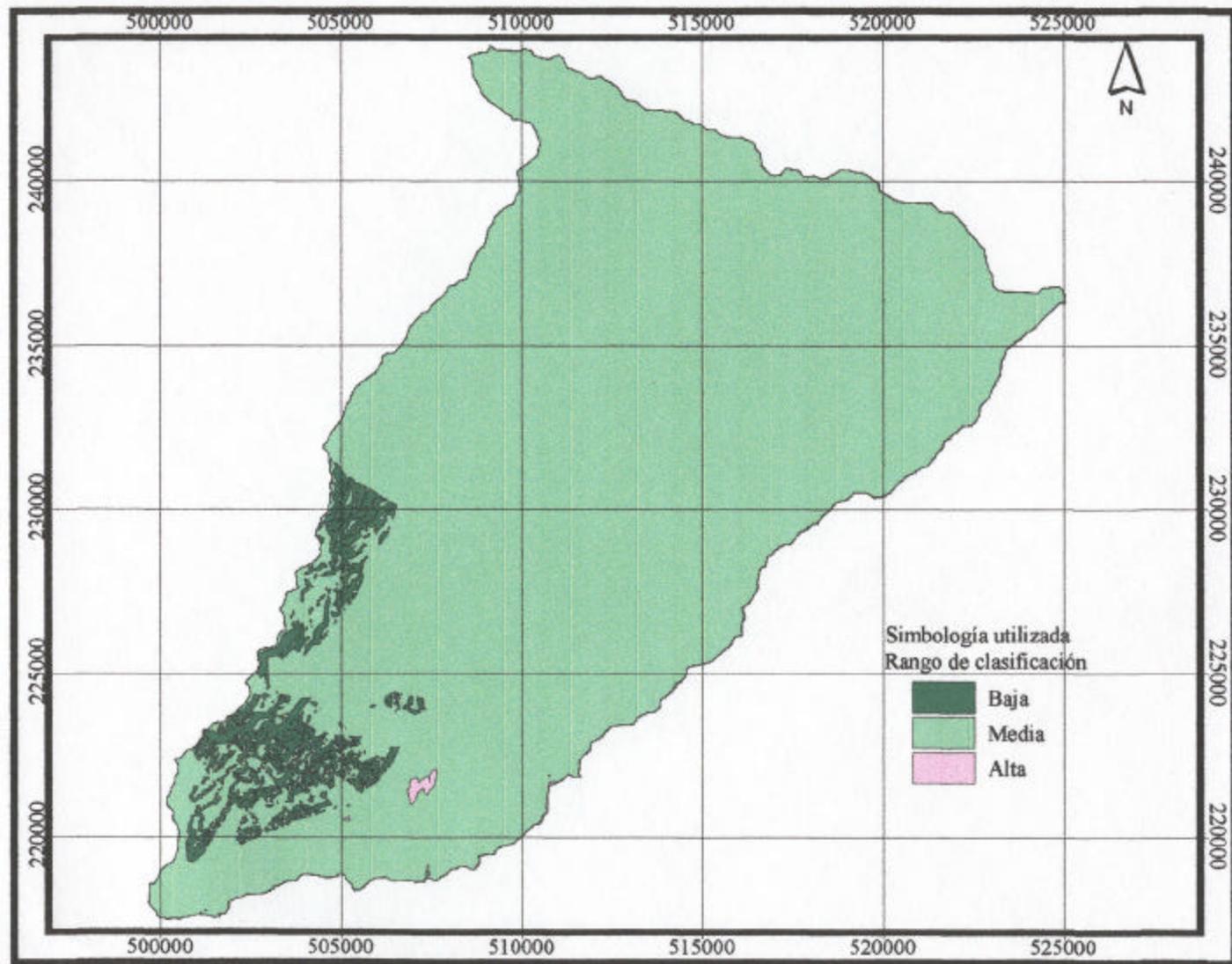


Figura 4. Rango de clasificación de índice Drastic para contaminante pesticida, en la zona de estudio

#### 4.9. Índice DRASTIC no pesticida.

El índice de vulnerabilidad DRASTIC para contaminante no pesticida, mostró solo dos categorías: media y alta. Casi la totalidad de la cuenca fue clasificada en el rango de vulnerabilidad baja (87.2%), solamente un 12.8% del área que representa apenas 2564.27 hectáreas fueron ubicadas en la categoría de vulnerabilidad media.

Al igual que para el índice DRASTIC para pesticida en el caso del índice para no pesticida las diferencias fueron marcadas principalmente por los niveles de recarga y por la topografía.

**Cuadro 13. Vulnerabilidad relativa, rango de clasificación de índice DRASTIC no pesticida, valor estimado de área y % del área total.**

Vulnerabilidad relativa	Índice DRATIC	Area (Has)	% área total
Muy baja	23 – 64.4	0	0
Baja	64.4 – 105.8	17468	87.2
Media	105.8 – 147.2	2564.27	12.80
Alta	147.2 – 188.6	0	0
Muy alta	188.6 – 230	0	0

En la figura 5 se muestra el detalle de la distribución del índice DRASTIC no pesticida. La dispersión del área de vulnerabilidad baja fue mayor, ubicándose algunas áreas hasta la parte media de la cuenca. Sin embargo se nota una mayor concentración de las mismas hacia la parte baja de la cuenca. Es importante notar que en cierta medida el índice se suaviza en los factores tipo de suelo y topografía, pero le concede mayor peso a la conductividad hidráulica. La cantidad de áreas consideradas de vulnerabilidad baja fue sustancialmente mayor.

Los resultados obtenidos en esta investigación para el índice DRASTIC no pesticida son similares a los calculados por Agüero 2000, quien describe una menor influencia del índice pendiente, por su menor peso específico, lo cual suaviza mucho la categorización.

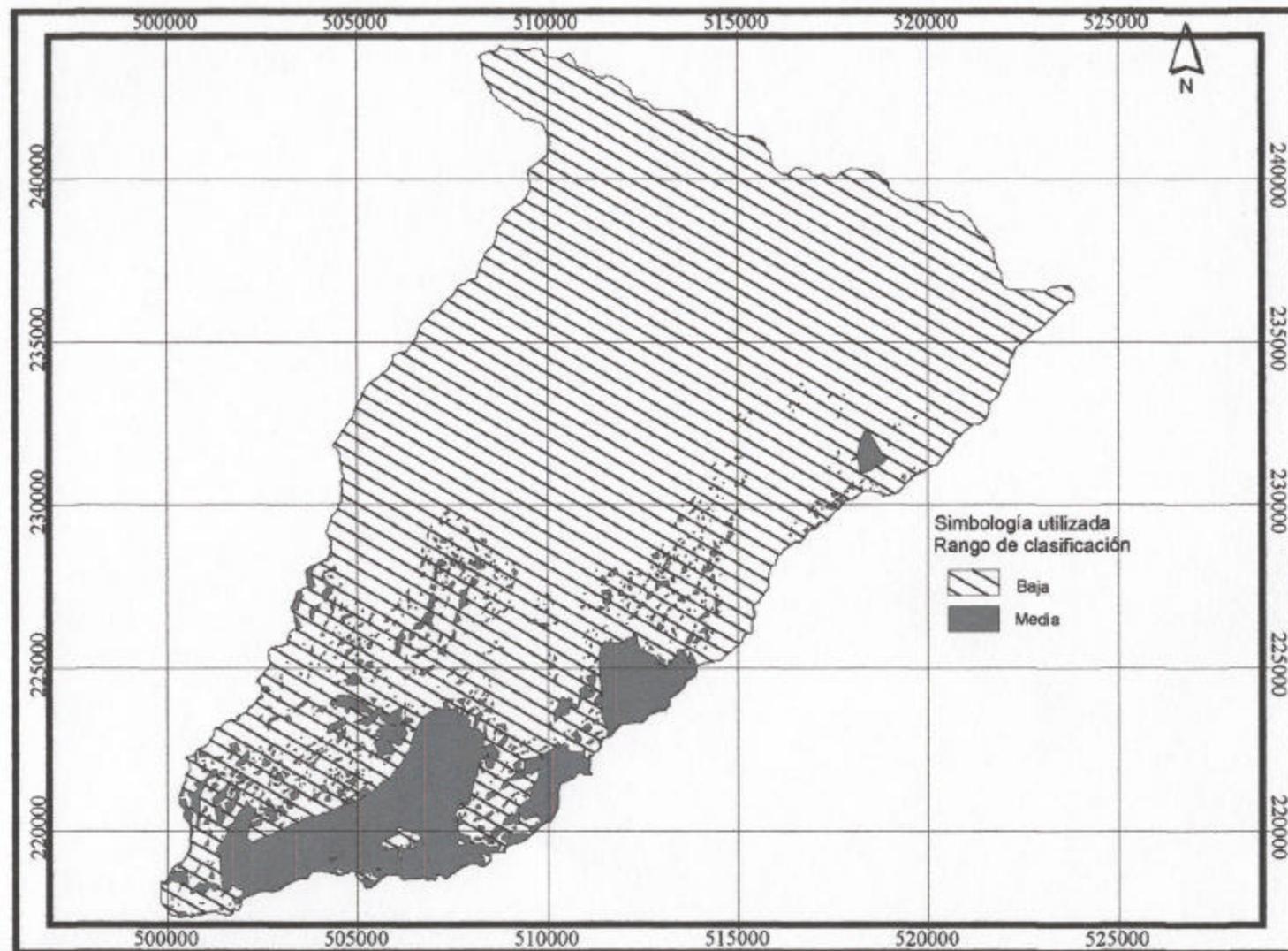


Figura 5. Rango de clasificación de índice Drastic para contaminante no pesticida, en la zona de estudio

## **V. Conclusiones**

El diseño de muestreo utilizado en esta investigación, no logró evidenciar un proceso sistemático de contaminación del agua en la zona del proyecto. Esto principalmente por los altos niveles de recarga del acuífero, que favorecen la dilución de los pesticidas, lo cual aunado al poder de atenuación del suelo, pudiera estar provocando niveles no detectables de las plaguicidas obtenidos.

El diseño de un proceso de muestreo único, fue insuficiente para evidenciar la dinámica de movimiento de los pesticidas. La presencia de los plaguicidas se mostró como un evento casual. Esto debido a que los procesos de transportación y atenuación de los plaguicidas así como las características químicas de cada producto, obligan prácticamente a realizar un diseño para cada plaguicida. Es necesario considerar los momentos de aplicación del mismo, contenido de humedad del suelo, carga hidráulica, intensidad de lluvia y características propias del suelo.

La mayor parte de la subcuenca del Río Poás, está dedicada a la producción de agropecuaria y sólo una pequeña porción mantiene una cubierta forestal. Sólo en una oportunidad y en niveles menores a los permisibles se determinó la presencia de residuos de plaguicidas en las tomas de agua potable monitoreadas.

En las subcuencas en donde predomina el uso del suelo como pasto y bosque no se determinó residuos de plaguicidas, tanto en las fuentes de agua, como en el agua de escorrentía. Mientras que en las subcuencas donde predomina el uso del suelo para producción de café y helechos, si se determinaron residuos de plaguicidas, tanto en las tomas de agua, como en el agua de escorrentía. Esto principalmente porque el sistema de producción de pasto es menos intensivo y el uso de plaguicidas es más focalizado.

La implementación de normas internacionales para la producción, tales como EUREPGAP, Iso9001 e Iso14000 como requisito para la comercialización de los helechos, en lo que respecta a la protección del ambiente, así como la denuncia social de posibles contaminaciones en esta zona, han provocado un mejor manejo de los plaguicidas, disminuyendo el riesgo a la contaminación.

En las aguas de escorrentía únicamente se encontraron residuos de endosulfán, asociados a helechos y a café. En el caso de los helechos se esperaba encontrar este residuo en más ocasiones, porque los productores reportaron su uso frecuente. En el caso del café, debido a los bajos precios del café, de los últimos cuatro años y a que la zona se encuentra libre de la Broca de Café, es poco frecuente el uso de este producto, a parte de que los cafetaleros no reportan su uso. El endosulfán es bastante persistente en el ambiente, lo cual facilita su monitoreo.

El agua de lavado de helechos se constituyó en el mejor sustrato para la determinación de residuos de plaguicidas. En esta se encontraron residuos de tres productos diferentes, y en las concentraciones más significativas. Sin embargo en todas las empacadoras muestreadas se cuenta con tanques para el almacenamiento y oxidación de dichas aguas. Es necesario el estudio de la calidad de estas aguas antes de ser vertidas.

El procedimiento de enjuague y lavado del sustrato de siembra no logró movilizar los residuos de plaguicidas, pues se comprobó en muchos casos la aplicación de pesticidas incluso un día antes del muestreo. Además es importante destacar que éste se constituye en un importante receptor e inmovilizador de residuos y por ende el manejo de este sustrato debe realizarse con mucho cuidado.

La metodología DRASTIC evidencia niveles de vulnerabilidad del agua subterránea para contaminante pesticida entre baja, media y alta. Sin embargo la presencia aunque esporádica de residuos de plaguicidas en fuentes de agua demuestra la vulnerabilidad del acuífero, o que la capacidad de atenuación de la zona no saturada esta siendo sobrepasada.

La metodología DRASTIC es fácil de implementar con ayuda de SIG, sin embargo la mayor limitación para su uso continua siendo la falta de información más precisa, en escalas mayores. Otro aspecto importante es que las instituciones encargadas de levantamiento de estas variables no tienen a disposición de los usuarios la información, y su acceso continua siendo un asunto de compadrazgo.

Los rangos de vulnerabilidad del agua subterránea estimados mediante la metodología DRASTIC, ponen en evidencia la necesidad de utilizar productos pesticidas más amigables, menos contaminantes, de un menor poder residual. Es imperante la disminución y sustitución de los plaguicidas organoclorados en la producción agrícola, principalmente del Endosulfán.

## **VI. Recomendaciones.**

En el monitoreo de residuos de plaguicidas en fuentes de agua es bastante difícil como lo documenta la literatura y los resultados aquí obtenidos, por lo que sería pertinente invertir más recursos en diseñar algunos procesos de concentración de residuos tendientes a evitar el problema de la dilución, así como la utilización de marcadores atómicos y el uso de sedimentos o biota.

Es preferible concentrar los procesos de monitoreo en pocos plaguicidas, con la finalidad de aumentar las frecuencias de monitoreo, evaluar más sustratos, suelo, follaje, biota, sedimentos, agua de lavado de equipo, agua de tanque de oxidación antes de drenarlo y efluentes de aboneras.

Debido a la marcada alteración de los ríos y quebradas es imposible utilizar los peces nativos de la zona por que ya no existen en la mayoría de los casos y son tan escasos que sería difícil conseguir una cantidad adecuada de muestra, por lo tanto se recomienda utilizar otro tipo de bioacumuladores como los bivalvos.

Podría ser más interesante muestrear niveles de colinesterazas en diferentes estratos de la población, personal de campo, aplicadores de pesticidas, empacadoras, usuarios de la red de agua potable. Además se debe de muestrear el agua a nivel de grifo intradomiciliario, con la finalidad de determinar otros contaminantes, que pudieran estar afectando la calidad de tan preciado líquido.

Se deben de mantener los programas de extensión de buenas prácticas de cultivo, manejo de plaguicidas, producción orgánica, control biológico de plagas y enfermedades, dado de que muchos de los entrevistados mostraron un marcado interés por conocer de técnicas más amigables, que le permitan producir con calidad sin afectar el ambiente. Lo cual está siendo fortalecido, por los requisitos internacionales de protección ambiental, para seguir comprando nuestros productos.

Es necesario mantener, mejorar y conjuntar los programas de monitoreo de calidad de agua que varias instituciones del estado realizan a fin de poder conseguir una acción sinérgica, que consiga potenciar los escasos recursos que se tienen, integrar el conocimiento y socializar los resultados.

En el acondicionamiento de los helechos para exportación se desechan grandes cantidades de hojas de helecho las cuales deben ser manejadas adecuadamente, es decir, procesadas para producir abono o bien dispuestas en sitios con una buena previsión para el control de lixiviados.

Programas de pago por servicios ambientales deberían implementarse en la zona con la finalidad de que sea más atractivo para los productores involucrarse en metodologías más amigables con el ambiente y de este modo proteger el recurso hídrico.

Es urgente mejorar los niveles de escala de la información cartográfica necesaria para el desarrollo de estos estudios, principalmente áreas de recarga, conductividad hidráulica, información litológica, líneas isofráticas, etc.

En el desarrollo de los programas o proyectos de manejo de cuencas este tipo de análisis deberían de ser considerados. Principalmente para que brinden un aporte a los procesos de planificación de las actividades humanas, en estas zonas tan importantes, para garantizar la calidad del agua potable.

## VII. Bibliografía

- Agüero, V. J. 2000.** Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Tesis. Lic. Ing. Civil, San José, Costa Rica. 195 p.
- Auge, M.; and Nagy, M-I, s.f.** Estado del agua subterránea respecto a la contaminación con agroquímicos en La Plata-Provincia de Buenos Aires. Universidad de Buenos Aires, Instituto del Agua y Ambiente. 10p. Consultado en Diciembre del 2002. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsarg/e/fulltext/aquest4.pdf>
- Ayers, R.S.; Westot, D.W. 1987.** La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. FAO, Roma, Italia. 174 p.
- Chesters, G.; Schierow, L. J. 1985.** A primer on Nonpoint Pollution. Journal of Soil and Water Conservation (USA). 40 (1): 9-13.
- Denyer, P., Siegfried, K., 1994.** Atlas geológico de la Gran Área Metropolitana o Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Esri, 2000.** ArcView Gis, The Geographic Information System for Everyone – Environmental Systems Research Institute, California, USA.
- FAO. 1993.** Prevention of Water Pollution by Agriculture and Related Activities, Actas de la consulta de Expertos de la FAO, Santiago, Chile. Water Report 1. FAO. Pág. 19-26.
- Foster, S.; Hirata, R. 1991.** Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. Cepis, OMS y OPS, Lima 1991.
- Gallego, M., 2000.** El agua, vehículo de contaminación. Página electrónica (en línea). Turrialba, C. R. Consultado en diciembre 2002. Disponible en: [www.babad.com/no01/agua.html](http://www.babad.com/no01/agua.html)
- GWP (Asociación Mundial para el Agua); TAC (Comité de Consejo Técnico). 1995.** Manejo Integrado de Recursos Hídricos. No. 4 s.1.74p. Consultado en enero 2003. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsarg/e/fulltext/mirth4.pdf>
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 1997.** La contaminación de aguas subterráneas. Página electrónica (en línea). Mega sitio centroamericano de población y ambiente. Consultado enero del 2003. Disponible en: <http://www.netsalud.sa.cr/aya/subter02.html>
- Losilla, M; Schosinsky, G. 2000.** Modelo análisis para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central. Nº23, p: 43-55.

- Olshansky, S.J., Carnes, B. Rogers, R., and Smith, L. 1989.** Infectious diseases – New and ancient threats to world health. Population Bulletin 42(2): 2-43.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) 1998.** Guías para la calidad del agua potable. Segunda Edición. Vol. 3. Vigilancia y control de los abastecimientos de la comunidad. Ginebra. 251p.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) 1998.** Guías para la calidad del agua potable: vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad. Volumen 3 OMS, Ginebra, 1998. 225 p.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) 1998.** Guías para la calidad del agua potable: vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad. Volumen 1 OMS, Ginebra, 1998. Recomendaciones, 320 p.
- Ongley, E.D., 1997.** Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos (Estudio FAO Riego y Drenaje – 55). FAO. Roma, Italia. Consultado en enero 2003 Disponible en: <http://www.cepis,ios-oms-org/>
- Sáenz, 2003.** Descripción geomorfológica de la zona norte de Alajuela y Heredia. San José, Instituto Costarricense de Electricidad, Mención en Comunicación personal.
- Senara, Brithis Geological Survey. 1985.** Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica, San José, 1985.
- Serdar, D. 2002.** Pesticide monitoring in the Mission Creek Basin. Washington State Department of Ecology, Environmental Assesment Program. Olympia, Washington. Consultado en diciembre 2002. Disponible en: <http://www.ecy.wa.gov/biblio70203071.html>
- Servicio Fitosanitario del Estado, 2002.** Estudio de la calidad en fuentes de agua potable de las provincias de Alajuela, Heredia y Cartago entre mayo del 2001 y abril del 2002. Proyecto Agua Viva. 25 p.
- Tood, Kevin.1964.** Ground Water Hydrology. John Wiley & Sons., Inc., 336 p.
- Torres, L. 2003.** Análisis de la vulnerabilidad del Recurso Hídrico de un Sector de la Gran Área Metropolitana. Tesis Lic. Ing. Civil. San José, Cost aRica. 187 p.
- United Nations (UN). Commission on Sustainable Development. 1997.** Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Report of the Secretary General. New York, UN. 39 p.
- United Nations (UN). Food and Agriculture Organization (FAO). 1990.** Water for life. Rome, FAO. P. 4-9.

**United States Geological Survey. 1999.** Relation of pesticides concentrations to season, streamflow, and land use in seven New Jersey streams. National Water – Quality Assessment Program Long Island – New Jersey. Study unit. Consultado en diciembre 2002. Disponible en: <http://www.metabase.net/docs/laTINcap/43427.html>

**World Health Organization (WHO) OMS. 1992.** Our planet, our health – Report of the WHO Commission on Health and Environment. Geneva, WHO. p. 106-144. Consultado en enero 2003. Disponible en: <http://www.who.int/pub/es/index.html>

**World Health Organization (WHO). 1990.** Division of Control of Tropical Disease homepage. Consultado en diciembre 2002. Online: <http://www.who.ch/ctd/>

**World Health Organization. 1990.** Public Health Impact of Pesticides used in Agriculture. WHO. Geneva, Switzerland. 128 p. Consultado el 10 de enero del 2003. Disponible en: <http://www.metabase.net/docs/incap/02007.html>