

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**

**“Oscar Lucero Moya”**

**FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS**

**TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL  
RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS  
TENDENTES A LA SALINIDAD. CASO EMPRESA  
AGROPECUARIA “ANTONIO MACEO”**

*Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Gestión Ambiental.*

**Autor: Ing. Sandro Ricardo Palacio**

2012

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**  
**“Oscar Lucero Moya”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS**

**TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL  
RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS  
TENDENTES A LA SALINIDAD. CASO EMPRESA  
AGROPECUARIA “ANTONIO MACEO”**

*Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Gestión Ambiental.*

*Autor:* Ing. Sandro Ricardo Palacio

*Tutor:* Dr. C. Julio Nolberto Pérez Guerrero

2012

## PENSAMIENTO

“Ahora puede decirse que sabemos bastante sobre el agua aunque estamos lejos de conocerlo todo.”

A. K. Lariónov

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la ciencia y a todas aquellas personas que cada día se involucran en ella para brindar su granito de arena en aras de proteger nuestro medio ambiente.

## AGRADECIMENTOS

Esta tesis es fruto de un trabajo mancomunado, por lo que agradezco a todas aquellas personas que dieron su modesto apoyo para su realización, desde el más humilde campesino hasta el mejor científico que contribuyeron con sus valiosos aportes y conocimientos, por tal motivo no menciono nombres para evitar que alguien quede fuera, a todos:

MUCHAS GRACIAS

## RESUMEN

El trabajo tiene por objetivo desarrollar una tecnología que vincule herramientas utilizadas en la Hidrogeología con las prácticas agronómicas para caracterizar la calidad del agua y que permita realizar una gestión ambiental más adecuada del recurso agua con fines agrícolas en zonas tendientes a la salinidad formadas sobre rocas de origen marino. Para lo cual se realiza un estudio del estado del arte sobre la temática y empleando el método sistémico se propone una tecnología de gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas, que está constituida por un modelo + una metodología (de seis fases). Partiendo de que en la actualidad los procesos naturales que influyen en la gestión del agua para agricultura se analizan a partir del efecto del clima y las interacciones Físicas – Químicas - Biológicas que ocurre a escasas profundidades del suelo, principalmente, hasta la capa activa de las raíces, obviando otros procesos hidrogeológicos que rigen la composición del agua y su relación con la calidad para usos agrícolas, atendiendo al grado de peligrosidad referente a la aplicación de riego por la posibilidad de salinización de los suelos con el mismo y necesidad o no de drenaje. La aplicación de esta, en áreas agrícolas con sus respectivas fuentes de abasto de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo”, enclavada en la depresión Cacocum de la Cuenca del Cauto, arrojó que las aguas subterráneas evaluadas se encuentran salinizadas y muy salinizadas con un alto predominio de iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> demostrándose una ocurrencia marina en el manto freático, atendiendo al potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes se pronostica que los suelos ubicados en las áreas de los pozos evaluados son pocos salinizables al Sur y muy salinizables al Norte. En los suelos de la zona de estudio por su tolerancia a la salinidad los cultivos a establecerse deben de estar entre tolerantes y semitolerantes empleando normas de riego que deben fluctuar entre los 195,0 y 975,0 m<sup>3</sup> /ha en dependencia de la profundidad radical del cultivo, siendo necesario aplicar un exceso de agua para lixiviación.

Palabras Claves: Cuenca del Cauto, Salinización, Hidrogeología.

## SUMMARY

The paper has for as objective to develop a technology that links the tools used in the Hydrogeology with the agronomic practice to characterize water quality, and enables environmental management of the water resource with agricultural purposes in zones that has a tendency to the salinity formed on rocks of sea origin. For which purpose is carried out a study of the art state on the thematic and employing the systemic method is proposes a technology of environmental administration of the water resource with agricultural purposes. that is constituted by a model + a methodology (of six phases). Departing from of that at the present time the natural processes that influence in the water administration for agriculture are analyzed starting from the effect of the climate and the Physical - Chemistries- Biological interactions that occurs to scarce depths of the soil, the danger grade with respect to the application of irrigation for the possibility of salinization soils with the same and necessity or not of drainage. The application of this, in agricultural areas with their respective supply sources of the Agricultural Enterprise "Antonio Maceo," located in the Cacocum depression of the Cuenca del Cauto, throw that the groundwater evaluated meet salinized and very salinized with a tall prevalence of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  ions, demonstrating a marine occurrence in the water table, attending to the potential of salinization for hydrogeologic conditions existent is predicted that the soils located in the areas of the evaluated wells are salinized few at South an very salinized at North. In the soils of the zone study for their tolerance to the salinity the crop to be established should be between tolerant and semitolerant employing irrigation norms that should fluctuate between 195,0 and 975,0  $\text{m}^3/\text{ha}$  in dependence of the radical depth crops, being necessary to apply an excess of water for leaching out of salts.

Key Words : Cuenca del Cauto, Salinization, Hydrogeology

# ÍNDICE

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL MANEJO DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS.....	9
– Gestión ambiental.....	9
– Gestión ambiental del agua, acciones y perspectivas.....	10
1.1 Políticas, guías, tecnologías y estrategias para el manejo del recurso agua en la agricultura.....	13
1.2 Influencia de procesos hidrogeológicos en la calidad de los suelos y su relación con la gestión del agua en la agricultura.....	19
1.3 Naturaleza geológica y clima de Cuba.....	20
1.4 Características generales de las formaciones arcillosas de origen marino y geomorfología estructural de la Cuenca del Cauto.....	22
1.5 Factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas.....	26
1.6 Conclusiones del Capítulo.....	30
2. TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS CON ELEVADA TENDENCIA A LA SALINIDAD.....	32
2.1 Fundamentación teórica de la solución.....	32
2.2 Modelo para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.....	33
2.3 Propuesta de la metodología a emplear.....	37
2.4 Conclusiones del capítulo.....	51
3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE LA TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS CON ELEVADA TENDENCIA A LA SALINIDAD DE LA CUENCA DEL RÍO CAUTO, CASO DE ESTUDIO, “ANTONIO MACEO”.....	52
3.1 Fase 1: Preparatoria.....	52
3.2 Fase 2: Búsqueda de información, muestreo y análisis del laboratorio.....	53
3.3 Fase 3: Evaluación de resultados y caracterización del agua.....	54

3.4 Fase 4: Propuesta de soluciones.....	65
3.5 Conclusiones del capítulo .....	72
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA .....	76
ANEXOS	

## INTRODUCCIÓN

El agua (conjuntamente con el aire) es un bien común mundial, el bien público por excelencia, lo que implica que cada persona, comunidad, o nación tiene derechos indiscutibles en relación al acceso, en calidad y cantidad necesaria de acuerdo a su escenario de organización social y ambiental, en definitiva, el derecho a gestionar el agua. (FAO, 2007).

La gestión del agua ha de realizarse con la mayor eficiencia posible ya que el uso ineficiente de la misma y la degradación de su calidad constituyen uno de los principales frenos para avanzar por senderos de sustentabilidad, influyendo en la dimensión social, económica y ambiental ya que los usos antrópicos del agua impactan directamente en el ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo (calidad de agua, estado de condición de los reservorios de agua dulce), como desde el punto de vista cuantitativo (velocidad de circulación de los flujos de agua y tasas de renovación). (FAO, 2007).

La extracción anual global de agua se estima que está sobre el 70 % en usos agrícolas, un 20 % en usos industriales y un 10 % en usos domésticos y sigue en incremento debido al crecimiento demográfico y al incremento del nivel de vida, a escala mundial se han construido miles de embalses, se perforan innumerables baterías de pozos, y se extraen las reservas naturales de agua a ritmos sin precedentes. Grandes volúmenes de agua usada de mala calidad retornan al ambiente causando degeneración generalizada de los cursos de agua, lagos, acuíferos y aguas costeras sin tener límites de explotación, el volumen de agua del planeta es finito pero su teórico potencial resulta engañoso. Existen limitaciones en la rapidez del flujo y a largo plazo por la irreversibilidad final de su degradación entrópica, que es acelerada a través de la intervención humana. Hoy se comprende que el aprovechamiento del agua tiene límites que vienen impuestos por la conservación del medio ambiente de forma que se garantice el buen funcionamiento del límite del agua. (López, 2001).

Según el informe de la FAO recientemente publicado Agricultura mundial: hacia los años 2015-2030, se prevé que la producción de alimentos necesitará incrementarse un 60 por ciento para cerrar las brechas de la nutrición, atender el crecimiento de la población y adaptarse a los cambios alimentarios en los próximos 30 años. Lo que trae consigo un incremento de la extracción del agua para la agricultura del 14 por ciento en ese periodo, lo que representa una tasa anual de crecimiento del 0,6 %, en comparación con el 1,9 % del periodo 1963-1999. Gran parte del incremento corresponderá a las tierras cultivables de riego, cuya expansión mundial será de 2 millones de km<sup>2</sup> a 2,42 millones de km<sup>2</sup>. (FAO, 2007).

Para satisfacer estas diversas demandas, la FAO considera que las políticas agrícolas tendrán que liberar el potencial de las prácticas de gestión del agua para incrementar la productividad, promover un acceso equitativo al agua y conservar los recursos básicos, donde las cuestiones ambientales deben formar parte de la modernización en la utilización y la gestión del agua. La extracción de la misma en ríos y lagos con la construcción de infraestructura de riego desplazan invariablemente a las tierras húmedas que constituyen, por sí mismas, componentes muy productivos de los sistemas agroecológicos. El drenaje causado por la irrigación a menudo se traduce en pérdida de calidad del agua, propagación de enfermedades relacionadas con el agua y degradación del suelo por anegamiento y salinización. Para reducir estos efectos, la moderna gestión del agua necesita basarse en evaluaciones estratégicas del medio ambiente y análisis de los costos y beneficios, supervisión ambiental constante e integración del riego en el contexto ambiental más amplio. (FAO, 2007).

Por consiguiente, existe la urgente necesidad de evaluar los recursos hídricos disponibles y otros recursos naturales conexos en la medida que están relacionados con la agricultura de regadío y de secano, identificar la falta de información y establecer metodologías adecuadas para la reunión y el análisis de datos, controlar los cultivos, compilar inventarios del tipo y aprovechamiento del agua para la agricultura y de sus contribuciones actuales y futuras al desarrollo agrícola sostenible, y mejorar la disponibilidad y la difusión de datos entre planificadores, técnicos y agricultores. (FAO, 2003).

Aparejado con lo anteriormente se han encontrado en la literatura internacional los siguientes problemas relacionados con el manejo del agua en la agricultura:

- La revisión a nivel mundial de los efectos ambientales de la agricultura bajo riego en la calidad del agua y de los suelos en regiones semiáridas y áridas a escala de campo, arroja que la información relevada es escasa y fragmentaria.
- La mayor parte de los estudios se refieren a salinización y contaminación de los suelos prestando mayor atención a la relación con los agroquímicos, en particular considerando la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$ .
- El impacto de los microcontaminantes, como los pesticidas o los metales pesados, se ha estudiado mayormente a través de la aplicación de modelos.

– La ausencia de datos hidroclimáticos adecuados y fiables sobre los recursos naturales en los países en desarrollo es un factor importante que actualmente impide el aprovechamiento racional del agua y el desarrollo agrícola sostenible.

A nivel mundial se pueden encontrar diferentes guías, propuestas, estrategias, metodologías o tecnologías para el manejo del agua dentro del contexto de la agricultura de las que se pueden citar las propuestas por: Carretero (1968), Martínez-Austria (1997), Holzapfel (2002), Petersen *et al* (2003), Castellanos (2003), Earthscan (2007) entre otras. Pero, las mismas no presentan una visión para la gestión del agua en un ciclo más amplio que vaya desde su origen hasta sus efectos en el medio ambiente apreciándose cierto divorcio entre las Ciencia de la Hidrogeología y las prácticas agronómicas ya que en los procesos agrícolas se obvian procesos naturales del balance hidrológico más vinculados a la naturaleza del agua, lo que conlleva al agotamiento de los recursos hídricos y el deterioro del medio ambiente. La solución de este aspecto constituye un problema científico de trascendental importancia.

En Cuba los problemas de la agricultura para años futuros estarán estrechamente relacionados con la salinidad, así como el uso y control del agua, encontrándose al sur y al norte de las regiones central y oriental del país los suelos con problemas naturales de salinidad acompañados de un balance negativo de lluvia/evaporación. (Ortega *et al*, 1986).

Lo antes consignado se debe a la existencia de dos factores claves que determinan el quimismo de las aguas y su efecto dentro del ecosistema por el que fluye la misma (La naturaleza geológica y el Clima), y estos relacionados con la gestión del agua que el hombre ha venido realizando hasta el momento.

En regiones áridas y semiáridas esta situación es predominante, Los factores anteriormente mencionados implican que el proceso natural de salinidad aumenta en dependencia de los cambios climáticos, la erosión del suelo y la redistribución de los materiales, en relación con el proceso geomorfológico, al igual que los ciclos hidrológicos subterráneos y superficiales. Por otra parte, el proceso de salinidad es también una consecuencia del desarrollo de la sociedad humana, debido a incorrectas prácticas agrícolas en el suelo y mal manejo de las aguas para el riego, lo cual es conocido como proceso de salinidad antrópica o secundaria. En el siglo pasado, la actividad humana contribuyó a romper el balance dinámico entre la producción y los recursos naturales. Esta situación introdujo algunos cambios ambientales que amenazan la disponibilidad de recursos no renovables y la aceleración del agotamiento de los recursos renovables. (Álvarez *et al*, 2008).

Bajo las condiciones antes consignadas se encuentran las localidades que tributan a la Cuenca del Cauto, como es el caso de las áreas agrícolas de la localidad de Antonio Maceo perteneciente al municipio de Cacocum, provincia Holguín, ya que se está produciendo un proceso de reconversión agroindustrial, donde sobre suelos que tradicionalmente se dedicaron al cultivo de la caña de azúcar, ahora se establecerán otros cultivos y para el desarrollo exitoso de este proceso se hace necesario la gestión eficiente del recurso agua con un mínimo de afectación al medio ambiente y poder establecer cultivos que manifiesten una mejor adaptación con mayores rendimientos, pero para su implementación el territorio enfrenta las siguientes problemáticas:

- Zona formada sobre rocas sedimentarias de origen marino que han traído consigo que los acuíferos contengan elevados tenores de sales.
- Comportamiento negativo del balance de lluvia/evaporación.
- Históricamente se ha conducido una insuficiente gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas, debido al desconocimiento de tecnologías más adecuadas a la zona acompañada de una carencia de bases de datos de análisis del origen y aplicación de metodologías sobre la calidad del agua en la localidad.

Debido a lo antes consignado las aguas propias de la zona de estudio han incrementado sus concentraciones de sales, provocando una elevada salinización de este recurso que paulatinamente se trasmite al suelo, haciéndolo inservible para usos agrícolas ya que el mismo es Vértico con altos porcentos de arcillas pesadas que facilita los ascensos del agua subterránea (rica en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ) por la presencia de capilares muy finos que se han agudizados por la compactación mediante uso de maquinarias pesadas utilizadas en las labores cañeras y por otra parte estas arcillas en períodos secos crean un agrietamiento muy profundo por el cual percola el agua de lluvia caída impidiendo el lavado natural del suelo ocasionando una salinización irreversible de la zona no saturada al evaporarse los ascensos producidos. Trayendo consigo la degradación de los recursos suelo y agua y por ende el deterioro del medio ambiente con grandes afectaciones al agroecosistema ya que esta salinización reduce la disponibilidad de agua para las plantas afectando seriamente los rendimientos agrícolas al igual que deteriora el paisaje.

Por lo que para la gestión ambiental del recurso agua en esta zona para fines agrícolas se requiere de un modelo más amplio, sistémico y dinámico, acompañado de metodología que permita la aplicación de una tecnología más adecuada y específica, ya que en Cuba se ha venido trabajando con propuestas muy globales de las que aparecen en la literatura mundial que se basan más bien

en la captación, conducción y algunos parámetros de la calidad del agua y por todo lo anteriormente consignado, se muestra la necesidad de buscar un acercamiento a una tecnología científicamente justificada y económicamente viable donde las teorías de las ciencias agronómicas e hidrogeológicas se compenetren en la gestión ambiental del recurso agua partiendo de las causas morfológicas que originaron el quimismo y su influencia en las características hidrogeológicas actuales, para poder establecer un régimen hídrico que supla las demandas de los cultivos tanto en cantidad como en calidad de forma armónica con los procesos naturales del medio ambiente por lo que se tiene como **problema científico** el siguiente: *A pesar de estar interconectados dentro del ecosistema los procesos naturales de la Hidrogeología con las prácticas agronómicas, no se dispone de una tecnología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas que utilice herramientas de las Ciencias Hidrogeológicas como el Índice de Salinidad Marina, Contaminación Salina y Pronóstico de Salinización en zonas tendentes a la salinidad formadas sobre rocas de origen marino. Teniendo como* **objeto de estudio:** La gestión ambiental del recurso agua.

Planteándose como **hipótesis:** *Si se logra una tecnología que utilice herramientas de las prácticas agronómicas de conjunto con el Índice de Salinidad Marina, Contaminación Salina y Pronóstico de Salinización que son utilizados en la Hidrogeología, se puede realizar una gestión ambiental más adecuada del recurso agua con fines agrícolas en zonas tendentes a la salinidad formadas sobre rocas de origen marino. Y para dar solución al problema y demostrar la hipótesis planteada se tiene como* **objetivo general** del trabajo: *Desarrollar una tecnología utilizando herramientas de la Hidrogeología como son el Índice de Salinidad Marina, Contaminación Salina y Pronóstico de Salinización de conjunto con las prácticas agronómicas, que permita una gestión ambiental más adecuada del recurso agua con fines agrícolas en zonas tendentes a la salinidad formadas sobre rocas de origen marino. Teniendo como* **campo de la investigación:** *La gestión ambiental de recurso agua en las prácticas agronómicas.*

#### **Objetivos específicos:**

– Realizar el estudio del estado del arte relacionado con el objeto de la investigación: Gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas, influencia de procesos hidrogeológicos en la calidad de los suelos, características generales de las formaciones arcillosas de origen marino, sinopsis geomorfológica estructural de la Cuenca del Cauto, así como factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas.

- Sintetizar un modelo teórico del sistema de gestión ambiental del recurso agua, elementos, procesos, interrelaciones, etc.
- Proponer una Metodología que utilice algunas herramientas de la Hidrogeología de conjunto con las prácticas agronómicas, y permita un adecuado proceso de gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.
- Validar la tecnología mediante la implementación de la metodología propuesta para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.

## Métodos aplicados en la investigación

### Métodos teóricos empleados:

- Método Histórico – Lógico: Mediante previas investigaciones bibliográficas existentes en el país y en el mundo, para comprender el objeto de estudio en su desarrollo, a través del conocimiento del origen hidrogeológico de la zona de estudio, el comportamiento físico – químico de estas aguas y su relación con el clima para poder diseñar una tecnología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.
- Método Dialéctico – Materialista: Permitirá el análisis de las causas, dificultades, contradicciones, que inciden en la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.
- Análisis y Síntesis: A través del análisis de la problemática actual del agua en la agricultura y los procesos de manejo llevados a cabo en la actualidad, determinar posibles soluciones, tomando como referencia criterios sobre la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas abordados por diferentes autores y adaptándolas al caso de estudio.
- Método sistémico: Permite revelar la estructura y las relaciones funcionales de la esencia del proceso, a través del estudio del comportamiento funcional y estructural: las entradas y las salidas, los diferentes componentes que forman parte del objeto, las interrelaciones que se dan durante su funcionamiento, los diferentes procesos que se realizan y las operaciones que en ellos se efectúan, su vínculo con el medio circundante, entre otros aspectos de interés.

### Métodos empíricos empleados:

- Observación científica: En la etapa inicial, se utilizó para el diagnóstico del problema a investigar, para determinar posibles causas y problemáticas que afectan la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas en la zona de estudio.

– Estadísticos: Los datos recogidos en el monitoreo y ensayo se analizaron para comparar y relacionar el efecto provocado por las aguas exteriores e interiores y a partir de ello dar una interpretación lógica de los resultados obtenidos que sirvan de base a la propuesta que se realizará.

### Aportes de la investigación

Aporte teórico: Se propone por primera vez una tecnología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas en suelos propensos a la salinidad de la región de La Cuenca del Cauto donde se vinculan criterios y herramientas aplicadas dentro de la Hidrogeología atendiendo al efecto de su calidad sobre el medio ambiente en áreas agrícolas cuyos suelos tienen una formación geológica de origen marino, donde se valoran los puntos de vistas de las Ciencias Agronómicas e Hidrogeológicas apoyados en la Meteorología y otras ciencias como la Química y la Biología, basándose en los principios de la gestión ambiental. Este carácter multidisciplinario permite a partir de diagnósticos de las aguas y suelos la determinación del quimismo y grado de contenido de sales de origen marino de las aguas subterráneas, de la zona de estudio por dos índices que son analizados en las ciencias hidrogeológicas y no en las ciencias agrícolas, como son el Índice de Salinidad Marina (ISM) y la Contaminación Salina (CS), que permiten llegar a conclusiones sobre el grado de salinización de las aguas subterráneas por predominio de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sobre otros elementos, mediante el análisis de la relación  $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$  ya que el  $\text{Cl}^-$  es el ión dominante del agua del océano y ocurre en pequeñas cantidades en aguas subterráneas y el  $\text{HCO}_3^-$  es corrientemente el ión negativo más abundante en el agua subterránea ocurriendo en mínimas cantidades en el agua del mar, por otra parte, se incluyó en la tecnología el pronóstico del potencial de salinización de los suelos por condiciones hidrogeológicas existentes, teniendo en cuenta la profundidad de yacencia de las aguas freáticas, su quimismo en función del ISM y los ascensos capilares de la litología de cubierta. En función de lo anterior es posible un reordenamiento de los cultivos para la explotación adecuada, racional y sostenible de los recursos agua y suelo en regiones vulnerables a la salinidad.

Aporte metodológico: El trabajo constituye una referencia en tres direcciones esenciales. En primer lugar, la metodología desarrollada como tal, implanta una guía para otros trabajos iguales o similares. En segundo término, el desarrollo del análisis del estado actual, también constituye una orientación práctica concreta para estudios similares y por último, la aplicación del método sistémico – estructural para el análisis y solución del problema, establece igualmente, una referencia para

estudios teóricos similares. Lo que la hace aplicable a otras regiones del país que presenten las mismas condiciones hidrogeológicas.

# 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL MANEJO DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS

El presente capítulo tiene el propósito de realizar una búsqueda acerca de los principales conceptos y teorías, más relacionados con la gestión del recurso agua con fines agrícolas y el medio ambiente, así como analizar diferentes metodologías, tecnologías, guías etc., que han sido propuestas para el manejo del agua en la agricultura y en la determinación de la calidad del agua para riego. Realizando además una revisión acerca de influencia de procesos hidrogeológicos en la calidad de los suelos, características generales de las formaciones arcillosas de origen marino, sinopsis geomorfológica estructural de la Cuenca del Cauto, así como factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas.

## – Gestión ambiental

La gestión ambiental es una disciplina antigua pero se ha conceptualizado recientemente. Los autores abordan en lo común cuestiones ambientales (impacto ambiental, preservación de los recursos naturales, ecosistemas, desarrollo sostenible), aunque las divergencias son numerosas porque se conceptualiza a un entorno específico (espacio geográfico, calidad de vida, capacidad institucional). (Theslock, 2003).

El concepto de gestión ambiental no puede reducirse exclusivamente a la conservación de la naturaleza, a solución de la problemática ambiental causada por la contaminación del aire, el agua o el suelo, o a la atención de cualquier otro tipo de problemas ecológicos. Este concepto es mucho más amplio y profundo que implica el manejo regional del ambiente, de los recursos naturales y de los problemas que los impacta también implica la participación concertada y articulada de todos los sectores de la sociedad en torno a un propósito común que es, en las circunstancias y condiciones actuales, lograr el desarrollo sustentable, concepto éste que ha surgido del cuestionamiento acerca del rumbo y dinámica que ha adquirido el desarrollo humano. (Theslock, 2003).

La gestión ambiental, definida como la acción y efecto de administrar el ambiente, constituye el instrumento que permite definir y aplicar la normatividad ambiental y ecológica a que deben

sujetarse las actividades humanas; delinear y dictar las políticas y estrategias ambientales y ecológicas; planear, programar, presupuestar y ejecutar obras y acciones para preservar el ambiente, concertar y coordinar la participación integrada de los tres niveles de gobierno y de los diferentes sectores de la sociedad; medir y evaluar lo alcanzado, y ajustar los planes y programas emprendidos. (Theslock, 2003).

También traducida como procedimientos y acciones para la protección ambiental, integra de forma directa o indirecta la intervención del hombre para el equilibrio de los ecosistemas. (Agenda21local/GEO-Holguín, 2008).

Para poder vincularnos con la actividad de Gestión Ambiental en Cuba constituye un paso primordial comprender los principales conceptos que están vinculados con la misma. Así debemos conocer qué plantea la Ley 81 de 1997. Ley de Medio Ambiente de nuestro Estado Cubano sobre el concepto de medio ambiente: Sistema abiótico, biótico y socioeconómico con el que interactúa el hombre, a la vez que se adapta al mismo, lo transforma y lo utiliza para satisfacer sus necesidades. Este cuerpo legal conceptualiza a la Gestión Ambiental como: el conjunto de actividades, mecanismos, acciones e instrumentos, dirigidos garantizar la administración y uso racional de los recursos naturales mediante la conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo del medio ambiente y el control de la actividad del hombre en esta esfera. La gestión ambiental aplica la política ambiental establecida mediante un enfoque multidisciplinario, teniendo en cuenta el acervo cultural, la experiencia nacional acumulada y la participación ciudadana. (Ley 81 del Medio Ambiente, 1997).

Es importante ver otro concepto de Gestión Ambiental, que se define como la conducción, dirección, control y administración del uso de los sistemas ambientales, a través de determinados instrumentos, reglamentos, normas, financiamiento y disposiciones institucionales y jurídicas (...). La Gestión Ambiental es precedida por lo tanto, por un proceso de toma de decisiones, a partir de los diversos escenarios de planificación. (Sigarreta, 2004).

#### – Gestión ambiental del agua, acciones y perspectivas

En sentido amplio, la gestión ambiental del agua puede ser entendida como el estado de condición (vinculado al uso y estilo) del sistema hidrológico en el momento de producción, renovación y movilización de agua u otros elementos de la naturaleza, minimizando la generación de procesos de degradación del sistema. Durante los últimos 50 años el considerable incremento de la productividad agrícola ha protegido al mundo de devastadoras escaseces de alimentos y del peligro de hambrunas

de masas. La gestión del agua, tanto en la agricultura de secano como en la de regadío, fue decisiva para lograr ese incremento, fue uno de los principales elementos de las técnicas de la revolución verde basadas en la aplicación de fertilizantes y la utilización de variedades de gran rendimiento, y contribuyó a incrementar la productividad ("producción por gota") alrededor del 100 % desde 1960. (FAO, 2007).

En la actualidad, existen profundas divergencias de opinión sobre las decisiones que deberían tomarse respecto al agua para la alimentación y para los ecosistemas. Algunos recalcan la necesidad de aprovechar más el agua mediante grandes infraestructuras, con el fin de aliviar la escasez, impulsar el crecimiento económico, proteger a los sectores vulnerables y aliviar la presión sobre el medio ambiente. Los proyectos para transferir agua desde las cuencas abundantes hacia las más escasas siguen este enfoque. En el otro extremo se encuentran quienes claman por detener la expansión de las infraestructuras hidráulicas y agrícolas y por establecer prácticas que restablezcan los ecosistemas. (Earthscan, 2007).

El principal motivo de estas divergencias se debe a un desacuerdo sobre las premisas básicas. ¿Cuánta agua se utiliza en agricultura? ¿Cuánto riego hay? ¿Cuál es el aporte del agua subterránea? Además, ¿cuál es el uso actual y el potencial de la agricultura de secano? (Earthscan, 2007).

Por lo planteado anteriormente, se aprecia que estas divergencias sobre el uso del agua tiene un valor distinto según el desarrollo económico del país donde residen las personas que emiten su criterio, ya que lo ideal sería estar potenciados en infraestructura pero acompañadas del manejo adecuado a nivel local, aunque lamentablemente los países en vías al desarrollo tienen que trabajar muy fuerte para implementar tecnologías adaptadas a sus capacidades previendo la no alteración del balance hidrológico de sus ecosistemas y siempre teniendo en cuenta criterios como el origen, cantidad y calidad del recurso hídrico y su relación con el medio ambiente.

Al realizar una búsqueda sobre los conceptos de la gestión del agua en la agricultura en archivos del Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI), se han encontrado los criterios más universales sobre su evolución, los cuales se reflejan en la tabla: 1.1

En estos conceptos se aprecia cómo se gestionaba el agua en un marco muy restringido para su uso y aislado del resto de los procesos que influyen sobre la misma y como se han incorporado otros puntos de vistas para su gestión con un enfoque más acercado al ciclo hidrológico de la naturaleza y una integración de las esferas económicas, sociales y ambientales, pero todavía conceptualiza a

niveles muy generales faltándole una orientación hacia procesos más específicos de su gestión sobre la base del proceso hidrogeológico a un nivel más regional.

Tabla 1. 1 Evolución de conceptos sobre el manejo del agua

Concepto del pasado	Concepto actual y del futuro
<p>– Atención focalizada principalmente en opciones de riego y extracciones de aguas fluviales y subterráneas.</p>	<p>– Considera una gama de opciones dentro del campo de la gestión del agua en la agricultura, incluida la de regadío y de secano, con la integración de la producción pesquera y ganadera.</p> <p>– Concede mayor atención la gestión del agua de lluvia, la evapotranspiración y la reutilización.</p> <p>– Considera las decisiones de uso de la tierra como si fueran del uso del agua.</p> <p>– Incorpora la reconexión entre los usuarios mediante el ciclo hidrológico.</p>
<p>– Trataba por separado el agua para la agricultura y el agua para los ecosistemas.</p>	<p>– Trata la agricultura como un ecosistema que produce diversos servicios, en interacción con la conservación del ecosistema.</p>
<p>– Consideraba los costos y beneficios solamente de la producción alimentaria, dentro de un enfoque sectorial.</p>	<p>– Adopta un programa más amplio, que incluye los medios de subsistencia, con el fin de aumentar los bienes de los pobres, darles mayor voz en la toma de decisiones, aumentar sus ingresos y disminuir sus riesgos y su vulnerabilidad</p>
<p>– Dirigido principalmente a la producción de cultivos.</p>	<p>– Promueve las funciones múltiples y los fines múltiples del agua en la agricultura.</p> <p>– Reconoce roles diferentes, basados en el género, la edad, la clase y la casta.</p>
<p>– Trabajaba en un vacío político imponiendo, desde el exterior, reformas basadas en un solo factor (la “varita mágica”).</p>	<p>– Para llevar adelante las negociaciones y crear instituciones y políticas eficaces, se crea la metodología más apropiada para el contexto dado, reconociendo la índole políticamente controvertida de las reformas.</p>

Tabla. 1.1 Evolución de conceptos sobre el manejo del agua. Cont

Concepto del pasado	Concepto actual y del futuro
– La gestión del agua se llevaba adelante de una manera autoritaria (ordenar y controlar).	– Hace que los servicios de riego estén dirigidos, y sean flexibles, fables y transparentes.
– Hacía que las inversiones satisficieran las necesidades de la población pobre en la forma de “intervenciones”	– Pone en manos de la población pobre los medios para salir de la pobreza, al centrar la atención en el agua como medio para cultivar sus propios alimentos. – Aumenta la participación en los mercados de mayores ingresos, mediante la diversificación y el crecimiento económico local, creando más empleos, tanto dentro como fuera de las explotaciones agrarias.
– Amplió la superficie de tierras agrícolas para aumentar la producción	– Intensifica la producción agrícola aumentando la productividad de tierra y agua, con el fin de limitar el uso de más agua y la expansión a nuevas tierras.
– Consideraba al Estado como el ente responsable del desarrollo y la gestión de los recursos –	– Hace que las decisiones sobre acciones en materia de aguas sean más participativas y transparentes. – Invita a las organizaciones de la sociedad civil a participar en la toma de decisiones.
– Descartaba la biodiversidad como “problema de otros” y un asunto puramente “conservacionista”	– Integra los servicios de los ecosistemas y de la biodiversidad entre los objetivos centrales, para evitar su pérdida o mal gestión.
– Consideraba el uso ambiental del agua como “agua perdida”	– Incluye la apropiada valoración económica de los aspectos ambientales del uso del agua, en las evaluaciones de las ventajas y desventajas, y en las decisiones sobre el uso de este elemento.

Fuente: Análisis del Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI) efectuado para la Evaluación exhaustiva de la Gestión del agua en la Agricultura, usando el modelo Watersim; capítulo 3.

## 1.1 Políticas, guías, tecnologías y estrategias para el manejo del recurso agua en la agricultura

Para proponer una tecnología para el manejo del recurso agua en la agricultura se realizó una revisión de las políticas, estrategias, metodologías, guías, etc., que han sido publicadas y recomendadas por diferentes autores como son: Carretero (1968), Guía técnica para problemas de riego según el Instituto Nacional de Técnicos Agropecuarios de Argentina (INTA); Martínez-Austria (1997), Tecnología para un uso eficiente del agua en riego; Holzapfel (2002), Tecnologías de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable; Petersen *et al* (2003), Metodología para un

enfoque agroecológico y promoción de la seguridad hídrica en zonas semiáridas y Castellanos (2003), Tecnología para el mejoramiento de la humedad del suelo con agricultura de conservación.

Haciendo una valoración de las diferentes propuestas encontradas se aprecia que la guía propuesta por Carretero (1968). Con ser la más antigua hace un análisis más amplio dentro de la gestión del agua reuniendo aspectos del balance hídrico desde la relación Suelo - Agua - Planta, teniendo en cuenta la calidad del agua y su relación con la salinización de los suelos pero no profundiza en aspectos medio ambientales ya que para esa década no se le prestaba la atención que hoy requiere el medio ambiente. Martínez-Austria (1997) en su Tecnología para un uso eficiente del agua en riego ya si propone un modelo de aproximación del balance de la humedad del suelo que recoge la calidad del agua y su efecto sobre el medio ambiente pero desde el punto de vista agronómico, En la década del 2000 Holzapfel (2002), en su propuesta de tecnología de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable, también recoge estos aspectos ambientales aunque la calidad del agua y su efecto en el medio ambiente va más dirigida a la relación con fuentes contaminantes y no profundiza en el balance hídrico de los cultivos. Por otra parte el trabajo de Petersen *et al* (2003), está más dirigido a la captación de agua y la siembra de cultivos según tolerancia a la sequía, y Castellanos (2003), propone una tecnología más específica a la conservación de la humedad del suelo, basándose en los cuatro principios básicos de la Agricultura de Conservación (Mantenimiento de una cobertura permanente del suelo, Minimización de la perturbación mecánica del suelo, control del tránsito en el campo y Rotación de cultivos).

Al analizar todas las propuestas anteriores, se aprecia que ninguna tiene en cuenta el comportamiento del recurso agua en su proceso natural, obviando cual fue la geomorfología que dio su origen y qué procesos están rigiendo su quimismo o sea su estrecha relación con la hidrogeología, aspectos que son muy importante para poder definir una propuesta más acertada en la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.

El Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI) realizó una evaluación exhaustiva que sitúa la gestión del agua en la agricultura dentro de un contexto político, ecológico y social, y evalúa los principales impulsores del cambio. Aborda explícitamente temas como el uso múltiple, la retroalimentación y las interacciones dinámicas entre el agua para sistemas de producción, apoyo a los medios de subsistencia y el medio ambiente. Examina las iniciativas en pro del aprovechamiento de los recursos hídricos en el pasado y el presente, desde la perspectiva de sus

costos, beneficios e impactos, tanto para la sociedad (desarrollo rural y económico, mayor seguridad alimentaria, desarrollo agrícola, salud y pobreza), como para el medio ambiente (conservación y degradación de los ecosistemas y la agricultura). (Earthscan, 2007).

El IWMI propuso comenzar con acciones que tributan a temas que no habían sido abordados en profundidad en otras evaluaciones en este campo como son: MEA (2005), La agricultura como factor clave en el cambio de los ecosistemas; UN-Water (2006), El Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos y Watson *et al* (2004), La Evaluación Internacional de las Ciencias y Tecnología de la Agricultura.

Al analizar las políticas propuestas por el IWMI se aprecia su gran valor para la gestión del recurso agua, ya que parten de la transformación de la forma de pensar y la resistencia al cambio es un gran obstáculo en la agricultura de hoy en día y van dirigidas a una armonización de las demandas con las potencialidades locales, haciéndose énfasis en la obtención de rendimientos adecuados mediante el uso de buenas prácticas agrícolas que vayan a la par con las leyes naturales del medio ambiente, pero no aborda el uso de alguna herramientas utilizada en la Hidrogeología para determinar la calidad del agua, su influencia para uso agrícola y su relación con la conservación del recurso suelo.

Sánchez (2007), aborda la producción de cultivos con énfasis en el manejo ecológico del agua de riego con una visión del agua como elemento esencial para el desarrollo agrícola sostenible; su aprovechamiento, utilización y conservación racionales constituyen elementos en cualquier estrategia de desarrollo y el suelo como un factor que debe ser tomado en cuenta en segunda instancia en todo programa de riego, especialmente, en cuanto a sus características físico-químicas iniciales. Teniendo en cuenta el clima relacionado con el uso y manejo del agua de riego, principalmente, en cuanto a la temperatura, precipitación, evaporación, etc. Y el cultivo, como objetivo final de toda actividad agrícola deberá estar en función directa de los tres factores antes mencionados, básicamente enfocados desde el punto de vista de la tolerancia relativa a la salinidad y sequía. Esta tecnología propuesta por Sánchez (2007), aunque en ella no se utiliza ninguna de las herramientas utilizadas en la Hidrogeología sí tiene una visión más amplia de los elementos que componen el agroecosistema.

## – Metodologías más usadas en la clasificación de la calidad del agua para riego

Al analizar metodologías que evalúan criterios sobre la clasificación de la calidad del agua con fines agrícolas se puede constatar la existencia a nivel mundial de seis propuestas más utilizadas como son el caso de las recomendados por el Laboratorio de Salinidad USA (De Miguel, 2008), Wilcox (Wilcox, 1967), Coeficiente de Irrigación (De Miguel, 2000), Universidad de California (De Miguel, 2008), Aceves y Palacios (Aceves *et al.*, 1970), y FAO (Ayers *et al.* 1987).

Estas clasificaciones evalúan fundamentalmente en cuanto a criterios de contenido de sales solubles, efecto probable del Na<sup>+</sup> sobre las características físicas del suelo y contenido de elementos tóxicos para las plantas. Siendo la de Aceves y Palacios la más abarcadora ya que en ella se ve reflejada la relación Suelo–Agua–Planta tomando en cuenta un mayor número de fenómenos físicos y químicos que pueden ocurrir. (Ver anexo 1)

Estas clasificaciones en su esencia ven el efecto sobre los recursos suelo y agua más bien desde un punto de vista Físico -Químico sin prestar una mayor atención a efectos más colaterales sobre el medio ambiente, por lo que no se analiza lo suficiente sus comportamientos, orígenes y procesos formativos-evolutivos, dando lugar a que se obtienen otros indicadores utilizados en la hidrogeología que también evalúan otros efecto sobre el medio y no son tenidos en cuenta por los agricultores como son la Contaminación Salina (CS) y el Índice de Salinidad Marina (ISM) para tener una visión más amplia de la relación Suelo - Agua – Planta – Medio ambiente .

Al revisar investigaciones vinculadas a la calidad del agua en la agricultura se puede apreciar que se analizan algunos de los parámetros establecidos pero no se trabaja con un enfoque más completo para deducir una calidad ambiental del agua más acertada, por citar algunos ejemplos: De Almeida (2006), en Valencia, España, realiza un estudio de la calidad del agua para riego en un huerto de cítricos y solo se evalúa (Rango de Adsorción de Sodio (RAS), Conductividad Eléctrica (CE), Carbonato de Sodio Residual (CSR), Toxicidad por Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, Porcentaje de Hidronio (pH)), aportando resultado más bien desde el punto de vista del rendimiento y no ambiental, en Argentina Ruda, (2005). Para la evaluación calidad del agua subterránea con fines de riego suplementario solo evalúa CE, RAS y pH, también en este país, Vázquez (2006), para la sustentabilidad del riego complementario solo determina: pH, CE, cationes (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) y aniones (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) donde tampoco se aprecia un enfoque medioambientalista.

En varias búsquedas realizadas no se ha encontrado ningún trabajo que relacione herramientas utilizadas en la Hidrogeología para determinar la calidad de las aguas en los procesos agrícolas sobre todo el Índice de Salinidad Marina (ISM) y la Contaminación Salina (CS) al igual que no se vinculan a los procesos de formación geológica de los territorios. Sin embargo De Miguel, (1994). Plantea que el ISM calculado por la expresión:

$$\text{ISM} = (\% \text{Cl}^- + \% \text{Na}^+) / (\% \text{HCO}_3^- + \% \text{Ca}^{2+}) \quad (1.1)$$

Brinda un resultado que representa el quimismo y grado de contenido de sales de origen marino de las aguas subterráneas, expresados en un coeficiente ya que los  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$  son elementos predominantes en las aguas marinas y el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  son elementos predominantes de acuíferos continentales. De tal forma, este coeficiente corresponde con la determinación de factores que influyen en la salinidad de suelos agrícolas existentes en territorios formados por rocas y sedimentos de origen marino y marino - aluvial en los cuales la salinidad de los suelos es predominantemente clórica y sódica.

Al analizar esta propuesta del ISM se puede llegar a conclusiones sobre el grado de salinización de las aguas subterráneas por predominio de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sobre otros elementos. Por lo que este coeficiente permite definir la factibilidad de uso del agua tanto para abasto como para riego y como fuente para lavado de suelos salinizados, todo a través de graduaciones y clasificaciones establecidas para valores del Índice de Salinidad Marina.

De Miguel (1994). También plantea a tener en cuenta la CS, aunque este criterio es más antiguo ya que fue propuesto por Revelle (1941). Donde recomendó la relación  $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$  como un criterio para evaluar la contaminación por sales marinas de las aguas subterráneas, por la siguiente expresión:

$$\text{CS} = (\text{Cl}^-) / (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-), \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l} \quad (1.2)$$

Planteando que el  $\text{Cl}^-$  es el ión dominante del agua del océano y ocurre en pequeñas cantidades en aguas subterráneas y el  $\text{HCO}_3^-$  es corrientemente el ión negativo más abundante en el agua subterránea ocurriendo en mínimas cantidades en el agua del mar y aunque otros elementos pueden alterar la relación  $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$  sería muy insignificante como ocurre cuando hay presencia de elementos de origen marino.

Por su parte este otro criterio tampoco se tiene en cuenta para el manejo del agua en zonas agrícolas y, sin embargo, ayuda a corroborar de conjunto con el ISM la presencia de sales de origen marino en la zona de estudio.

Torres (2008). Plantea que la salinidad en los suelos y estratos se reduce prácticamente al  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , entre los cationes, y al  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , entre los aniones. Esta situación concuerda con el origen marítimo de la mayor parte de los sedimentos y rocas que conforman la cuenca del río San José donde la dominancia relativa de  $\text{Na}^+$  se encuentra asociada a alta presencia de  $\text{Cl}^-$ .

#### – Metodología para el pronóstico de la potencialidad de salinización de los suelos por condiciones hidrogeológicas existentes

En la literatura consultada, se encontró una metodología propuesta por De miguel (1997), para determinar la potencialidad de salinización que no es aplicada en las ciencias agronómicas y es de suma importancia para la proyección de las prácticas agrícolas relacionadas con el suelo y el agua, en esta metodología como mínimo se conjugan tres elementos básicos:

- Profundidad de yacencia de las aguas freáticas.
- Quimismo de las aguas freáticas.
- Litología de cubierta y ascensos capilares de la misma.

Con esta información se correlaciona el ISM con la profundidad de yacencia de las aguas freáticas, litología de la zona de aireación y su ascenso capilar. Este último según Skabalanóvich *et al.* (1980), depende directamente de la granulometría de los sedimentos y en específico del diámetro de partículas correspondiente al 10 % del contenido total. (De Miguel, 1997).

El autor realizó una validación de esta metodología en el Valle del Cauto y en específico los territorios de las provincias Holguín y Las Tunas de conjunto con un pronóstico de peligrosidad de desertificación en la provincia basado en los factores de mayor incidencia propuestos por Ayala (1990). Incluyéndose por primera vez a nivel nacional e internacional como factor de incidencia en la salinización de suelos a los ascensos capilares de aguas subterráneas de poca a alta mineralización de composición cloruradas- sódicas a través de la zona no saturada comprobándose la existencia de sedimentos depositados durante la formación del territorio de origen marino y marino (De Miguel, 2000).

## 1.2 Influencia de procesos hidrogeológicos en la calidad de los suelos y su relación con la gestión del agua en la agricultura

Cada día se hace más evidente que para la gestión de los recursos naturales no se pueden obviar los procesos con los que se interrelacionan dentro de los ecosistemas por lo que para realizar cualquier propuesta de gestión del recurso agua en la agricultura hay que partir de su naturaleza y los procesos que tienen que ver con su comportamiento, por lo que a continuación se presenta una revisión acerca de estos aspectos.

De Miguel (2008). Plantea que la desertificación en general comienza con la salinización de los suelos debido, la misma ha sido definida como la degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, producto de diversos factores, incluyendo las variaciones climáticas y las actividades humanas.

En muchos países con el amplio desarrollo de la agricultura y sobre todo de la aplicación del riego, tanto en plantaciones estatales como particulares, podemos detectar que la aplicación del riego se ejecuta sin la debida fundamentación sobre la posibilidad de ejecutar el riego o no y si se requiere drenaje o no y que tipo de drenaje, por lo que en muchas ocasiones se contribuye con la salinización de los suelos agrícolas, hasta tal grado que los mismos sean aptos sólo para determinados cultivos o en general dejen de ser productivos. En varios territorios aunque no se ejecuta el riego, existen condiciones para la salinización de los suelos, principalmente por las características de la zona no saturada (litología que la forma) y la compactación de suelos y estratos subyacentes debido al cotidiano transitar de equipos agrícolas que de año en año resultan mas pesados al incrementarse sus dimensiones buscando tecnologías mas productivas. (De Miguel, 2008).

Dadas las condiciones geológicas de muchos países (incluyendo Cuba) y distribución de sus principales y mejores suelos agrícolas, que a la vez coinciden con territorios formados por sedimentos y rocas de origen marino del Mioceno (N1) y Cuaternario (Q), representados por calizas arcillosas, margas, arcillas arenosas, arcillas y otros sedimentos, en los cuales por su génesis de formación en gran parte de ellos, aún en la actualidad, existen sales de origen marino, tanto en los acuíferos como en la zona no saturada. En estos sedimento que se forman en lo que fuera mar, quedan depositadas sales minerales marinas que en el proceso de litificación se van transformando quedando en la matriz de las rocas y sedimentos que se forman finalmente,

prolongándose durante cientos de miles y millones de años y en dependencia del lavado del territorio (en función de la permeabilidad de los sedimentos formados), la permanencia de estas sales puede ser también de cientos de miles y millones de años, estos sedimentos de origen marino incluyendo las arcillas generan sales por evaporación del agua de mar, los que se denominan minerales o sales evaporíticas por lo que dentro del contexto de protección al "Medio Ambiente" es necesario diagnosticar la factibilidad o potencialidad de salinización de los suelos, para la toma de medidas que impidan la salinización de los mismos y prever las consecuencias que pueden producir la aplicación del riego de una forma indiscriminada, es decir, sin una debida argumentación técnica, fundamentada en las condiciones hidrogeológicas. (De Miguel, 2008).

Aquí se ha presentado un criterio acerca del origen de la desertificación debido a la salinización que pueda estar dada por la aplicación del riego sin fundamentar su posibilidad de ejecución fundamentación sobre la posibilidad de ejecutar el riego o drenaje , además de abordar sobre la existencia de condiciones para la salinización de los suelos, principalmente por las características de la zona no saturada valorándose como dentro de la propia formación del suelo ocurre una migración tanto de aguas descendentes como ascendentes provocando la acumulación de precipitados salinos haciéndose énfasis en zonas similares a la del estudio, abordando aspectos que no son tratados en la mayoría las literaturas relacionadas con temas agrícolas y en algunos casos se hace muy superficialmente aun cuando es de gran necesidad tenerlos en cuenta para la gestión adecuada del recurso agua si se pretende cuidar el medio ambiente, aspectos que dan al traste con las condiciones hidrogeológicas del zona de estudio para la cual se propone la nueva tecnología para el manejo ambiental del recurso agua , dejando clara la necesidad de tomar medidas que impidan la salinización de los suelos y prever las consecuencias que pueden producir la aplicación del riego de una forma indiscriminada, es decir, sin una debida argumentación técnica, fundamentada en las condiciones hidrogeológicas, siendo estas cuestiones algunas de las que se pretenden desarrollar con la nueva propuesta.

### 1.3 Naturaleza geológica y clima de Cuba

La naturaleza geológica indica que la forma actual de Cuba y su plataforma insular es un hecho geográfico extremadamente joven, pues los contornos del archipiélago se han delimitado en los últimos 600 000 años. Este proceso comenzó hace unos 30 millones de años, cuando la tendencia

general de la evolución tectónica del territorio de Cuba ha sido al ascenso e incremento de su área, en particular desde el Mioceno medio a superior. Por esto se considera que el factor principal de la formación del relieve de la isla, tanto en zonas terrestres como marinas, son el movimiento del terreno. En este marco las oscilaciones glacioeustáticas del nivel del mar han modulado la velocidad con que tiene lugar la ampliación o reducción de las tierras emergidas y extensión de la plataforma insular, aunque su papel en los últimos 120 000 años ha sido un tanto más destacado. Presentando una geología bastante compleja donde en la llanura del Sur aparecen rocas carbonatadas del mioceno, separados ambos complejos por sedimentos cuaternarios holocénicos con presencia de rocas sedimentarias conteniendo abundantes restos de invertebrados marinos depositadas en los últimos 1,8 millones de años. (Iturralde- Vinent et al, 2006).

La configuración alargada y estrecha de la isla de Cuba le confiere determinadas peculiaridades en la disposición de su red fluvial, con longitud de los ríos y el área de sus cuencas en el 85 % de los casos es inferior a 40 km y 200 km<sup>2</sup>, respectivamente. Y recursos hídricos potenciales de 38,1 km<sup>3</sup> de ellos los aprovechables están evaluados en unos 24 km<sup>3</sup> anuales, correspondiendo el 75 % a las aguas superficiales y el restante 25 % a las aguas subterráneas. La distribución por usuarios está representada en aproximadamente un 63 % por la agricultura, 9 % en la industria, 25 % por la población y 3 % para otros usos (INRH, 2001).

Por su parte, en el clima de Cuba el elemento de mayor variabilidad es la precipitación. Con una media anual acumulada de 1 335 mm, predominando dos períodos estacionales, el lluvioso (de mayo a octubre) donde se registra aproximadamente el 80 % del total anual, y el poco lluvioso (de noviembre a abril) con el 20 % restante. (INRH, 2001).

La evaporación potencial es elevada, con un valor promedio de 1 600 mm. Los valores máximos, hasta 2 100 mm anuales, se registran en el Valle del río Cauto y en la costa sur de Guantánamo. Las magnitudes más bajas se registran en el Pico Real del Turquino, Santiago de Cuba, alcanzando alrededor de 800 mm anuales. (INRH, 2001).

Por otro lado, en la provincia Holguín se reportan entre 985 y 1000 mm de precipitación donde es importante destacar que se están registrando valores históricos de evaporación de 2185 mm. Lo que confirma el comportamiento negativo del balance lluvia/evaporación. (INRH, 2001).

## 1.4 Características generales de las formaciones arcillosas de origen marino y geomorfología estructural de la Cuenca del Cauto

Por la formación hidrogeológica de la cuenca del cauto y en especial la zona de estudio es de mucho interés el conocimiento de las principales características generales de las formaciones arcillosas de origen marino, ya que si se pretende manejar el recurso agua en áreas donde las mismas están presentes, es necesario conocer acerca de estas para deducir como pueden influir en el estado y calidad del agua dentro del ecosistema y su relación con los procesos agrícolas.

En la composición de las rocas y sedimentos arcillosos, predominan las fracciones menores de 0.01 mm. Compuestas por Hidro-aluminos y Ferrosilicatos, Caolinita, Hidromica, minerales del grupo de la montmorillonita y otros. Además de estos minerales, la llamada sustancia arcillosa la componen también, el Cuarzo, Moscovita, Biotita, Opal Hidróxido de hierro, Glauconita, distintos Carbonatos y materia orgánica. Las arcillas y formaciones arcillosas, además de su composición descrita, pueden presentar la presencia de sales minerales que dependerán de la génesis de su formación, es decir, el ambiente de sedimentación terrígeno o marino. (De Miguel, 1997).

En el caso que nos interesa (sedimentación en ambiente marino), al quedar las arcillas fuera de este ambiente se evapora el agua de mar y las sales presentes en esas aguas se precipitan formando depósitos sedimentarios llamados Evaporitas, en este proceso en la constitución de las arcillas quedan presentes sales marinas como la Halita ( $\text{ClNa}$ , sal común con 39 % de  $\text{Na}^+$  y 61 % de  $\text{Cl}^-$ ), Silvinita ( $\text{K Cl}$ , con 52 % de  $\text{K}^+$  y 48 % de  $\text{Cl}^-$ ), Mirabilita ( $\text{Na SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Soda ( $\text{Na}_2 \text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), Yeso ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2 \text{O}$ ) y otras. Estas sales presentan distinto grado de solubilidad en agua y en distinto grado son higroscópicas (en estado seco absorben humedad y en estado húmedo desprenden humedad) y la presencia de estas sales marinas en condiciones continentales (terrígenas) podrá prolongarse durante periodos geológicos completos (De Miguel, 1997).

Desde el punto de vista hidrogeológico las formaciones arcillosas no representan un impermeable absoluto, ya que gracias a los procesos de difusión, ósmosis y gravitación, las arcillas participan en el intercambio hídrico y salino con las aguas que por ellas fluyen o con las que contactan, incluso con las superficiales, de tal forma, las aguas de los sedimentos arcillosos influyen en la formación salina y composición química de las aguas freáticas y superficiales, así como en la zona de aireación en periodos de saturación, llegando esta influencia hasta la superficie debido a las propiedades de capilaridad y ascensos capilares de los sedimentos arcillosos, y el carácter de intercambio y

desarrollo del mismo dependerá de los procesos que dentro del ambiente hidrogeológico se desarrollen. (De Miguel, 1997).

Generalmente los suelos agrícolas se encuentran en territorios formados por rocas y sedimentos arcillosos de épocas geológicas jóvenes y en las condiciones de Islas y gran parte de continentes, por lo general, estas rocas y sedimentos son de origen marino y marino-aluvial y pueden tener gran influencia en la salinidad y desertización de los suelos, bien sea debido a factores antrópicos (riego, tala de bosques, etc. ) y naturales (intercambio hídrico y salino subterráneo-superficial, cambio del clima, fenómenos geo-tectónicos, etc. ). (De Miguel, 1997).

Durante la aplicación del riego en suelos y sobre subsuelos arcillosos con sales en su constitución, y condiciones hidrogeológicas que favorecen la salinización de los suelos, esta demostrada la presencia de tres etapas del régimen de las aguas freáticas, cuya duración será en dependencia de los ciclos e intensidad del riego o anegamiento natural del territorio. (De Miguel, 1997).

– 1ra Etapa- Al iniciarse el riego aumenta el contenido de sales en las aguas freáticas a la vez que ascienden los niveles.

– 2da Etapa- De la zona de aireación son lavadas las sales de fácil solubilidad por aguas de riego a la vez que se mantiene el ascenso de los niveles.

– 3ra Etapa- Ocurre la concentración de sales en la zona de aireación y aguas freáticas propiciado por el ascenso de los niveles de las aguas y ascensos capilares y cuando los niveles se aproximan a menos de 3 m. de la superficie del terreno la concentración de sales se acelera bajo la influencia de la evaporación.

Cuando se presenta la 3ra etapa, solo es posible evitar la salinización del suelo mediante la aplicación de drenaje artificial, después de lo cual puede aparecer una relativa estabilización del régimen hidroquímico de las aguas freáticas y suelo, lo cual representaría una 4ta Etapa del régimen de las aguas freáticas en condiciones de riego. La aparición de esta 4ta etapa puede demorar varios años (hasta más de 5), posterior al inicio del drenaje artificial. (De Miguel, 1997).

Cada una de las etapas mencionadas puede prolongarse durante varios años en dependencia de la intensidad y frecuencia del riego, de la litología y contenido de sales en la zona de aireación y acuífero. En la práctica agrícola, si desde el inicio del riego no se cuenta con los sistemas de drenaje requeridos, al detectarse la 1ra Etapa deben ser construidos los mismos, ya que de mantenerse el desarrollo de esta etapa, con la correspondiente influencia sobre el acuífero y suelos, se desarrollan

procesos que para detenerlos o eliminarlos se requieren de inversiones muy costosas y en muchas ocasiones estos procesos de salinización son irreversibles. (De Miguel, 1997).

Etapas similares se presentan en territorios arcillosos llanos, donde ocurren inundaciones prolongadas debido a las lluvias, con lo cual se satura totalmente la zona de aireación y se simplifican los procesos que intervienen en el intercambio hídrico y salino subterráneo-superficial, a la vez que los procesos de evaporación (durante las inundaciones y posterior a ellas) aceleran la deposición de las sales en el suelo. (De Miguel, 1997).

En párrafos anteriores se describe como en los sedimentos de origen marino incluyendo las arcillas pueden generarse sales por evaporación del agua de mar y se valora como mediante los procesos de difusión, ósmosis y gravitación, las arcillas participan en el intercambio hídrico y salino con las aguas que por ellas fluyen o con las que contactan, incluso con las superficiales, haciéndose énfasis en la gran importancia de conocer la factibilidad o potencialidad de salinización de los suelos, posibilidades de riego, necesidad de drenaje y las características con que el mismo puede aplicarse.

#### – Sinopsis geomorfológica estructural de la Cuenca del Cauto

Por todo lo antes planteado se hace necesario profundizar más en la geomorfología de la zona de estudio por lo que a continuación se presenta la sinopsis geomorfológica estructural de la Cuenca del Cauto, ya que en ella es donde se encuentra enclavada la zona agrícola para la que se propone la tecnología para la gestión ambiental del recurso agua.

La cuenca del cauto Constituye la tercera megamorfoestructura general de Cuba Sudoriental, en la cual transcurrieron los descensos neotectónicos más intensos del archipiélago cubano. En realidad, esta es una zona marginal transitoria de tipo isostático de compensación, entre las regiones de los arcos insulares septentrional y meridional de Cuba Oriental. (Lilienberg *et al* 1993).

Durante el Oligoceno-Mioceno en esta paleodepresión se depositaron grandes espesores de sedimentos carbonatados y terrígenos-marinos. Según los datos de perforación, Nagy *et al*, (1976) y Franco, (1986). Distinguieron tres depresiones: Guacanayabo (1 750 m), Cacocum (1 300 m) y Nipe (900 m), divididas por los ascensos de Babiney-Mir y Barajagua-Marcané.

En la etapa neotectónica tardía fue de gran importancia la activación de algunas fallas regionales y zonas de fallas transregionales de dirección Suroeste-Noreste. Las grandes zonas de morfoalineamientos transverso-diagonales, que dividen el macrobloque montañoso de la Sierra

Maestra en mesobloques, atraviesan la morfoestructura longitudinal-sublatitudinal original de la depresión y la fraccionan en un mosaico de mesounidades transverso-diagonales (Hernández *et al*, 1986).

En la depresión-graben del Cauto predominan amplias llanuras bloque-monoclinales escalonadas, en las cuales, en ocasiones aflora el basamento plegado y cuerpos intrusivos. En la región de Jiguaní, se refleja claramente la continuación de las morfoestructuras montañosas por medio del sistema de fallas, que determina un claro escalonamiento de las llanuras hacia el Noreste y en Bayamo, hacia el Noroeste. En el relieve de la llanura se destacan el horst lineal El Yarey y una morfoestructura circular, relacionados con el desarrollo de intrusiones basálticas. (Hernández *et al*, 1989).

En la parte occidental de la depresión-graben están ampliamente desarrolladas las llanuras monoclinales planas, con alto desarrollo de meandrización. Según Lilienberg *et al*, (1993) En el Pleistoceno Tardío, la depresión experimentó, en esta región, una inversión del régimen tectónico; los descensos fueron sustituidos por ascensos en la zona de intersección de la morfoestructura local, lo que produjo un profundo cortamiento del cauce del Río Cauto. Makarov, (1986).

En el Este, las altas llanuras bloque-monoclinales Remanganaguas-Buenaventura constituyen una zona de tránsito hacia la depresión Central. Esas grandes morfoestructuras son cortadas por valles tectónico-estructurales como el del Río Contramaestre y más al Este por sectores deprimidos de graben como San Luis-Dos Caminos. (Lilienberg *et al*, 1993).

Al Norte de estas llanuras, el relieve se caracteriza por el diseño paralelo de la red fluvial de los ríos Cauto y Salado y también en el caso de La Rioja. Las formas fluviales pequeñas y de cárcavas, en esta región, son paralelas; los elementos de disección erosiva, en conjunto, cortaron las zonas lineales de formación de grietas recientes. Esto, permitió al autor destacar una nueva zona sublatitudinal-longitudinal de alineamientos morfoestructurales, confirmada también con los datos geofísicos de (Bush *et al*, 1986).

En el flanco Norte en los valles fluviales están desarrolladas unas terrazas bajas escalonadas; mientras que en el flanco meridional de los valles predominan terrazas erosivas altas El extremo más oriental de la cuenca hidrográfica del Cauto, ocupa las llanuras altas de la Depresión Central (H=200-220, 260-280 m), siendo en el contexto geólogo-geomorfológico de Cuba Oriental una de las depresiones más antiguas. (Hernández *et al*. 1989).

Está ocupada por conglomerados, areniscas y arenas arcillosas de las formaciones molásicas del Eoceno Tardío. En la etapa neotectónica, la depresión experimentó ascensos débiles y la falla "Oriente" la separó de la depresión Cauto-Nipe. Las llanuras del fondo de la depresión representan una formación de zócalo y no existen huellas de acumulación plioceno-cuaternaria significativa. Morfológicamente, esta depresión no es un hundimiento intermontañoso típico, sino la depresión de la zona de ascensos (Makarov, 1987).

Esta sinopsis geomorfológica estructural de la Cuenca del Cauto confirma que la zona de estudio está formada sobre una depresión con presencia de sedimentos salinos o con capacidad para la formación de sales, ya que la misma pertenece a la depresión Cacocum, coincidiendo con la naturaleza geológica de la forma actual de Cuba descrita por Iturralde- Vinent et al, (2006), en el presente capítulo.

### **1.5 Factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas**

No solo las arcillas son las que se deben tener en cuenta para el manejo del agua, sino que hay que valorarlas de conjunto con los factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas ya que durante el manejo de los recursos hídricos en la agricultura, estas tendrán interacción con las superficiales, además de que en dependencia de la granulometría de las arcillas será el ascenso capilar pudiendo llegar hasta zonas de exploración de las raíces.

#### **– Factores naturales**

Los principales factores naturales que dan formación de la composición química de las aguas subterráneas están representados por las condiciones físico-geográficas, geológicas, hidrogeológicas y biológicas presentes en distintos territorios. Una de las principales condiciones de formación de la composición química de las aguas subterráneas lo representa el clima. La cantidad, composición y régimen de las precipitaciones atmosféricas en el transcurso del año, influye directamente en la composición química, no solo de las aguas freáticas que son las primeras que se encuentran a partir de la superficie del terreno, sino también en horizontes acuíferos de yacencia más profunda; la parte de las precipitaciones atmosféricas que participa en la alimentación o reposición de las aguas subterráneas depende directamente de la litología de las rocas de cubierta

(zona no saturada y suelo), de la temperatura ambiental y magnitud de la evaporación. (De Miguel, 2008).

En la zona no saturada y corteza de intemperismo la interacción del agua infiltrada con las rocas provoca reacciones químicas; el resultado de las mismas es arrastrado hasta las aguas subterráneas. La velocidad de infiltración del agua en las rocas de la zona no saturada y zona de saturación influye sobre la composición y concentración de los componentes diluidos en el agua y los cambios químicos de las rocas durante su intemperismo (De Miguel, 2008).

La influencia de los factores hidrológicos sobre las aguas subterráneas depende de las características de las redes hidrográficas; la presencia de una red hidrográfica densa y de cortes profundos, facilita el drenaje de los horizontes acuíferos freáticos y en muchos casos de acuíferos artesianos. Las aguas subterráneas y superficiales forman de relación hidráulica que en algunos casos puede ser directo, en otros más complejo, en dependencia de la litología de las rocas acuíferas y rocas de los taludes y cauces de los ríos; la ruptura del equilibrio existente en este sistema en una de sus partes se refleja en el estado de la otra. (De Miguel, 2008).

La relación entre el relieve por una parte y los niveles piezométricos de las aguas subterráneas, así como su composición química influye la composición química de las aguas subterráneas. En los valles de ríos y zonas aledañas a los mismos y en otras formas negativas del terreno las presiones hidrodinámicas aumentan desde los horizontes superiores hasta los inferiores. Dentro de los límites de los valles las aguas subterráneas tienen, generalmente, una mineralización alta y son del tipo sulfatado-bicarbonatadas magnésico – cálcicas; además en las grandes zonas de drenaje de las aguas artesianas a menudo se forman anomalías hidroquímicas, es decir, bajo los valles de los ríos se forman “cúpulas” de aguas salobres hasta rasoles del tipo clóricas sódicas. (De Miguel, 2008).

En un gran número de territorios se ha demostrado que el papel principal en la composición química de las aguas subterráneas lo representan factores tectónicos, que provocan cambios estructurales en planta, acompañados con el cambio de la base de erosión y desplazamiento de las bases de los ríos. La estructura geológica, condiciones de yacencia, origen, composición mineralógica y las materias orgánicas de las rocas ejercen una influencia en la formación de la composición química de las aguas subterráneas. Uno de los principales factores de formación de la composición química de las aguas subterráneas lo es el régimen dinámico de los horizontes acuíferos, interrelación de los mismos y relación con las aguas superficiales. La composición mineralógica de las rocas acuíferas representa ser otro factor de importancia primordial en la composición química de las aguas

subterráneas, influencia que depende de las condiciones de intercambio hídrico y de la termodinámica. (De Miguel, 2008).

La intensidad del intercambio hídrico en la corteza de intemperismo representa uno de los factores principales de los cambios químicos de las rocas y de las soluciones hídricas que se forman. Las altas velocidades de filtración de las aguas y un drenaje intensivo propician un breve contacto de las soluciones con las rocas, y por ello la concentración de elementos solubles será pequeña. Durante un régimen hidrodinámico dificultoso en la zona de intemperismo se forman soluciones hídricas con alto contenido de elementos solubles. La acción de factores biológicos se expresa en el cambio de la composición de las aguas bajo la acción de las bacterias y productos de la transformación de la materia orgánica; esta en mayor o menor cantidad está presente en todas las rocas sedimentarias. (De Miguel, 2008).

Los ácidos orgánicos aceleran el proceso de destrucción de las rocas. El ácido carbónico formado como resultado de la oxidación de la materia orgánica se disuelve en las aguas subterráneas, se incorpora a la reacción con componentes mineralógicos de las rocas y representa ser uno de los agentes más agresivos en las disoluciones de las mismas. (De Miguel, 2008).

La evaluación de la forma de migración de los elementos tiene gran significado durante el estudio del equilibrio entre las aguas subterráneas y las rocas; la utilización en los cálculos de concentración de elementos determinados de forma analítica conduce a evaluaciones incorrectas del estado de este equilibrio; esto está fundamentado por la presencia en las aguas subterráneas de elementos que no se encuentran solamente en forma de iones simples, sino también formando combinaciones complejas. Otro factor natural que influye en gran medida en el cambio de la composición química de las aguas subterráneas y también de los suelos está representado por los procesos eólicos, sobre todo en zonas costeras; estos procesos están motivados por la transportación de sales del agua de mar, por el aire, penetrando en tierra firme en ocasiones hasta varias decenas de kilómetros. (De Miguel, 2008).

Las sales transportadas por el agua son depositadas en los suelos de territorios costeros y durante los períodos de lluvia son disueltas e infiltradas junto con las aguas hasta los acuíferos, provocando procesos y reacciones a su paso a través de la zona no saturada que alteran el normal desarrollo de los mismos, intensificando la acumulación de sales en los acuíferos, y con ello influyen en la variación de la composición química de las aguas subterráneas. En general, estos procesos están poco estudiados, a pesar de que existen condiciones muy favorables al desarrollo de los mismos y

que pueden influir mucho en la salinización de acuíferos y suelos agrícolas, conjuntamente con la despoblación forestal de los territorios costeros. (De Miguel, 2008).

La presencia de la acción de los factores antes relacionados no es constante, ellos están sujetos a cambios dinámicos en el tiempo y espacio, propiciados por condiciones físico-geográficas y por el desarrollo de la historia geológica (Paleohidrogeología). Por ello es necesario analizar y considerar sus cambios no solo en los límites del territorio de estudio, sino también en los alrededores o en territorios más alejados, los cuales en las etapas iniciales de la historia geológica pudieron ser zonas de alimentación o drenaje de las aguas subterráneas. Un estudio detallado de las condiciones naturales en su desarrollo histórico, posibilita la definición de las causas que dieron origen a la formación de las aguas subterráneas y su composición química dentro de los límites del territorio de estudio. (De Miguel, 2008).

#### – Factores artificiales

Las acciones artificiales sobre la naturaleza están relacionadas con el desarrollo de la humanidad. La cubierta vegetal fue el primer componente de la naturaleza que recibió la influencia del hombre. Los bosques fueron destruidos desde los tiempos más remotos de formación de la sociedad humana. Las consecuencias más notables fueron los cambios en la atmósfera, con un calentamiento del clima y contaminación de la misma. La alteración de algunos factores naturales tiene tanto carácter regional como local, en la actualidad también continental. (De Miguel, 2008).

Las redes hidrográficas se transformaron con la aparición de embalses, canales, derivadoras, rectificaciones de ríos, etc. Algunos ríos, lagos, pantanos y otras depresiones naturales del relieve se utilizan para el vertimiento de aguas residuales y otros desechos contaminantes. La red artificial creada para el tránsito de agua superficiales para el desarrollo agrícola se crea en territorios de humedad insuficiente; esto, paralelo a las medidas de mejoramiento, es acompañado de cambios significativos de las condiciones de alimentación o drenaje de las aguas subterráneas freáticas y provoca cambios radicales en su composición química y física. Los cambios de la red hidrográfica conllevan al rompimiento de las condiciones naturales de escurrimiento de las aguas superficiales. (De Miguel, 2008).

Existen otros factores de gran desarrollo en las últimas décadas; los mismos están relacionados con la explotación de yacimientos minerales, en muchos casos por método denominado a "cielo abierto", lo cual ha provocado una impetuosa denudación y erosión principalmente en zonas montañosas,

provocando el arrastre de gran cantidad de sedimentos arcillosos y coloidales por escurrimientos superficiales de los ríos y por escurrimiento de las precipitaciones atmosférica. La alteración de los procesos naturales de traslado de las materias sólidas y diluidas pueden provocar cambios sustanciales de las condiciones naturales en las aguas subterráneas, sobre todo esto se relaciona con el vertimiento de productos líquidos o diluidos, los que pueden producir una contaminación en magnitudes considerables; en esto último juega también un papel importante el amplio desarrollo industrial y poblacional actual y el desarrollo de nuevas técnicas agrícolas, en las que de forma intensiva se utilizan fertilizantes y otros productos químicos que favorecen la contaminación en las aguas subterráneas y sobre todo de las aguas freáticas. (De Miguel, 2008).

Al abordar sobre los factores naturales y artificiales de la formación de la composición química de las aguas subterráneas se muestra como la intensidad del intercambio hídrico representa el factor principal de formación de la composición química de las aguas subterráneas y de las rocas atendiendo a su cantidad, composición y régimen precipitaciones y magnitud de la evaporación, explicando la influencia del relieve del terreno y su relación con las presiones hidrodinámicas que aumentan desde los horizontes superiores hasta los inferiores. Además, se aborda cómo la composición mineralógica y las materias orgánicas de las rocas ejercen su influencia, prestando atención al origen hidrogeológico de las zonas de estudio para analizar y considerar sus cambios no solo en los límites del territorio de estudio, sino también en los alrededores o en territorios más alejado, también queda claro que el hombre es el que más ha repercutido en la alteración artificial de la composición química del agua y en la actualidad las propuestas descritas sobre el manejo del agua en la agricultura no profundizan lo suficiente y las literaturas que abordan temáticas de la hidrogeología no prestan atención temas agrícola, lo que hace evidente el vínculo de las ciencias en una propuesta para el manejo ambiental de los recursos hídricos en la agricultura.

## 1.6 Conclusiones del Capítulo

Al revisar literaturas sobre temas relacionados con el recurso agua para fines agrícolas, como son el origen de las aguas, suelos predominantes, formación hidrogeológica, así como tecnologías para su gestión, se arriba a las siguientes conclusiones:

– Las diferentes políticas, estrategias, metodologías, guías, etc., para la gestión del agua en la agricultura que han sido analizadas no utilizan herramientas de la Hidrogeología que caracterizan

el quimismo de las aguas como el ISM y la CS, lo que muestra la falta de un vínculo teórico entre las Ciencias Agronómicas e Hidrogeológicas, por lo que se observa un vacío en la literatura científica en esta temática mostrando la necesidad de proponer una tecnología científicamente justificada donde las teorías de estas ciencias se compenetren en la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.

– Las diferentes políticas, estrategias, metodologías, guías, etc., a pesar de no poseer un vinculación más amplia en las mismas se abordan temáticas independientes que son claves en el proceso de gestión del agua lo que hace que varios de los elementos incluidos en ellas hayan sido tomados en cuenta para la elaboración de la tecnología propuesta.

– Atendiendo a la naturaleza geológica de Cuba y en especial a su sinopsis geomorfológica se hace evidente que la Cuenca del Cauto y en especial la localidad de Antonio Maceo del municipio Cacocum, Holguín, se encuentran formados sobre rocas de origen marino, lo que provoca un alto contenido de sales en sus aguas interiores, esta situación natural se agudiza en esta zona por una deficiente gestión del recurso agua con fines agrícolas, debido al desconocimiento de tecnologías más adecuadas a la zona acompañado de un comportamiento desfavorable del clima y los propios procesos de formación. todo lo anterior indica la necesidad de realizar un manejo diferenciado del agua en esta zona dado la fragilidad de este ecosistema.

## 2. TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS CON ELEVADA TENDENCIA A LA SALINIDAD

En el presente capítulo se pretende abordar un modelo teórico para la gestión ambiental del recurso agua a partir del cual se pueda proponer una metodología con la ejecución de estudios de las condiciones hidrogeológicas existentes de la Cuenca del Río Cauto que permita un adecuado proceso de gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas, mediante las herramientas teórico – metodológicas necesarias para el desarrollo de la misma.

### 2.1 Fundamentación teórica de la solución

Con el propósito de establecer las herramientas teórico – metodológicas necesarias para elaborar los fundamentos científico – técnicos pertinentes, para expresar un criterio de valor en relación a las condiciones hidrogeológicas y cognoscitivas existentes en la localidad de “Antonio Maceo” así como ofrecer las posibles soluciones que permitan dar respuesta a esta problemática, es pertinente realizar el análisis teórico – metodológico del objeto de estudio.

La generalidad de la bibliografía consultada aborda la problemática de la gestión del recurso agua para uso agrícola relacionada con aspectos puramente agronómicos sin tener un alcance lo suficientemente estructurado para apropiarse de herramientas utilizadas en la Hidrogeología que permiten caracterizar con mayor profundidad el quimismo de las aguas utilizadas los sistemas de producción agrícola así como pronosticar el potencial de salinización por las condiciones hidrogeológicas existentes debido a que estas ciencias se encuentran estrechamente vinculadas ya que el quimismo que el origen de la formación de las rocas ha dado al agua almacenada en ellas se revertirá en un posterior consumo por los cultivos agrícolas, de la misma forma que las propiedades físico-química de los suelos sobre los que se establecerán los cultivos también dependen de ello, tal

es así que no se encontró ningún caso similar en la abundante bibliografía consultada tanto nacional como internacional.

Por lo anteriormente planteado es preciso elaborar una tecnología (modelo y metodología) para dar solución al problema planteado y que permita efectuar el análisis teórico del objeto de estudio desde todas sus perspectivas y sirva de basamento para elaborar la metodología de trabajo, la cual constituye una herramienta práctica viable para conducir las acciones concretas en la solución de la problemática abordada.

Para la elaboración del modelo constituyen fundamentos científico y metodológico la teoría de sistemas mancomunada con el enfoque de procesos, vinculados a la gestión agrícola del agua, la Hidrogeología y el resto de las ciencias involucradas que han sido mencionadas en capítulos anteriores.

## 2.2 Modelo para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas

Partiendo de que las prácticas de riego y drenaje por un lado y las culturales, por otro, son los elementos que pueden ser controlados por el hombre según lo planteado en párrafos anteriores, se propone un modelo (Figura 2.1) en el cual se gestiona el recurso agua desde un punto de vista más amplio donde se involucran los procesos naturales de su origen, y su relación con la formación hidrogeomorfológica del suelo, los cuales determinan su calidad, permitiendo desarrollar tecnologías ambientalmente justificadas para dar un uso más racional de los recursos hídricos según las exigencias de los cultivos atendiendo al comportamiento del clima .

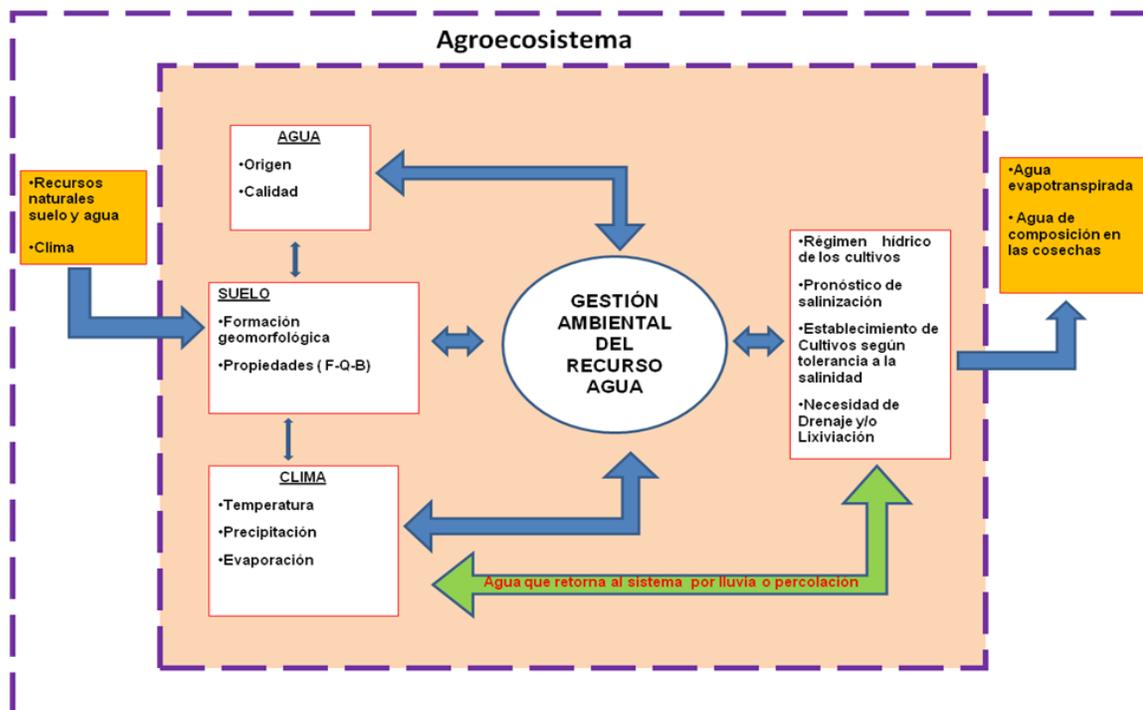


Figura 2.1 Modelo para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas en suelos con tendencia a la salinidad

### – Conceptualización del modelo

En el modelo propuesto se persigue el propósito de gestionar el agua según las condiciones hidrogeológicas existentes, gestión que tendrá como límites el perímetro de las áreas agrícolas de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo”, del municipio Cacocum en la provincia de Holguín, la cual posee como contorno el agroecosistema de la depresión Cacocum perteneciente a la Cuenca del Cauto y que abarca una zona homogénea en cuanto a sus procesos de formación hidrogeológica y dinámica interna, así como su régimen pluvial.

Los componentes principales del modelo son los recursos naturales (agua y suelo), el clima, los procesos esenciales de gestión ambiental de los recursos y las demandas hídricas (cantidad, calidad y oportunidad) de los cultivos a desarrollar como se describe a continuación:

- El agua

Las aguas no pueden ser analizadas enfocando sus leyes y particularidades independientemente de los procesos geológicos que existieron y se producen en los territorios de desarrollo de estas aguas. Este análisis de la hidrogeología es erróneo, pues el agua es un mineral más de composición simple, aunque en gran número de casos contiene una gran variedad de elementos químicos, que se

diferencia de los demás minerales existentes en la naturaleza por sus propiedades de movilidad y reposición debiendo su origen y composición química a procesos de diversos orígenes. (De Miguel, 2008).

- **El suelo**

Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica que forman la cubierta superficial cuya composición química y estructura física del suelo en un lugar dado están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, la cubierta vegetal, la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, la topografía y los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. (Cairo, 1994).

- **El clima**

El clima como conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas está definido por el régimen normal de todos los elementos climatológicos: temperatura, precipitación, evaporación, viento etc. estos regímenes cambian de un lugar a otro, son función de la situación geográfica, y los agentes que determinan en cada punto el régimen vigente para cada elemento climatológico se llaman factores del clima. Es un factor no controlable por el hombre. (Coraza, 1991).

- **Gestión ambiental de los recursos**

El proceso de gestión debe realizarse mediante metodologías que tengan un enfoque sistémico e interdisciplinario permitiendo la optimización del uso de los recursos naturales, humanos, económicos y financieros con un adecuado control de la capacidad del medio ambiente de absorber los impactos negativos, dirigidos a un adecuado ordenamiento ambiental de la actividad agrícola.

- **Demandas hídricas de los cultivos**

Los sistemas de producción agrícola requieren del agua como principal fuente de materia prima de conjunto con la luz, los niveles de humedad estarán determinados por el tipo de cultivo a sembrar, puesto que cada uno tiene necesidades de agua específicas, con determinada tolerancia a su calidad, y en dependencia del desarrollo foliar será el volumen de agua evapotranspirada que marcará el consumo de la misma por los cultivos y por ende la necesidad de regar o no.

Por otro lado, los elementos no actúan de forma independiente, durante la realización de los procesos ocurren interacciones de diferentes índoles y grados de complejidad. Un breve análisis sobre las mismas se ofrece a continuación.

Este modelo posee un carácter sistémico donde existe una interrelación entre sus componentes debido a que el suelo y el agua están estrechamente vinculados desde el momento en que ocurre el proceso de formación hidrogeológica de la zona, ya que el material basal (rocas) que dará lugar a la litología de cubierta tendrá propiedades físicas, químicas y biológicas propias que transmitirá al agua intrínseca en ella, la cual puede tener una ocurrencia continental o marítima brindándole determinadas cualidades así como a la que circule por sus espacios porosos y viceversa, de ahí que su granulometría es un elemento clave para la dinámica del agua en el suelo y los límites permisibles de humedad para el desarrollo de los cultivos, dicho proceso también será regido por las condiciones climáticas del área geográfica pues su intensidad de interacción dependerá del comportamiento de las temperaturas, precipitaciones y evaporación.

Por tal motivo es que la tecnología a emplear para la gestión propone establecer los cultivos adaptados a las condiciones anteriormente mencionadas debido a que hay elementos que no se pueden variar y otros que resultan económicamente insostenibles para modificarlos según la demanda del cultivo, por lo tanto las prácticas agrícolas, el régimen hídrico así como la necesidad de drenaje o lixiviación también deben de adaptarse a dichas condiciones. De aquí que el proceso de gestión debe mediar en constante interacción entre las entradas y salidas que componen el sistema con utilización del enfoque sistémico como un conjunto de métodos lógicos, regulados del conocimiento de la realidad proporcionando ventajas de carácter científico, tales como: poseer un aparato conceptual, diverso, que se refleje bajo la forma de categorías y propiedades formuladas con relativa exactitud, Permitir la distinción objetiva del objeto estudiado del medio circundante, facilitar la creación de un modelo de partida para estudiar el objeto, sobre cuya base se puede elaborar el programa de su estudio bajo la forma de operaciones científicas constituyendo una base para la construcción de isomorfismos conceptuales y terminológicos, que sirvan para la comunicación inter y transdisciplinaria.

Por lo abordado con anterioridad, es que el modelo presenta como entradas al recurso agua con su origen, calidad y fuente de procedencia ya que existen fuentes de abastos internas (aguas subterráneas) del agroecosistema y aguas exteriores procedentes de ríos y embalses (aguas superficiales) las que tendrán un intercambio hídrico con la atmósfera en el balance lluvia/evaporación influyendo en su calidad y cantidad, por otra parte el suelo por su formación hidrogeológica también aportará determinadas características físicas, químicas y biológicas al agroecosistema, y una vez incorporados dentro del mismo pasarán a formar parte del stop de

recursos que una vez gestionados brindarán productos como : régimen hídrico de los cultivos, potencial de salinización del suelo , cultivos a establecer según su tolerancia a la salinidad y necesidad de drenaje y/o lixiviación, ya que precisamente de esa composición física química y biológica de los recursos suelo y agua y del comportamiento del clima es que se puede recomendar los cultivos atendiendo a su demanda, aplicado agua en la cantidad y momento propicio según la calidad de la misma, agua que retornará como subproducto al agroecosistema ya sea por los excesos que serán lixiviados y se incorporan al agua subterránea o la evaporación que pueda precipitar sobre el mismo y sus fuentes de abasto y tendrá como salidas al agua evapotranspirada y el agua que forma parte de la composición de las cosechas realizadas que no retornarán al sistema .

## 2.3 Propuesta de la metodología a emplear

Este epígrafe aborda, a partir del análisis teórico anterior, una metodología con el objetivo de proponer las medidas necesarias para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas en una zona propensa a la salinidad por formaciones hidrogeológicas de origen marino según las necesidades hídricas de los cultivos (cantidad, calidad y oportunidad) a partir de la determinación de la composición física – química - biológica de las aguas subterráneas y las principales propiedades hidrofísicas del suelo, así como los datos climáticos que se registran en la zona.

Esta metodología cuenta de seis fases como se muestra en la figura 2.2, las que se encuentran interrelacionadas entre si sobre la base del proceso de gestión desde que comienza la preparación del trabajo hasta la evaluación y monitoreo, mediadas por búsquedas de información, muestreo, análisis de laboratorio, interpretación de resultados y caracterización de las agua así como propuesta e implementación de soluciones.

### 2.3.1 Fase 1: Preparatoria

En esta fase se precisará el objetivo y se organizará el trabajo para agilizar el proceso de búsqueda de información, toma de datos y decisiones.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Precisión del objetivo y alcance del trabajo
- Sensibilización de las partes involucradas en el estudio.
- Creación de comisiones de trabajo de trabajo y asignación de responsabilidades.

- Capacitación a los actores involucrados según las funciones de la comisión de trabajo.
- Selección del área de estudio.

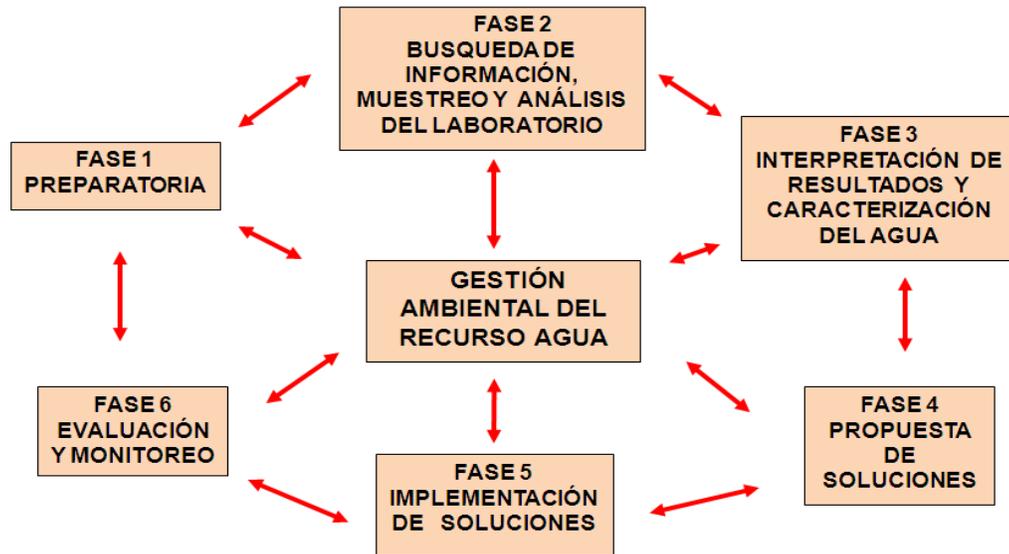


Figura 2.2 Metodología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas en suelos con tendencia a la salinidad

– Orientaciones metodológicas

Primeramente de forma mancomunada se precisará el objetivo del trabajo y alcance del mismo en función de las posibilidades reales en el área de estudio, posterior a ello se sensibilizarán tanto a los administrativos de la empresa y entidades de base, así como directivos de la provincia y municipio sobre la importancia del estudio en el cual algunos de ellos formarán parte ya sea en acciones directas o indirectas.

Se identificarán los actores principales y se conformarán comisiones de trabajo según la necesidad de búsqueda de datos que surja a partir de un análisis de la información ya existente en manos de los involucrados, y una vez creada las comisiones necesarias se diseñará un plan de capacitación a corto plazo para que el trabajo tenga el mayor rigor y calidad posible en la obtención y procesamiento de los datos obtenidos.

Para la selección de las áreas de estudio se revisará si existen estudios preliminares, de no ser así, se identificará el origen del agua utilizada (fluvial o subterránea.) para definir las prioridades a muestrear para enviar al laboratorio.

### 2.3.2 Fase 2: Búsqueda de información, muestreo y análisis del laboratorio

Esta fase tiene el objetivo de recopilar todos los datos e información del estado hidrogeológico de la zona de estudio de conjunto con los registros del comportamiento del clima, así como la toma de muestras y su envío al laboratorio para sus respectivos análisis.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Precisión del muestreo y las técnica analítica a emplear
- Toma de muestras (agua y suelo)
- Análisis de laboratorio
- Toma de datos para el balance pluviométrico.

– Orientaciones metodológicas

La toma y análisis de las muestras del agua se realizarán según lo establecido por el Laboratorio Provincial de Recursos Hidráulicos para cada fuente de abasto utilizada en el sistema de producción agrícola tomándose a tres profundidades (superficie, medio, fondo) para asegurar un promedio bastante homogéneo y lo realizará un personal capacitados por ellos.

Posterior al muestreo se determinarán los iones presentes en el agua mediante los análisis de laboratorio, así como su estado físico y biológico, se determinándose el contenido de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (por Volumetría),  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  (por fotometría de llama),  $\text{SO}_4^{2-}$  (por Turbidimetría), Porcentaje de hidronio (pH) (por Potenciometría), CE (por Conductimetría), Coliformes (Bacteriología por disolución y DBO (por Incubación).

El muestreo de suelo y análisis de las muestras se realizarán según las normas establecidas por el Instituto Nacional de Suelos. Donde las principales propiedades físicas a determinar serán, Capacidad de Campo, Límite productivo, Densidad real y aparente, Porosidad, Velocidad de Infiltración y Granulometría o trabajar sobre bases de datos de investigaciones ya existentes en la zona de estudio o similares.

Para conocer el balance pluviométrico se deben situar pluviómetros y tanques evaporímetros en la zona de estudio para poder llevar el registro diario del comportamiento de la evaporación y las precipitaciones, de no ser posible hay que auxiliarse de los reportes de la estación agrometeorológica más cercana y búsqueda de información del comportamiento histórico de estos elementos.

### 2.3.3 Fase 3: Interpretación de resultados y caracterización del agua

En esta fase tiene el objetivo de analizar toda la información recopilada así como los resultados arrojados por el análisis del laboratorio para caracterizar el agua procedente de las diferentes fuentes de abasto.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Caracterización del agua atendiendo a su calidad.

– Orientaciones metodológicas

Una vez obtenido los datos arrojados por el laboratorio se procederá a efectuar un trabajo de gabinete por parte de un equipo multidisciplinario para realizar un análisis más amplio conformado especialmente por especialistas en Agronomía (incluye suelo y riego), Hidrogeología, Agrometeorología, y otras ramas que puedan tributar a un mejor análisis de la información como la Química, Biología y Geografía, para llegar a un consenso lo más acertado posible donde más que abordar la calidad para el uso agrícola se profundice con exactitud en la calidad ambiental de la misma dentro del contexto agrícola.

Para la caracterización de las aguas se propone una metodología que evalúe un mayor número de indicadores que determinan el estado Físico – Químico – Biológico y su relación con la calidad del agua, partiendo de la determinación de la Contaminación Salina (CS) y el Índice de Salinidad Marina (ISM) que no son utilizados hasta el momento en el contexto agrícola y se determinarán los propuestos por Aceves y Palacios (1970): Rango de Adsorción del Sodio (RAS), Carbonato de Sodio Residual (CSR), Porcentaje de Sodio Posible (PSP), Salinidad Efectiva (SE), Salinidad Potencial (SP) por ser el método más abarcador y se le incluirá la Conductividad Eléctrica (CE), Porcentaje de Sodio soluble (PSS), Coeficiente de irrigación (Ci), Iones específicos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y B), Porcentaje de hidronio (pH), Coliformes y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que son evaluados en las otras metodologías.

Para un mejor análisis los indicadores se agruparán por sus posibles efectos en el ecosistema para lo cual se verá desde el punto de vista de Salinidad, Efectos sobre las propiedades físicas del suelo, Iones específicos que son tóxicos para las plantas y efectos varios por pH, contaminación por Coliformes y DBO.

En los capítulos siguientes se darán las indicaciones metodológicas para la caracterización del agua para uso agrícola según sus posibles efectos.

### 2.3.3.1 Indicadores para determinar el efecto por salinidad

Para el efecto por salinidad se partirá de la Contaminación Salina (CS) e Índice de Salinidad Marina (ISM), para identificar la posible presencia de sales por presencia de sedimentos marinos durante el proceso de formación hidrogeológica de la zona de estudio, además se determinará la Conductividad Eléctrica (CE), Salinidad Potencial (SP) y Salinidad Efectiva (SE).

#### – Contaminación Salina (CS)

Según De Miguel (1994). Las aguas naturales, tanto las superficiales como las subterráneas pueden presentar contaminación salina por la relación de las mismas con aguas de mares, lagos salinizados, aguas subterráneas deícticas, contenido de sales en las rocas, etc. El grado de contaminación puede determinarse sobre la base de la composición química de las aguas y principalmente por la concentración de iones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ . Para la determinación del grado de contaminación salina de las aguas se utiliza la relación iónica y su clasificación, expuesta con su respectiva expresión en el Anexo 2

#### – Índice de Salinidad Marina (ISM)

En estado natural y sin salinización marina, en la composición química de las aguas subterráneas existe el predominio de los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  sobre los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , en sedimentos acuíferos y rocas carbonatadas (de origen marino), el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  deben su origen en las aguas subterráneas principalmente por la disolución de Calizas, Dolomitas etc. o del cemento calcáreo de las rocas que forman el acuífero y de las aguas que alimentan al acuífero (aguas fluviales, atmosféricas o de otros acuíferos). De tal forma es indicio de una posible salinización de origen marino el predominio de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sobre los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en estos tipos de sedimentos.

Por correlación de iones se logró la expresión para el coeficiente Índice de Salinidad Marina que su clasificación se refleja en el anexo 3

#### – Conductividad Eléctrica (CE)

La Conductividad es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la presencia de iones. Proviene de una base, un ácido o una sal, disociadas en iones.

Calderón (2005) la define como la capacidad que tienen el medio (que por lo general contiene las sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente Eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente

Eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida depender del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas mayor ser la conductividad, y sus principales riesgos son precipitación de sales, daño al cultivo y salinización del suelo.

La concentración de sales solubles totales se expresa como Conductividad Eléctrica (CE) del agua en micromhos / cm a 25 °C de temperatura del agua, con lo que se establecen cuatro grupos de agua. Ver anexo 4

#### – Salinidad Potencial (SP)

Aceves y Palacios (1970). Plantea que este índice considera que cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %, se produce la precipitación de las sales menos solubles, quedando en solución los  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , con lo que aumenta considerablemente la presión osmótica y actúan sobre el suelo a bajos niveles de humedad. La Salinidad Potencial se determina por la fórmula y clasificación que se muestran en el anexo 5.

#### – Salinidad Efectiva (SE)

Pujol , (2000) plantea que un criterio de estimación más real del peligro que presentan las sales del agua de riego que pasan a formar parte de la solución del suelo es la Salinidad Efectiva (SE) en meq/l, ya que considera la precipitación posterior de las sales que son menos solubles como los  $\text{CaCO}_3$  ,  $\text{MgCO}_3$  y el  $\text{CaSO}_4$ , los cuales no participan en el aumento de la elevación de la presión osmótica de la solución del suelo, manifestándose más notablemente en presencia de alto contenido de  $\text{CO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ . La Salinidad Efectiva se determina por la fórmula correspondiente según sea el caso y su clasificación que se muestran en el anexo 6.

### 2.3.3.2 Indicadores para determinar el efecto sobre las propiedades físicas del suelo

#### – Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

Un alto contenido de  $\text{Na}^+$  en el agua de riego puede inducir elevados valores del porcentaje de  $\text{Na}^+$  intercambiable, es decir, que por medio del intercambio catiónico, el  $\text{Na}^+$  pasa a ocupar los lugares en el complejo absorbente del suelo que era ocupado por otros cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc., con efectos perjudiciales de pérdidas de estructura por hinchamiento y dispersión, disminuyendo la permeabilidad, aireación e incrementándose la resistencia a la penetración de las raíces. Para evaluar estos problemas que un agua de riego pueda ocasionar por la presencia de  $\text{Na}^+$  se utiliza la

Relación de Adsorción de Sodio (RAS), como indicador de la tendencia del catión  $\text{Na}^+$  a incorporarse al complejo de cambio constituyendo un riesgo de alcalinización. Mediante este intercambio catiónico se produce un desequilibrio eléctrico en el suelo, ya que deja cargas negativas residuales, por lo que las partículas de suelo se repelen, con lo que el suelo se defloclula y pierde su estructura. Esta sodificación del suelo disminuye en el mismo su permeabilidad y favorece la formación de costras, quedando modificadas las propiedades físicas e inclusive las químicas del suelo, (De Miguel, 2008)

Los problemas de infiltración derivados de la calidad del agua tienen el obvio efecto de prolongar en el campo el tiempo de permanencia de las aguas de riego y lluvia, tiempo necesario para fomentar la proliferación de vectores y muchas veces suficiente para completar su ciclo biológico, principalmente de mosquitos ya que tienen una preferencia por el agua que va desde aguas frescas hasta salobres, incluyendo pozas de sal, lo que demuestra la necesidad de una evaluación completa sobre su potencial en relación con la salud humana. (Miliarium, 2004).

Pacheco (1995). Plantea que debe destacarse que la fórmula original para calcular el Relación de Adsorción del Sodio (RAS) posee como inconveniente de que no refleja la posibilidad de los precipitados de sales, aspecto este que puede aumentar el riesgo de sodicidad debido a que los cationes que pueden precipitar son el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ , y de  $\text{MgCO}_3$ . Para salvar este inconveniente que resulta del cálculo del RAS se propone el cálculo del RAS ajustado, cuya expresión de cálculo y clasificación se reflejan en el anexo 7.

#### — Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Para explicar el peligro de la acumulación de  $\text{Na}^+$  en el suelo existe otro indicador que es el Carbonato de Sodio Residual (CSR), ya que cuando en el agua de riego el contenido de  $\text{CO}_3^{3-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  es mayor que el de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , se crea la posibilidad de que se forme  $\text{NaCO}_3$ , debido a que por su alta solubilidad puede mantenerse en solución aun después de que han precipitado los  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ . En estas condiciones, la concentración total y relativa de  $\text{Na}^+$  puede ser suficiente para desplazar al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación o dispersión del suelo. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias normales pero a medida que ella ocurre, la concentración total y relativa del  $\text{Na}^+$  tiende a crecer, aumentando las posibilidades de intercambio con el complejo absorbente del suelo. Este aumento puede ejercer efectos secundarios sobre el desarrollo vegetativo del cultivo, ya que la pérdida de estructura causa

una aireación y permeabilidad deficiente así como también una baja disponibilidad de agua. (Llanos, 1999)

El índice de Carbonato de Sodio Residual se determina por la fórmula y clasificación que se muestran en el anexo 8.

– Porcentaje de Sodio posible (PSP)

Según Pujol (2000). El Porcentaje de Sodio Posible (PSP) es la cantidad de  $\text{Na}^+$  que resultaría una vez precipitados los  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  y el  $\text{CaSO}_4$  los cuales al precipitarse aumentan relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes. Se basa en la ecuación y denominación que aparecen en el anexo 9.

– Porcentaje de Sodio Soluble (PSS)

El Porcentaje de Sodio Soluble es otro indicador para evaluar contenido de  $\text{Na}^+$  y se determina por la fórmula y clasificación que se reflejan en el anexo 10.

– Coeficiente de irrigación (Ci)

Para una evaluación aproximada de la calidad del agua, por los datos de análisis químicos de las aguas, es muy fácil y práctico utilizar el coeficiente de irrigación, obtenido empíricamente sobre la base de las observaciones en elementos básicos y sus concentraciones máximas menos inofensivas para unos 40 cultivos agrícolas y sobre la relativa toxicidad de las sales de  $\text{Na}^+$ . El coeficiente de irrigación se refleja en la altura de la columna de agua en pulgadas. Esta columna de agua durante la evaporación da una cantidad de bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos. (De Miguel, 2008)

El cálculo del Coeficiente de irrigación (Ci), para aguas de distintos tipos se ejecuta por fórmulas empíricas que responden a los casos y clasificación que aparece en el anexo 11.

### 2.3.3.3 Iones específicos que pueden provocar toxicidad a las plantas ( $\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$ , B)

Para evaluar el riesgo de toxicidad que pueda inducir un agua de riego, se toma la clasificación de la FAO según Ayers (1987) en relación con el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y B expuesto en el anexo 12.

– Sodio

Elevados contenidos de  $\text{Na}^+$  pueden afectar a las plantas y, también, producir problemas de permeabilidad en los suelos. Algunos de los cultivos más sensibles al  $\text{Na}^+$  son el almendro, el aguacate, los frutales de hueso y los cítricos. Contenidos foliares de  $\text{Na}^+$  superiores a 0,3-0,5 %

(sobre peso seco) suelen indicar problemas de toxicidad en la mayoría de árboles frutales y cítricos. El  $\text{Na}^+$  es el elemento más abundante y peligroso de los cationes, en aguas salitrosas. Su toxicidad se manifiesta en la planta en forma de quemaduras en los bordes de las hojas. La alta concentración de sales disminuye la posibilidad de las raíces de absorber agua; la elevada concentración de  $\text{Na}^+$  reduce la permeabilidad del suelo y por lo tanto la velocidad de infiltración del agua. Las aguas de mala calidad pueden además producir efectos tóxicos sobre los cultivos. Altos contenidos de iones de  $\text{Na}^+$  en las aguas de regadío, afecta la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración. Esto es porque el  $\text{Na}^+$  cuando está presente en el suelo es intercambiable por otros iones. El  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  son cationes que forman parte de los complejos estructurales que forman el suelo generando una estructura granular apropiada para los cultivos. El exceso de iones de  $\text{Na}^+$  desplaza el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y provoca la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo.

#### – Cloruro

La presencia de  $\text{Cl}^-$  en las aguas naturales se atribuye a la solución de depósitos de sal gema, contaminación proveniente de los diversos efluentes de la actividad industrial, aguas excedentarias de riegos agrícolas y sobre todo de las minas de sales potásicas. A veces se puede presentar un incremento esporádico del contenido en  $\text{Cl}^-$  como consecuencia de contaminantes domésticos, en particular de la orina del hombre y de los animales. El  $\text{Cl}^-$  es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual.

Concentraciones elevadas de  $\text{Cl}^-$  en el agua de riego pueden producir problemas de toxicidad en los cultivos. Los frutales suelen ser bastante sensibles y esta depende en gran parte del portainjerto empleado, los  $\text{Cl}^-$  son los más peligrosos y su toxicidad se presenta en los agrios en forma de quemaduras en las hojas, en particular en el ápice. El exceso de  $\text{Cl}^-$  dificulta la absorción del N y el P.

Todas las aguas contienen  $\text{Cl}^-$ . Una gran cantidad puede ser índice de contaminación ya que las materias residuales de origen animal siempre tienen considerables cantidades de estas sales. Un agua con alto tenor de oxidabilidad,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , caracteriza una contaminación y por lo tanto los  $\text{Cl}^-$  tienen ese origen. Pero si estas sustancias faltan ese alto tenor se debe a que el agua

atraviesa terrenos ricos en Cl<sup>-</sup>. Los Cl<sup>-</sup> son inocuos de por sí, pero en cantidades altas dan sabor desagradable.

#### — Boro

Las plantas absorben B del suelo y a través del consumo de plantas por los animales este termina en la cadena alimentaria. El B entra en el medio ambiente sobre todo mediante la meteorización de las rocas, la volatilización de Ácido bórico del agua del mar y la actividad volcánica. También se desprende B de fuentes antropogénicas en menor medida. Entre las fuentes antropogénicas figuran la quema de productos agrícolas, de basuras y de leña, la producción de energía utilizando carbón y petróleo, la fabricación de productos de vidrio, la lixiviación de madera/papel tratados y la eliminación de aguas residuales/fangos de alcantarillado. Muchas de estas fuentes son difíciles de cuantificar. El B se adsorbe en las partículas del suelo, dependiendo el grado del tipo de suelo, el pH, la salinidad, el contenido de materia orgánica, minerales y el contenido de arcilla. La adsorción de B puede variar entre totalmente reversible e irreversible, en función del tipo y de la condición del suelo. Los problemas de toxicidad se producen más frecuentemente a causa del B contenido en el agua que en el suelo.

### 2.3.3.4 Otros indicadores para evaluar la calidad ambiental del agua en la agricultura: pH, Coliformes y DBO.

#### — Porcentaje de hidronio (pH)

El pH expresa la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución y en el agua natural depende de la concentración de CO<sub>2</sub> y se debe a la composición de los terrenos atravesados por la misma, el pH alcalino indica que los suelos son calizos y el pH ácido que son silíceos. La reacción del suelo o pH del suelo afecta de modo significativo la disponibilidad y la asimilación de nutrientes y ejerce una fuerte influencia sobre la estructura del propio suelo.

En las aguas de riego el pH normal es de 6,5 y 8,4. Las aguas con pH anormal pueden crear desequilibrios de nutrición o contener iones tóxicos que alterarían el crecimiento normal de la planta. El pH de la solución nutriente en contacto con las raíces puede afectar el crecimiento vegetal de dos formas principalmente:

El pH puede afectar al proceso fisiológico de absorción de los nutrientes por parte de las raíces: todas las especies vegetales presentan unos rangos característicos de pH en los que su absorción

es idónea. Fuera de este rango la absorción radicular se ve dificultada y si la desviación en los valores de pH es extrema, puede verse deteriorado el sistema radical o presentarse toxicidades debidas a la excesiva absorción de elementos fitotóxicos. Ver anexo 13 para la clasificación.

#### – Coliformes

La contaminación por microorganismos puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales, sino también a la del hombre, consumidor de ellos. La presencia de microorganismos debe vigilarse particularmente en los cultivos en que las raíces o las extremidades de los vegetales son consumidas por el hombre o los animales. Los criterios microbiológicos de calidad de agua son de gran importancia para el riego de productos frescos, frutas, hortalizas y productos de exportación. Para asegurar la calidad del agua para el riego de vegetales de consumo crudo, no deben contener microorganismos patógenos, de esta manera se asegura la salud de la población. Ver anexo 14 para la clasificación.

#### – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO es una prueba que mide la cantidad de  $O_2$  consumido en la degradación Bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios.

Los niveles altos de DBO, indican que el agua está contaminada y necesita un tratamiento para darle un uso. La contaminación del agua por materia orgánica causaría en las plantas, que estos contaminantes orgánicos se acumulen en las raíces o extremidades de los vegetales, y los afectados son los consumidores que los ingieren directamente. Las deficiencias de  $O_2$  disuelto posibilitan el desprendimiento de hierro y manganeso y su disolución causando, posibles problemas en el tratamiento de las aguas. El sabor y olor son también un riesgo en ausencia de  $O_2$  disuelto, a causa de la potencial producción de Sulfuro de Hidrógeno y otros compuestos de S. La putrefacción de la materia orgánica en el agua produce una disminución de la cantidad de  $O_2$  (la cual es evaluada mediante la Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO) que causa graves daños a la flora y fauna acuática. El aumento de la DBO, ocasiona disminución del  $O_2$  disuelto, afectando la vida acuática. Es importante tener en cuenta las variaciones relativas de  $O_2$  ya que si estas variaciones son grandes es síntoma de que ha habido un aumento anormal de vegetales, materia orgánica, gérmenes aerobios, reductores anaerobios. Las concentraciones establecidas para el DBO presenta variaciones por diferente países y algunas de ellas se reflejan en el anexo 15.

#### 2.3.4 Fase 4: Propuesta de soluciones

Esta fase tiene el objetivo de definir el régimen hídrico a establecer para diferentes cultivos de conjunto con la elaboración de propuestas de medidas (prevención y/o mitigación) para la gestión del agua mediante prácticas que vayan en armonía con el medioambiente donde se obtengan mayores resultados con un mínimo de afectación al mismo.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Determinación de los niveles de humedad del suelo y régimen hídrico.
- Propuesta de reordenamiento de cultivos a establecer según su tolerancia a la salinidad.
- Determinación de los requerimientos de lixiviación.
- Establecimiento de los períodos críticos de demanda hídrica de los cultivos.
- Pronóstico de potencialidad de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes.

– Orientaciones metodológicas

- **Niveles de humedad del suelo y régimen hídrico**

Para determinar los niveles de humedad del suelo es imprescindible realizar en el laboratorio ensayos de composición granulométrica, velocidad de infiltración, densidad aparente y porosidad del suelo y litologías de cubierta, además de la profundidad de yacimiento de las aguas subterráneas o trabajar sobre bases de datos ya existentes en la zona de estudio, pero por lo engorroso que resulta en estos momentos realizar varios de estos ensayos en el laboratorio se puede utilizar programas como la Calculadora de las Características Hidráulicas, que permite a partir de la granulometría del suelo determinar los principales elementos que son necesarios en el régimen hídrico del mismo. (Saxton, 1986).

De conjunto con el registro del comportamiento de la evapotranspiración y precipitaciones en las zonas, se llevará un control estricto del balance hídrico por los cultivos que se establezcan, y a partir de este, tomando datos de los análisis anteriormente realizados se calcularán las reservas de humedad, normas e intervalos de riegos necesarios, para lograr mejor optimización de los recursos hídricos y su efecto sobre el suelo, por lo que también se identificarán las áreas que requieran de drenaje para diseñar los sistemas más viables y económicos posibles.

Para el régimen hídrico primeramente se determinarán las reservas de humedad y normas de riegos y luego se estimarán los posibles valores de evapotranspiración a partir de los datos de evaporación y los coeficientes bioclimáticos de los cultivos (cuyos valores pueden encontrarse

según Allen (2006), en el estudio FAO 56 de la serie Riego y Drenaje) y con ellos el intervalo de riego en días por las fórmulas normalmente establecidas como se describe en el anexo 16.

- **Propuesta de reordenamiento de cultivos a establecer según su tolerancia a la salinidad**

Mediante búsquedas bibliográficas y resultados obtenidos por los diferentes centros de investigación se hará una selección de los cultivos y de las variedades más recomendadas a establecer atendiendo a su tolerancia a la salinidad, apoyándose en el umbral de tolerancia de sales de un cultivo reflejado en el anexo 17, de la misma forma que se experimentará sobre las que no estén estudiadas.

- **Requerimiento de Lixiviación**

En las aguas de riego por muy pequeñas que sean las cantidades de sales presentes en ella existirá una acumulación paulatina de sales en el suelo si se emplea las Normas parciales exactamente como requiere el cultivo o menor a estas hasta tal punto que un agua de buena calidad puede llegar a salinizar un suelo, por lo que es importante aplicar un mínimo de agua superior a la demandada para que percolen las sales a capas más profundas que las raíces y no se afecte el cultivo el cual es llamado Requerimiento de Lixiviación y se determina según la ecuación que se refleja en el anexo 18.

- **Establecimiento de los períodos críticos de demanda hídrica de los cultivos**

Cuando la disponibilidad de agua no es suficiente para cubrir todas las normas parciales que requiere el cultivo se hace necesario establecer los períodos críticos de demanda hídrica de los cultivos para evitar un mayor estrés en los mismos por déficit de humedad lo cual ya se ha determinado en un grupo de cultivos que aparecen reflejados en el anexo 19.

- **Pronóstico de potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes**

El pronóstico de potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes se realizará según la metodología propuesta por De miguel (1997), abordada en el capítulo 1. Teniendo en cuenta la profundidad de yacencia de las aguas freáticas en la zona de estudio con su ISM ya calculado y utilizando la tabla propuesta por Skabalanóvich *et al* (1980), se determinan los ascensos capilares posibles por el valor práctico que ofrece. Ver Anexo 20

### 2.3.5 Fase 5: Implementación de soluciones

En esta fase se implementarán en el proceso productivo las soluciones propuestas en la fase anterior a partir del estudio realizado.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Implementación de las normas de riegos de los cultivos atendiendo a su régimen hídrico determinadas en la fase cuatro con su respectivo requerimiento de lixiviación.
- Establecimiento de cultivos a partir de los umbrales de tolerancia a la salinidad ubicados en la fase cuatro.
- Implementación del riego prestando atención a los períodos críticos de mayor exigencia al agua por los cultivos.
- Zonificar las áreas de estudio atendiendo al pronóstico de salinización realizado.

– Orientaciones metodológicas

Una vez que se realicen las acciones de la fase cuatro se implementarán en la práctica agrícola, por lo que se sembrarán los cultivos a partir de los umbrales de tolerancia a la salinidad a los cuales se le aplicarán las normas de riegos establecidas para el tipo de suelo de la zona de estudio y en función de la profundidad radical según la fase de crecimiento en que se encuentren, fase que también determinará sus períodos críticos de exigencia al agua que serán la base para la implementación del riego, con un incremento de la norma atendiendo al requerimiento de lixiviación en el momento adecuado y con intensidad de aplicación por debajo de la velocidad de infiltración del suelo. Por otra parte, a los mapas de trabajo de la zona de estudio se le regionalizará sus umbrales de tolerancia a la salinidad atendiendo al potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes ya pronosticado.

### 2.3.6 Fase 6: Evaluación y monitoreo

En esta fase se evaluará el estado de ejecución de las acciones implementadas así como se hará un monitoreo del trabajo tanto interfase y/o al concluir las mismas.

– Acciones específicas a desarrollar:

- Confección y ejecución de un plan de evaluación y monitoreo sistemático del proceso productivo

– Orientaciones metodológicas

Se realizará un plan de evaluación y monitoreo sistemático (incluyendo análisis económico ambiental) del proceso productivo una vez establecidas las medidas que permita una

retroalimentación efectiva para poder evaluar y corregir las acciones implementadas el cual se organiza durante todo el proceso para realizar ajustes correctores y rediseñar en caso de ser necesario.

Una vez regionalizadas las áreas, reordenados los cultivos en las mismas y establecidas las acciones a ejecutar se procederá a dar un seguimiento con el objetivo de ir evaluando por etapas y comparando con zonas donde no se aplique la metodología, los cambios de mejoras para la agricultura y el medio ambiente. También es importante ir chequeando entre una fase y otra ya que los agroecosistemas cambian permanentemente y siempre habrá más elementos por conocer, no se trata de repetir el mismo proceso como si fuera un círculo sin principio y fin. Se trata de un proceso que pudiera compararse con una espiral. Es decir, siguiendo el orden lógico del ciclo, se regresa cada vez al punto de partida, pero en un nivel más elevado.

## 2.4 Conclusiones del capítulo

- El modelo teórico para la gestión del recurso agua con fines agrícolas posee un carácter sistémico que puede ser utilizado en agroecosistemas propensos a la salinidad por su formación hidrogeológica, ya que analiza la gestión del agua a partir del origen de sus componentes y su interrelación agronómica, desde una amplia caracterización de las aguas hasta el pronóstico de salinización de la zona de estudio permitiendo una mejor toma de decisiones para el manejo ambiental de este recurso, aspectos que no se abordan por otros autores o no son tratados con la profundidad requerida en la literatura encontrada, lo que constituye una solución novedosa y oportuna a esta problemática .
- A partir del modelo teórico se propone por primera vez una metodología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas que propone seis fases que contemplan la preparación del personal y actividades a desarrollar, toma de muestras y análisis de laboratorio con sus respectivas interpretaciones y caracterización de las aguas que sirven de base para elaborar un plan de propuestas de acciones a ejecutar con su evaluación y monitoreo teniendo en cuenta los principales elementos de la hidrogeología que caracterizan el quimismo de las aguas, mostrando una vinculación teórica entre las ciencias agronómicas e hidrogeológicas aplicable a zonas propensas a la salinidad debido a su formación hidrogeológica.

### 3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE LA TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO AGUA CON FINES AGRÍCOLAS EN SUELOS CON ELEVADA TENDENCIA A LA SALINIDAD DE LA CUENCA DEL RÍO CAUTO, CASO DE ESTUDIO, “ANTONIO MACEO”

El presente capítulo tiene el propósito de Implementar y validar la tecnología propuesta a través de la aplicación de su segunda componente, la metodología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas, en áreas agrícolas de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo”, del municipio Cacocum en la provincia de Holguín, que se encuentra enclavada en la depresión Cacocum de la Cuenca del Cauto, la cual por su formación hidrogeológica está amenazada a los procesos de salinización y desertificación explicados en el capítulo uno.

En esta investigación se aplicaron las primeras cuatro fases en la medida de las posibilidades existentes para la toma de datos y búsqueda de información, tiempo disponible para realizar el trabajo y en función del presupuesto disponible como se refleja a continuación.

#### 3.1 Fase 1: Preparatoria

En esta fase se precisó el objetivo del trabajo que consiste en caracterizar las aguas de las diferentes fuentes de abasto de uso agrícola de conjunto con el pronóstico de salinización de la zona de estudio para una mejor propuesta de gestión ambiental de este recurso. Posterior a esto se realizaron cinco sesiones de trabajo donde se sensibilizaron tanto a los administrativos como a ocho trabajadores de la empresa que participaron en el trabajo sobre la importancia del estudio para una zona tan vulnerable a la salinización como la es el caso de estudio, luego se identificaron los actores principales y se conformaron comisiones de trabajo según la necesidad de búsqueda de datos e información, quedando creado tres grupo fundamentales (Profesores de la Universidad de Holguín, Especialistas del Laboratorio para análisis del agua de la empresa de Recursos Hidráulicos de Holguín y Miembros de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo”), los que fueron previamente capacitados y orientados sobre la actividad a desarrollar posteriormente.

Para la capacitación de los actores involucrados a los profesores de la Universidad de Holguín se le impartieron cuatro conferencias y una actividad práctica en temas relacionados con el análisis e interpretación de datos físico-químico-biológicos arrojados en laboratorio, balance hídrico de los cultivos y calidad de las aguas para riego.

Por su parte, ya el laboratorio para análisis del agua de la Empresa de Recursos Hidráulicos tiene a sus especialistas capacitados en toma de muestras y análisis de las mismas, por lo que solo preparó a los trabajadores de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo” en el acondicionamiento de las fuentes de abastos para el muestreo.

Para la selección de las áreas de estudio se identificaron mediante un recorrido a las principales fuentes de abastos que tributan a la empresa tanto subterráneas como superficiales, a las que se les crearon las condiciones mínimas necesarias para la toma y envío de muestras de muestras al laboratorio, quedando identificadas como superficiales (Rio Holguín y Canal Presa Magueyal) y subterráneas (Pozo Celia Sánchez, Pozo Yenín, Pozo Los Haticos y Pozo Rudiberto Cuadrado).

Por la no existencia de pluviómetros en la zona y tanques evaporímetros en la empresa se trabajó con los datos de evaporación recogidos en bases de datos del INRH.

## 3.2 Fase 2: Búsqueda de información, muestreo y análisis del laboratorio

### 3.2.1 Búsqueda de información

Para recopilar toda la información posible se consultaron los documentos existentes en la Empresa que contienen información de valor para el estudio, se realizaron consultas al INRH y al CITMA de la provincia así como se escuchó criterios de los pobladores más antiguos en la zona.

### 3.2.2 Toma de muestras de agua y análisis de laboratorio

La toma de muestras de agua se realizó a las principales fuentes de abasto que tributan a la zona agrícola de la Empresa “Antonio Maceo” (tomándose a tres profundidades (superficie, medio, fondo) donde se extrajo tres muestra por cada profundidad utilizándose las técnicas analíticas descritas en el capítulo 2.

El análisis de las muestras se realizó atendiendo a los métodos de ensayo indicados para cada parámetro de acuerdo con el Método Estándar de Examen de Agua establecido por el Laboratorio

Provincial de Recursos Hidráulicos así como por un personal capacitados por ellos, y sus resultados se reflejan en el anexo 21.

### 3.3 Fase 3: Evaluación de resultados y caracterización del agua

Para la caracterización de las aguas se partió de la determinación y evaluación de la Contaminación Salina (CS) y el Índice de Salinidad Marina (ISM) propuestos por De Miguel (2008) para detectar si existe posibilidad de presencia de sales de origen marino, luego se calcularon los indicadores que fueron posible según la disponibilidad de análisis arrojados por el laboratorio: (Rango de adsorción del Sodio (RAS), Carbonato de Sodio Residual (CSR), Porcentaje de Sodio Posible (PSP), Salinidad Efectiva (SE), Salinidad Potencial (SP)) según Aceves y palacios (1970); (Conductividad Eléctrica (CE), Porcentaje de Sodio Soluble (PSS)), según WILCOX (1967); (Contenido de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , pH y Coliformes)) según Ayers *et al.* (1987), añadiéndoles el Coeficiente de irrigación (Ci). La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y el B no fueron evaluados debido a que el laboratorio no tenía disponible las técnicas requeridas para ello, y para un mejor análisis los indicadores se agruparon por sus posibles efectos según lo descrito en el capítulo 2.

#### 3.3.1 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el pozo Celia Sánchez

La Tabla 3.1 muestra que esta agua en su composición química posee un alto grado de Contaminación Salina (CS) y puede considerarse como agua de mar según el Índice de Salinidad Marina (ISM), dando indicio de mucha salinización de origen marino por el predominio de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sobre los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en estos tipos de sedimentos. Mostrando además ser un agua extremadamente salinas debido su capacidad para conducir la electricidad lo que puede provocar una solución demasiado concentrada en sales que produce interferencias en la absorción radical, posee altos riesgos potenciales de quedar en solución los  $\text{Cl}^-$  al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %, lo que la hace no recomendable para el riego estimándose un peligro de que las sales del agua pasen a formar parte de la solución del suelo.

Tabla 3.1 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el pozo Celia Sánchez

Parámetro	CS	ISM	CE	SP	SE
Valor	17,30	12,20	5000	51,97	51,97
Criterio de evaluación	Agua de mar	Muy salinizada	Extremadamente salina	No recomendable	No recomendable

Para los efectos sobre el suelo la Tabla 3.2 muestra que esta agua produce un desequilibrio eléctrico en el mismo, ya que deja cargas negativas residuales, por lo que las partículas de suelo se repelen perdiendo su estructura. También puede inducir elevados valores del porcentaje de  $\text{Na}^+$  intercambiable, es decir, que por medio del intercambio catiónico, el  $\text{Na}^+$  pasa a ocupar los lugares en el complejo absorbente del suelo que era ocupado por otros cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc., con efectos perjudiciales de pérdidas de estructura por hinchamiento y dispersión, disminuyendo la permeabilidad, constituyendo un riesgo de alcalinización y sodicidad debido a que los cationes que pueden precipitar son el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{MgCO}_3$ . Los cuales al precipitarse aumentan relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes. Por otra parte durante la evaporación quedará una cantidad de bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos.

En cuanto a los iones tóxicos  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  la tabla 3.3 muestra que se pueden afectar las plantas por toxicidad debido al alto contenido de los mismos en ella. Esta agua aunque mantiene un pH normal, para el uso en la agricultura manifiesta algo de contaminación por Coliformes Totales lo que puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales sino también a la del hombre, consumidor de ellos. Ver tabla 3.4

Tabla 3.2 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el pozo Celia Sánchez

PARÁMETRO	$\text{RAS}_{Aj}$	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	29,47	0	67,69	69,72	1,10
Criterio de evaluación	Problemas graves	Buena	Dudosa	Condicional	Mala

Tabla 3.3 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el pozo Celia Sánchez

PARÁMETRO	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$
Valor	51,973	36.23
Criterio de evaluación	Mala	Mala

Tabla 3.4 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para el pozo Celia Sánchez

PARÁMETRO	CT	pH
Valor	(+)1100	8,29
Criterio de evaluación	Algo contaminada	Débilmente básica

### 3.3.2 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el pozo Yenín

La Tabla 3.5 muestra que esta agua en su composición química presenta indicios de tener bastante contaminación salina, indicando una salinización de origen marino por el predominio de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sobre los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en estos tipos de sedimentos según el ISM calculado. Mostrando además ser un agua extremadamente salina debido su capacidad para conducir la electricidad lo que puede provocar una solución demasiado concentrada en sales que produce interferencias en la absorción radical con riesgos potenciales de quedar en solución los  $\text{Cl}^-$  al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %. Pero se estima un peligro de que las sales del agua pasen a formar parte de la solución del suelo, ya que existirá una precipitación posterior de las sales que son menos solubles como los  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ .

Tabla 3.5 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el pozo Yenín

PARÁMETRO	CS	ISM	CE	SP	SE
Valor	3,06	5,33	5330	45,99	45,99
Criterio de evaluación	Bastante contaminada	Salinizada	Extremadamente salina	No recomendable	No recomendable

Para los efectos sobre el suelo según la Tabla 3.6 esta agua produce un desequilibrio eléctrico, ya que deja cargas negativas residuales en el mismo, por lo que las partículas de suelo se repelen perdiendo su estructura. También puede inducir elevados valores del porcentaje de  $\text{Na}^+$  intercambiable, es decir, que por medio del intercambio catiónico, el  $\text{Na}^+$  pasa a ocupar los lugares en el complejo absorbente del suelo que era ocupado por otros cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc., con efectos perjudiciales de pérdidas de estructura por hinchamiento y dispersión, disminuyendo la permeabilidad, constituyendo un riesgo de alcalinización y sodicidad debido a que los cationes que pueden precipitar son el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{MgCO}_3$ . Los cuales al precipitarse aumentan relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes. Por otra parte durante la

evaporación quedará una cantidad de bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos.

Tabla 3.6 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el pozo Yenín

Parámetro	RAS <sub>Aj</sub>	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	45,85	0	71,77	93,90	1,25
Criterio de evaluación	Problemas graves	Buena	Dudosa	Condicional	No Satisfactoria

En cuanto a los elementos tóxicos por parte del Cl<sup>-</sup>, es un agua mala con concentraciones elevadas que pueden producir problemas de toxicidad en los cultivos y su exceso dificulta la absorción del N y P. En lo que se refiere al Na<sup>+</sup> pueden afectar a las plantas, su toxicidad puede provocar en las plantas quemaduras en los bordes de las hojas y disminuye la posibilidad de las raíces de absorber agua. Ver Tabla 3.7

Tabla 3.7 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el pozo Yenín

Parámetro	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Valor	45,99	43,19
Criterio de evaluación	Mala	Mala

Esta agua aunque mantiene un pH normal para el uso en la agricultura manifiesta algo de contaminación por Coliformes Totales lo que puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales sino también a la del hombre, consumidor de ellos. Ver Tabla 3.8

Tabla 3.8 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para el pozo Yenín

Parámetro	CT	pH
Valor	(+) 1100	8,17
Criterio de evaluación	Algo contaminada	Débilmente básica

### 3.3.3 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el pozo Los Haticos

Los valores de la Tabla 3.9 muestran que esta agua por su composición química presenta indicios de tener bastante contaminación salina, indicando una salinización de origen marino por el predominio de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> sobre los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> en estos tipos de sedimentos según el ISM calculado. Mostrando además ser un agua extremadamente salinas debido su capacidad

para conducir la electricidad lo que puede provocar una solución demasiado concentrada en sales que produce interferencias en la absorción radical con riesgos potenciales de quedar en solución los  $\text{Cl}^-$  y al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %, pero se estima un peligro de que las sales del agua pasen a formar parte de la solución del suelo, ya que existirá una precipitación posterior de las sales que son menos solubles como los  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ .

Tabla 3.9 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el pozo Los Haticos

Parámetro	C.S	ISM	CE	SP	SE
Valor	4,09	3,80	6653,3	37,32	61,21
Criterio de evaluación	Bastante contaminada	Salinizada	Extremadamente salina	No recomendable	No recomendable

Para los efectos sobre el suelo según los valores de la Tabla 3.10 esta agua produce un desequilibrio eléctrico, ya que deja cargas negativas residuales en el mismo, por lo que las partículas de suelo se repelen perdiendo su estructura. También puede inducir elevados valores del porcentaje de  $\text{Na}^+$  intercambiable, es decir, que por medio del intercambio catiónico, el  $\text{Na}^+$  pasa a ocupar los lugares en el complejo absorbente del suelo que era ocupado por otros cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc., con efectos perjudiciales de pérdidas de estructura por hinchamiento y dispersión, disminuyendo la permeabilidad, constituyendo un riesgo de alcalinización y sodicidad debido a que los cationes que pueden precipitar son el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{MgCO}_3$ . Los cuales al precipitarse aumentan relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes. Por otro lado, durante la evaporación quedará una cantidad de bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos.

Tabla 3.10 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el pozo Los Haticos

Parámetro	RAS $A_j$	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	38,99	0	63,99	73,14	1,10
Criterio de evaluación	Problemas graves	Buena	Dudosa	Condicional	Mala

En cuanto a los elementos tóxicos por parte del  $\text{Cl}^-$  es un agua mala con concentraciones elevadas que pueden producir problemas de toxicidad en los cultivos y su exceso dificulta la absorción del N y P. En lo que se refiere al  $\text{Na}^+$  pueden afectar a las plantas. Su toxicidad puede provocar en las

plantas quemaduras en los bordes de las hojas y disminuye la posibilidad de las raíces de absorber agua. Ver Tabla 3.11

Esta agua según la Tabla 3.12 mantiene un pH normal y no manifiesta contaminación por Coliformes Totales.

Tabla 3.11 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el pozo Los Haticos

Parámetro	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Valor	37,32	44,77
Criterio de evaluación	Mala	Mala

Tabla 3.12 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para pozo Los Haticos

Parámetro	C.T.	pH
Valor	56,2	7,62
Criterio de evaluación	Muy Limpia	Débilmente básica

### 3.3.4 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el pozo Rudiberto Cuadrado

Por los valores mostrados en la Tabla 3.13 esta agua por su composición química presenta indicios de tener una mediana contaminación salina indicando una salinización de origen marino por el predominio de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> sobre los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> en estos tipos de sedimentos según el ISM Calculado. Mostrando además ser un agua extremadamente salinas debido su capacidad para conducir la electricidad lo que puede provocar una solución demasiado concentrada en sales que produce interferencias en la absorción radical con riesgos potenciales de quedar en solución los Cl<sup>-</sup> al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %. pero se estima un peligro de que las sales del agua pasen a formar parte de la solución del suelo, ya que existirá una precipitación posterior de las sales que son menos solubles como los CaCO<sub>3</sub> y MgCO<sub>3</sub>.

Para los efectos sobre el suelo según lo reflejado en la Tabla 3.14 esta agua produce un desequilibrio eléctrico, ya que deja cargas negativas residuales en el mismo, por lo que las partículas de suelo se repelen perdiendo su estructura. También, puede inducir elevados valores del porcentaje de Na<sup>+</sup> intercambiable, es decir, que por medio del intercambio catiónico, el Na<sup>+</sup> pasa a ocupar los lugares en el complejo absorbente del suelo que era ocupado por otros cationes como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>,

etc., con efectos perjudiciales de pérdidas de estructura por hinchamiento y dispersión, disminuyendo la permeabilidad, constituyendo un riesgo de alcalinización y sodicidad debido a que los cationes que pueden precipitar son el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en forma de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{MgCO}_3$ . Los cuales al precipitarse aumentan relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes, de igual forma, durante la evaporación quedará una cantidad de bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos.

Tabla 3.13 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el pozo Rudiberto Cuadrado

Parámetro	C.S	ISM.	CE	SP	SE
Valor	2,53	2,64	2666,67	14,22	20,81
Criterio de evaluación	Medianamente contaminada	salinizada	Extremadamente salina	Condicional	No recomendable

Tabla 3.14 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el pozo Rudiberto Cuadrado

Parámetro	RAS <sub>Aj</sub>	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	17,20	0	58,72	74,14	3,44
Criterio de evaluación	Problemas graves	Buena	admisible	condicional	No Satisfactoria

En cuanto a los elementos tóxicos por parte del  $\text{Cl}^-$  es un agua mala con concentraciones elevadas que pueden producir problemas de toxicidad en los cultivos y su exceso dificulta la absorción del N y P. En lo que se refiere al  $\text{Na}^+$  pueden afectar a las plantas. Su toxicidad puede provocar en las plantas quemaduras en los bordes de las hojas y disminuye la posibilidad de las raíces de absorber agua. Ver tabla 3.15

Esta agua según la Tabla 3.16 aunque mantiene un pH normal para el uso en la agricultura manifiesta algo de contaminación por Coliformes Totales lo que puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales sino también a la del hombre, consumidor de ellos.

El agua de este pozo aunque no cumple con todos los parámetros establecidos sus valores están muy por debajo del resto de los pozos lo que da una mejor posibilidad de uso con respecto a los demás.

Tabla 3.15 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el Pozo Rudiberto Cuadrado

Parámetro	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Valor	14,29	15,48
Criterio de evaluación	Mala	Mala

Tabla 3.16 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para el Pozo Rudiberto Cuadrado

Parámetro	C.T.	pH
Valor	1100	7,62
Criterio de evaluación	Algo contaminada	Débilmente básica

### 3.3.5 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el Río Holguín

Por sus valores la Tabla 3.17 muestra que esta agua por su composición química presenta indicios de una ligera contaminación salina que debe su presencia a que el Río Holguín atraviesa por una zona del municipio Cacocum donde recibe ingresos de agua originadas en rocas sobre las que tuvo la formación hidrogeológica de la zona, dando indicio de una débil salinización de origen marino por el predominio de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> sobre los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> en estos tipos de sedimentos según el ISM calculado. Mostrando además ser un agua de salinidad media debido su capacidad para conducir la electricidad por la presencia de los iones disociados en ella, sin riesgos potenciales de quedar en solución los Cl<sup>-</sup> al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %. Pero se estima un peligro de que al precipitar las sales que son menos solubles como CaCO<sub>3</sub> y MgCO<sub>3</sub> pasen a formar parte de la solución del suelo.

Tabla 3.17 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el Río Holguín

Parámetro	CS	ISM	CE	SP	SE
Valor	0,72	1,01	710	2,31	4,57
Criterio de evaluación	Ligeramente contaminada	Débilmente salinizada	Salinidad media	Buena	Condicional

La Tabla 3.18 muestra que para los efectos sobre el suelo no se manifiesta una tendencia a que ocurra un intercambio catiónico que produzca un desequilibrio eléctrico en el suelo, es decir, que por medio del intercambio catiónico, no existe riesgo que el Na<sup>+</sup> pase a ocupar los lugares del complejo absorbente del suelo que era ocupado por cationes como Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, sin producir

efectos perjudiciales sobre las propiedades físicas y sin riesgo de riesgo de sodicidad a corto plazo. Al igual que durante la evaporación no quedará bases suficientes para que el suelo se convierta en agresivo hasta profundidades de 1,2 hasta 1,5 m para la mayoría de los cultivos.

Tabla 3.18 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el Rio Holguín

Parámetro	RAS <sub>Aj</sub>	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	3,54	0	36,48	58,11	19,23
Criterio de evaluación	Sin problemas	Buena	Buena	Condicional	Buena

Según la tabla 3.19 en cuanto a los elementos tóxicos como el Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> no existe peligro alguno sobre los cultivos. Además, esta agua según la Tabla 3.20 aunque mantiene un pH normal para el uso en la agricultura manifiesta una alta contaminación por Coliformes Totales lo que puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales sino también a la del hombre consumidor de ellos.

Tabla 3.19 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el Rio Holguín

Parámetro	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
Valor	2,31	2,65
Criterio de evaluación	Buena	Buena

Tabla 3.20 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para el Rio Holguín

Parámetro	CT	pH
Valor	150,1 <sup>4</sup>	7,67
Criterio de evaluación	Totalmente contaminada	Débilmente básica

### 3.3.6 Evaluación de resultados y caracterización del agua para el Canal Presa Magueyal

Por los datos arrojados en la Tabla 3.21 esta agua por su composición química presenta indicios de una ligera contaminación salina dando indicio de una débil salinización de origen marino por el predominio de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> sobre los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> en estos tipos de sedimentos según el ISM calculado. Mostrando además ser un agua altamente salina debido a su capacidad para conducir la electricidad lo que puede provocar una solución demasiado concentrada en sales que produce interferencias en la absorción radical, con riesgos potenciales de quedar en solución los Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> al precipitar las sales menos solubles cuando la humedad aprovechable de un suelo es

menor del 50 %.pero se estima un peligro de que las sales del agua pasen a formar parte de la solución del suelo, ya que existirá una precipitación posterior de las sales que son menos solubles como los  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  y el  $\text{CaSO}_4$ .

Tabla 3.21 Parámetros evaluados en función de la salinidad para el Canal Presa Magueyal

Parámetro	C.S	ISM	CE	SP	SE
Valor	0,58	1,30	943	4,19	5,99
Criterio de evaluación	Ligeramente contaminada	Débilmente salinizada	Altamente salina	Condicional	Condicional

Para los efectos sobre el suelo según la Tabla 3.22 se manifiesta una tendencia a que ocurra un intercambio catiónico que produzca un desequilibrio eléctrico en el suelo, es decir, que por medio del intercambio catiónico existe riesgo que el  $\text{Na}^+$  pase a ocupar los lugares del complejo absorbente del suelo que era ocupado por cationes como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , produciendo efectos perjudiciales sobre las propiedades físicas con riesgo de sodicidad a corto plazo y se debe de mantener un control para que a largo plazo una vez precipitados los  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  y el  $\text{CaSO}_4$  no se aumente relativamente la proporción de  $\text{Na}^+$  sobre los demás cationes.

Tabla 3.22 Parámetros evaluados en función del efecto sobre el suelo para el Canal Presa Magueyal

Parámetro	$\text{RAS}_{Aj}$	CSR	PSS	PSP	Ci
Valor	7,93	0	50,47	84.31	12,51
Criterio de evaluación	Problemas crecientes	Buena	Admisible	Condicional	Satisfactoria

En cuanto a los elementos tóxicos  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  la Tabla 3.23 muestra que se puede utilizar esta agua ya que aunque el  $\text{Na}^+$  cae dentro del rango de regular tiene un valor muy próximo a agua buena.

Tabla 3.23 Parámetros evaluados en función de la fitotoxicidad para el Canal Presa Magueyal

Parámetro	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$
Valor	3,69	5,05
Criterio de evaluación	Buena	Regular

Esta agua aunque mantiene un pH normal para el uso en la agricultura manifiesta algo de contaminación por Coliformes Totales lo que puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales, sino también, a la del hombre consumidor de ellos. Ver Tabla 3.24

Tabla 3.24 Parámetros evaluados en función de Coliformes y pH para el Canal Presa Magueyal

Parámetro	C.T.	pH
Valor	(+) 1100	8,17
Criterio de evaluación	Algo contaminada	Débilmente básica

### 3.3.7 Caracterización general del agua subterránea en la zona de estudio

Por la importancia que tienen las aguas subterráneas sin menospreciar a las aguas superficiales es preciso hacer una caracterización general en la zona de estudio ya que esta agua es la que determinará la composición hidrogeológica interna del agroecosistema y su relación con las externas que entren al agroecosistema por lo que al analizar el agua procedente de las diferentes fuentes de abastos se aprecia que la zona de estudio cuenta con aguas subterráneas propias del tipo Clorada sódica por su contenido iónico.

Las evaluaciones realizadas demuestran que por su quimismo se puede zonificar el área agrícola de la Empresa Agropecuaria “Antonio Maceo” en dos, la primera quedando ubicadas al norte las fuentes de abastos con menor contenido de sales (pozo Rudiberto Cuadrado y pozo Los Haticos) y al sur la segunda con las de mayor salinidad (pozo Celia Sánchez y pozo Yenín) mostrándose en todos un predominio de iónico de Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, lo que corrobora la presencia de sedimentos de origen marino en su lecho rocoso, de ahí que son extremadamente salinas atendiendo a su Conductividad Eléctrica (CE) y de alto grado de Contaminación Salina (CS) con un elevado Índice de Salinidad Marina (ISM) .

De la misma forma que por los bajos niveles de CO<sub>3</sub><sup>-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ninguno de los pozos tiene riesgos para el suelo debido al Carbonato de Sodio Residual (CSR) no siendo así por la presencia de Na<sup>+</sup> que debido a sus altas concentraciones puede acarrear problemas graves al modificar la estructura del suelo, teniéndose en cuenta además que como ión específico de conjunto con el Cl<sup>-</sup> posee concentraciones con valores alto riesgo de toxicidad en las plantas.

### 3.4 Fase 4: Propuesta de soluciones

En esta fase tiene el objetivo de definir el régimen hídrico a establecer para diferentes cultivos de conjunto con la elaboración de propuestas de medidas (prevención y/o mitigación) para la gestión del agua mediante prácticas que vayan en armonía con el medioambiente donde se obtengan mayores resultados con un mínimo de afectación al mismo, para lo cual primero, a partir de la datos se determinan los niveles de humedad del suelo y régimen hídrico de los cultivos, establecimiento de cultivos por tolerancia a la salinidad, requerimiento de lixiviación y pronóstico de salinización.

#### 3.4.1 Estimación de los niveles de humedad del suelo y régimen hídrico

Para determinar los niveles de humedad del suelo se tomaron datos de ensayos de composición granulométrica realizados para suelos Vertisuelos sobre los cuales se cultiva en la zona de estudio Corella *et al* (2002); Cid *et al* (2004); Chaterlan *et al* (2005); Núñez (2010); De la rosa *et al* (2011), a partir de los cuales se utilizó la Calculadora de las Características Hidráulicas (Saxton, 1986), que permitió determinar elementos como la Densidad aparente, Capacidad de Campo y Límites productivo, de la misma forma que a través de los boletines hidrológicos del INRH se tomaron datos para la determinaron valores de evapotranspiración más representativos de la zona.

#### 3.4.2 Estimación Niveles de humedad del suelo

La tabla 3.25 muestra los niveles de humedad que requiere el suelo de la zona de estudio en los que se pueden ubicar cultivos con profundidades desde 0,20 m hasta 1,0 m. Luego se estimaron los posibles valores de evapotranspiración de los cultivos a establecer a partir de los datos de evaporación y los coeficientes bioclimáticos de los cultivos y con ello el intervalo de riego en días.

Tabla 3.25 Niveles de humedad del suelo

CC (%)	LP (%)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	H (m)	W <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	W <sub>mín</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	MP (m <sup>3</sup> /ha)
56,0	49,5	1,15	Hasta 0,20	1680,0	1485,0	195,0
56,0	49,5	1,15	Hasta 0,40	3360,0	2970,0	390,0
56,0	49,5	1,15	Hasta 0,60	5040,0	4455,0	585,0
56,0	49,5	1,15	Hasta 0,80	6720,0	5940,0	780,0
56,0	49,5	1,15	Hasta 1,0	8400,0	7425,0	975,0

SIMBOLOGIA:

CC: Capacidad de Campo; LP: Límite Productivo; DA: Densidad Aparente; H: Capa Activa; W<sub>máx</sub>: Reserva Máxima de Humedad; W<sub>mín</sub>: Reserva Mínima de Humedad; MP: Norma Parcial de Riego

### 3.4.3 Determinación de la evapotranspiración

La Tabla 3.26 muestra la determinación indirecta de la evapotranspiración media diaria (Evt) por meses a partir de los datos de evaporación media diaria (Ev) reportados en la zona de estudio y la distribución de la evaporación por provincias y municipios (Lora, 1999), determinándose dicha evapotranspiración a partir de los coeficientes bioclimáticos (Kb) de los cultivos desarrollados en Cuba los cuales se encuentran entre 0,5 y 1. Utilizándose la fórmula correspondiente que aparece reflejada en el anexo 16.

Tabla 3.26 Estimación de la evapotranspiración media diaria en (m<sup>3</sup>/ha)

MES año	Evaporación (Ev)		Coeficiente bioclimático, (kb)					
	(mm)	(m <sup>3</sup> /ha)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
			Evapotranspiración Evt (m <sup>3</sup> /ha)					
E	5	50	25	30	35	40	45	50
F	5,96	59,6	29,82	35,79	41,75	47,71	53,68	59,64
M	7,13	71,3	35,65	42,77	49,90	57,03	64,16	71,29
A	8,3	83	41,50	49,80	58,10	66,40	74,70	83
M	8,03	80,3	40,16	48,19	56,23	64,26	72,29	80,32
J	6,8	68	34,00	40,80	47,60	54,40	61,20	68
J	7,74	77,4	38,71	46,45	54,19	61,94	69,68	77,42
A	7,52	75,2	37,58	45,10	52,61	60,13	67,65	75,16
S	6,43	64,3	32,17	38,60	45,03	51,47	57,90	64,33
O	5,55	55,5	27,74	33,29	38,84	44,39	49,94	55,48
N	4,87	48,7	24,33	29,20	34,07	38,93	43,80	48,67
D	4,71	47,1	23,55	28,26	32,97	37,68	42,39	47,10

### 3.4.4 Determinación del intervalo de riego

El intervalo de riego como está en función de la MP y la Evt, para la zona de estudio se puede determinar con los datos calculados en las tablas anteriores, por lo que su aplicación se ilustra mejor en el siguiente ejemplo:

Si en el mes de enero se tiene el cultivo del Tomate en la etapa de floración - maduración de los frutos y se plantea que su zona de mayor desarrollo radical (Capa activa) está aproximadamente a unos 0,50 m y presenta un Kb de 0.80, de la tabla 3.25 se obtiene que la MP es de 585,0 m<sup>3</sup>/ha y de la Tabla 3.26 se obtiene que su Evt será de 40 m<sup>3</sup>/ha, entonces aplicando la ecuación:

IR: MP/ Evt; Días

Sustituyendo:

IR:  $585,0 \text{ m}^3/\text{ha} / 40 \text{ m}^3/\text{ha} = 14,6 \text{ días}$ .

O sea, para dicho cultivo en la fase floración - maduración de los frutos en el mes de enero se requiere una MP de  $585,0 \text{ m}^3/\text{ha}$  y se agotará el agua a cada 14,6 días en caso que no ocurra precipitación alguna, de esta forma este procedimiento se puede aplicar para cualquier cultivo que esté presente en un momento dado. En caso de ocurrir precipitación se debe de mantener una vigilancia de la humedad del suelo para llevarla hasta la CC o en caso de un exceso muy grande drenar según posibilidades.

### 3.4.5 Cultivos a establecer por tolerancia a la salinidad según la Conductividad Eléctrica (CE)

La Tabla 3.27 Muestra los niveles de tolerancia a la salinidad según la CE, sobre los cuales se pueden sembrar los cultivos ya mencionados en el Capítulo 2 donde es importante destacar que aunque por los valores de la fuentes abasto pozo Celia Sánchez, pozo Yenín, pozo Los Haticos y Canal Presa Magueyal se admitan cultivos semitolerantes es recomendable establecer cultivos tolerantes.

Tabla 3.27 Algunos cultivos a establecer por tolerancia a la salinidad según la Conductividad Eléctrica (CE)

Fuente de abasto	Cultivos tolerantes 10000- 18000 micromhos/cm	Cultivos semitolerantes 4000 - 10000 Micromhos/cm	Cultivos de baja tolerancia 2000- 4000 micromhos/cm
	Algodón, acelga, espinaca, pastos, remolacha.	Caña de azúcar, arroz, maíz, trigo, sorgo, calabaza, melón, pepino, lechuga, girasol, garbanzo, col, tomate, brócoli, cebolla, zanahoria, fruta bomba, piña, papa.	Cítricos, boniato, pimiento, soya, frijol, maní, ají, berenjena, rábano, apio, aguacate, mango.
RH	X	X	X
PVCS	X	X	
PY	X	X	
PLH	X	X	
CPM	X	X	X
PRC	X	X	X

SIMBOLOGIA:

RH: Río Holguín; PVCS: pozo Celia Sánchez; PY: pozo Yenín; PLH: pozo Los Haticos; CPM: Canal Presa Magueyal; PRC: pozo Rudiberto Cuadrado

### 3.4.6 Determinación del requerimiento de lixiviación.

Por ser la zona de estudio un agroecosistema donde predominan más los días secos que los lluviosos, para evitar una acumulación paulatina de sales se calculó el requerimiento de lixiviación para determinar el exceso de agua que se le debe aplicar a las normas parciales de riego para que percolen las sales a capas más profundas que las raíces, el cual se determinó con la fórmula planteada en el capítulo 2.

La Tabla 3.28 muestra los requerimientos de lixiviación a emplear para calcular el volumen de agua necesario para que ocurra la lixiviación de sales a capas más profundas que en las que se desarrolla el sistema radicular de las plantas, donde los valores que sobrepasan el 100 % reflejan que existen aguas con mayor CE que el umbral de tolerancia imposibilitando la lixiviación, por lo que se aprecia que con aguas del Río Holguín y el Canal de la presa Magueyal se puede lixiviar para todos los cultivos según nivel de tolerancia, no siendo así para el pozo de la vaquería de Celia Sánchez, pozo Yenín y pozo Los Haticos que solo se puede lixiviar para cultivos tolerantes (10000 – 18000 micromhos), y en el pozo de Rudiberto Cuadrado los medianamente tolerantes y tolerantes (4000 – 10000 y 10000 – 18000 micromhos).

Tabla 3.28 Determinación del Requerimiento de lixiviación.

Fuente de abasto	RH	PVCS	PY	PLH	CPM	PRC
CE (micromhos/cm)	710	5000	5330	6653,3	943	2646
Umbral de tolerancia	Requerimiento de lixiviación (%)					
2000	35,5	250	266,5	332,6	47,1	132,3
4000	17,7	125	133,2	166,3	23,5	66,1
10000	7,10	50	53,3	66,5	9,4	26,4
18000	3,9	27,7	29,6	36,9	5,2	14,7

SIMBOLOGIA:

RH: Río Holguín; PVCS: pozo Celia Sánchez; PY: pozo Yenín; PLH: pozo Los Haticos; CPM: Canal Presa Magueyal; PRC: pozo Rudiberto Cuadrado

Por lo que en el cultivo del ejemplo anterior para regarlo con agua del Canal de la Presa Magueyal, se debe aplicar un exceso de agua entre un 9,4 % y un 23,5 % de la MP antes calculada y así se hará según la tolerancia del cultivo para cada fuente de abasto en cuestión, siempre teniendo en cuenta que el drenaje interno de este exceso vaya acorde con una velocidad de infiltración para que no ocurran largos períodos de encharcamiento.

### 3.4.7 Establecimiento de los períodos críticos de demanda hídrica de los cultivos

Como se abordó en el capítulo anterior cuando la disponibilidad de agua no es suficiente para cubrir todas las normas parciales que requiere el cultivo se hace necesario establecer los períodos críticos de demanda hídrica de los cultivos y para el ejemplo del tomate que se ha venido tratando sería en el trasplante, formación de la floración y durante el crecimiento rápido del fruto.

### 3.4.8 Pronóstico de potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes

Para la aplicación del pronóstico de potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes según la metodología propuesta por De miguel, (1997), abordada en el capítulo 1, ya se tiene determinado el ISM para las cuatro fuentes de abasto de agua subterránea con sus respectivas profundidades las que están ubicadas en suelos vérticos con predominio de arcillas pesadas de relación 2:1, plásticas, adhesivas y compactas (Chaterlan, 2005), formados sobre una litología que según Skabalanóvich *et al*, (1980), pueden tener ascensos capilares hasta 12 m.

Lo anteriormente planteado va acompañado también a que en esta zona con el desarrollo de la tecnología agrícola y su introducción en la agricultura cubana, con vistas a incrementar la productividad en los trabajos agrícolas y mejorar las condiciones de trabajo del hombre en las plantaciones cañeras se utilizaron equipos pesados (combinadas cañeras, tractores, etc. que en muchos casos presentan gran tonelaje de peso), los que con el cotidiano transitar favorecieron la compactación de los suelos, con ello la disminución de la capacidad de drenaje natural de los mismos, y favoreció procesos hidrogeológicos degradantes de los suelos al reducirse las dimensiones de poros en los sedimentos de cubierta y con ello incrementarse las propiedades de capilaridad.

La Tabla 3.29 muestra el potencial de salinización según el quimismo del agua subterránea de las fuentes de abasto analizadas donde se aprecia que al Sur de la empresa el agua se encuentra con

mayores valores de ISM pero a mayor profundidad de yascencia por lo que se pronostica que la zona de estudio según las condiciones hidrogeológicas existentes sea poco salinizable al Sur y muy salinizable al Norte de la empresa utilizando la propuesta de De miguel, (1997), y trabajando con la tabla de Skabalanóvich *et al*, (1980), todos son salinizables. Apreciándose que esta última ofrece un valor práctico para cuando se desconoce la profundidad de yascencia pero por este método se subestima el pronóstico cuando el agua se ubican a menor profundidad que le posible ascenso capilar y se sobreestima cuando se encuentra a profundidades mayores que el posible ascenso, por lo que utilizando la propuesta por De miguel, (1997), se obtiene una pronóstico de potencial de salinización más confiable.

Tabla 3.29 Pronóstico de potencial de salinización

Fuentes de abasto	Ubicación	Profundidad (m)	ISM	Potencial de salinización según profundidad de yascencia del agua (De miguel, 1997).	Potencial de salinización según ascensos capilares (Skabalanóvich <i>et al</i> , 1980).
PCS	Al Sur de la Empresa	15,0	12,20	Poco Salinizable	Salinizables
PY	Al Sur de la Empresa	15,0	5,33	Poco Salinizable	Salinizables
PLH	Al Norte de la Empresa	3,0	3,80	Muy Salinizable	Salinizables
PRC	Al Norte de la Empresa	3,0	2,64	Muy Salinizable	Salinizables

SIMBOLOGIA:

PVCS: pozo Celia Sánchez; PY: pozo Yenín; PLH: pozo Los Haticos; PRC: pozo Rudiberto Cuadrado

### 3.4.9 Algunas consideraciones para la gestión del agua en la actividad del riego en la zona de estudio

A continuación se brindan algunas recomendaciones que deben de tenerse en cuenta para gestionar el recurso agua con fines agrícolas prestando atención en el cuidado del medio ambiente durante la actividad del riego.

- Sembrar cultivos atendiendo al umbral de tolerancia anteriormente explicado.
- Por la baja velocidad de infiltración para ganar en eficiencia la lixiviación debe priorizarse en la época de invierno, aplicar riegos de presiembra y no lixiviar en los períodos críticos de los cultivos.

- Mantener el suelo mullido uniformemente y a buena profundidad para evitar pérdidas del agua de lixiviación por agrietamiento logrando un adecuado drenaje interno.
- Posterior a la lixiviación realizar aplicación de materia orgánica para balancear los nutrientes del suelo y mantener una adecuada estructura del mismo.
- Evitar largos períodos barbecho sobre todo en el verano.
- Aplicar el riego con alta frecuencia.
- Siempre que sea económicamente justificable establecer el riego localizado.
- El riego por aspersión no es aconsejable pero de no poder establecerse otro método por razones justificadas se debe regar con intensidades de aplicación inferiores a la velocidad de infiltración del suelo (no superior a 10 mm/h para suelos arcillosos como son los del caso de estudio), preferiblemente de noche y con aspersores de alta rotación.
- En caso de regar por surcos las semillas deben sembrarse en la zona del camellón de menor acumulación de sales acorde al diseño utilizado.
- No transportar el agua procedente de una fuente de abasto con altos contenidos de sales para regar áreas agrícolas que su agua subterránea posee menores concentraciones sobre todo del sur de la empresa hacia el norte.
- Aplicar las normas de riego que son admisibles por el suelo en dependencia del tipo de cultivo con un incremento de la misma donde sea posible para la lixiviación de sales.
- Tener presente los períodos críticos del cultivo según la demanda hídrica.
- En producciones a pequeñas escalas propiciar un lecho macroporoso a profundidad mayor a la zona radical para evitar el ascenso capilar de aguas subterráneas disminuyendo así el riesgo de salinización por esta vía.
- No utilizar el agua del pozo Celia Sánchez para actividades agrícolas y las de Yenín y Los Haticos evitar su uso de ser posible y si no extremar todas las medidas necesarias para su uso.
- El agua del Río Holguín no debe utilizarse para regar cultivos de consumo fresco por su alto contenido de Coliformes y mantener cuidado con el resto de las fuentes de abastos que se encuentran ligeramente contaminadas.
- Evitar la aplicación del agua del Río Holguín mediante sistemas por aspersión para evitar la contaminación por Coliformes del aire y áreas aledañas a las que se encuentran bajo riego.

- Realizar estudios sobre la capacidad acuífera de la zona para tener en cuenta la disponibilidad de agua y no sobreexplotar los acuíferos.
- Realizar periódicamente análisis de laboratorio para ver el comportamiento de la concentración de sales en los acuíferos.
- Mantener vigilancia del estado fisiológico de los cultivos para identificar posible intoxicación por  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ .
- Mapificar la zonas de estudio según el potencial de salinización.

### 3.5 Conclusiones del capítulo

- Atendiendo al ISM las aguas subterráneas de las que se sirve la agricultura en la empresa se encuentran salinizadas y muy salinizadas en su gran mayoría y la CS fluctúa entre medianamente contaminada a agua de mar, lo que demuestra un contenido de iones de ocurrencia marina en el manto freático por el alto contenido de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , siendo el pozo Celia Sánchez el más perjudicado, por otra parte las aguas superficiales se encuentran débilmente salinizadas y ligeramente contaminadas, lo que puede estar dado a un intercambio iónico con las aguas subterráneas de la zona.
- Las aguas subterráneas evaluadas por su quimismo son del tipo cloradas sódicas lo que provoca la formación de sales de  $\text{NaCl}$  siendo extremadamente salinas debido a su Conductividad Eléctrica (CE), con tendencia a que el  $\text{Na}^+$  pase a ocupar lugares en el complejo absorbente del suelo provocando un desequilibrio eléctrico afectando su estructura, con presencia de iones específicos como el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$  en cantidades que pueden ser tóxicas a las plantas, mostrando además una débil contaminación por presencia de Coliformes totales excepto el pozo Los Haticos que no está contaminado, y el pozo Rudiberto Cuadrado aunque está dentro de los rangos negativos muestra los valores más inferiores en cada parámetro.
- En el caso de las aguas superficiales el canal de la Presa de Magueyal aunque en con valores inferiores muestra características similares a la de las aguas subterráneas, con la excepción de no mostrar peligro de toxicidad para las plantas por presencia de iones específicos y por su parte el Rio Holguín muestra las mejores características pero posee una alta contaminación ya que por el fluyen las aguas negras procedente de la ciudad de Holguín y de varias entidades que son focos contaminantes para el mismo.

- En los suelos de la zona de estudio por su tolerancia a la salinidad los cultivos establecerse deben de estar entre tolerantes y semitolerantes empleando normas de riego que deben fluctuar entre los 195,0 y 975,0 m<sup>3</sup> /ha en dependencia de la profundidad radical del cultivo, siendo necesario aplicar un exceso de agua para lixiviación de sales.
- Atendiendo al potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes se pronostica que los suelos ubicados en las áreas de los pozos evaluados son salinizables.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

1. Las diferentes políticas, estrategias, metodologías, guías, etc., para la gestión del agua que han sido analizadas abordan temáticas independientes que son claves en el proceso de gestión del agua pero no contemplan herramientas utilizadas en la Hidrogeología que caracterizan el quimismo de las aguas como son el ISM y la CS, lo que muestra la falta vinculación teórica entre las Ciencias Agronómicas e Hidrogeológicas, por lo que se hace necesario proponer una tecnología científicamente justificada donde las teorías de las ciencias agronómicas e hidrogeológicas se compenetren en la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas.

2. Se propone por primera vez una metodología para la gestión ambiental del recurso agua con fines agrícolas a partir de un modelo teórico que posee un carácter sistémico que puede ser utilizado en agroecosistemas propensos a la salinidad por su formación hidrogeológica, ya que analiza la gestión del agua a partir del origen de sus componentes y su interrelación mostrando un vínculo teórico entre las Ciencias Agronómicas e Hidrogeológicas.

3. Las aguas subterráneas de las que se sirve la agricultura en la empresa Antonio Maceo son del tipo Cloradas sódicas que atendiendo al ISM se encuentran salinizadas y muy salinizadas en su gran mayoría y la CS fluctúa entre medianamente contaminada a agua de mar, lo que demuestra una ocurrencia marina en el por el alto contenido de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , dando una clasificación de extremadamente salinas debido a su CE, siendo el pozo Celia Sánchez el más perjudicado, seguido de Yenín y Los Haticos.

4. Las aguas superficiales se encuentran débilmente salinizadas y ligeramente contaminadas, lo que puede estar dado a un intercambio iónico con las aguas subterráneas de la zona. En el caso de las aguas superficiales el canal de la Presa de Magueyal aunque en con valores inferiores muestra características similares a la de las aguas subterráneas, con la excepción de no mostrar peligro de toxicidad para las plantas por presencia de iones específicos y por su parte el Río Holguín muestra las mejores características pero posee una alta contaminación ya que por el fluyen las aguas negras

procedente de la ciudad de Holguín y de varias entidades que son focos contaminantes para el mismo.

5. En los suelos de la zona de estudio por su tolerancia a la salinidad los cultivos establecerse deben de estar entre tolerantes y semitolerantes empleando normas de riego que deben fluctuar entre los 195,0 y 975,0 m<sup>3</sup>/ha en dependencia de la profundidad radical del cultivo, siendo necesario aplicar un exceso de agua para lixiviación de sales.

6. Atendiendo al potencial de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes se pronostica que los suelos ubicados en las áreas de los pozos Celia Sánchez y Yenín son poco salinizables y los de Los Haticos y Rudiberto Cuadrado son muy salinizable.

## 4.2. Recomendaciones

1. Validar las seis fases de la tecnología propuesta en la zona de estudio.
2. Aplicar la tecnología propuesta en otras zonas de la Cuenca del Cauto con similares características a la del estudio.
3. Una vez validada la tecnología realizar un estudio económico ambiental sobre su implementación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aceves, N.; Palacios, V. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. México, Chapingo. Colegio de Postgraduados. 58 P. (monografía).
2. Agenda21local/GEO-Holguín. 2008. Modelo para la Gestión Urbano Ambiental. Experiencias de su aplicación en Holguín. Holguín. Agenda21local/.45 p. (reseña).
3. Álvarez, R. 2008. Salinidad y uso de aguas salinas para la irrigación de cultivos y forrajes en Cuba. Ciencia y Tecnología Ganadera (CU) 1 (2): 1-12, agosto.
4. Allen, R.; Pereira, L. 2006. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma. Irrigation and Drainage paper. 298 p.
5. Ayala, J. 1999. Análisis de los conceptos fundamentales de riesgo y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos. España, Madrid. Tecnológico Geominero, 147 P. (monografía).
6. Ayers, R.S.; Westcot, D.W. 1987. Water Quality for Agriculture. Roma. Irrigation and Drainage paper.174 p.
7. Bush, V.; Sherbakova; N. 1986. Nuevos datos sobre la tectónica profunda de Cuba. Revista Geotectónica (CU) (3), 25-41, septiembre.
8. Cairo, P. Edafología. 1994. La Habana. Pueblo y Educación. 385p.
9. Calderón, F. La conductividad Eléctrica -ce- y la conductividad Eléctrica a granel -ceg- del suelo como base para la medición de la humedad del suelo. [en línea] febrero 2005. Disponible en: [www.drcalderonlabs.com](http://www.drcalderonlabs.com) [Consulta: diciembre 15 2012].

10. Carretero, J. 1968. Guía técnica para resolver problemas de riego. Argentina, Mendoza. Agencia de extensión. 163 P. (monografía).
11. Castellanos, A. 2003. Improving soil moisture with conservation agriculture. LEISA Magazine (PE) 19 (2): 27-39, mayo.
12. Chaterlan, Y.; Rodríguez, R.; Zamora, E. 2005. Propuesta de Metodología para el estudio de la desertificación en el Valle del Cauto. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (CU) 14 (1): febrero.
13. Cid, G.; Herrera, J.; Sierra, L. 2004. Gestión del agua en el manejo integral de los vertisuelos bajo diferentes agroecosistemas. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (CU) 13 (3): 35-42, septiembre.
14. Coraza Hernández, R. 1991. Agrometeorología. Santa Clara. CDICT. 391p.
15. Corella, T.; Anderez, M. 2002. Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe (ES) 27 (1): 103-115, marzo.
16. Couvillion, L. . Obesidad y patrones alimenticios infantiles [en línea] Vol. 3 No. 3 (julio 2002). Leaven. Disponible en: <http://www.lalecheleague.org/lang/Lvjunjul02d.html> [Consulta: 20 de agosto 2011].
17. De Almeida, A.; Gisbert M. Variación en la calidad del agua de riego en un huerto de cítricos [en línea]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10 No. 1 (enero 2006). Brasil Disponible en: <http://www.agriambi.com.br> [Consulta: 20 de agosto 2011].
18. De Miguel, C. Índice de salinidad marina en acuíferos: su determinación y aplicación con fines de riego y mejoramiento de suelos. [en línea] julio 1994. Disponible en: <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/> [Consulta: enero 25 2012].

19. De Miguel, C. 1997. Metodología para pronóstico de factibilidad de salinización de suelos por riego sobre formaciones arcillosas de origen marino. Bilbao. LANKOPI. 260 p.
20. De Miguel, C. Evaluación y zonificación de la provincia Holguín por peligrosidad de procesos desertificantes presentes y en desarrollo. [en línea]Abril 2000. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/> [Consulta: enero 10 2012].
21. De Miguel, C. 2008. Hidrogeología aplicada al estudio de suelos agrícolas. Moa. ISSM. 86 p.
22. De la Rosa, A.; Herrera, M.; González, O. 2011. Propiedades Macroestructurales de un Vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (CU) 20 (2): 18-27, julio.
23. Delgado, C.; Pacheco, J. 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. Agricultural Water Management (MEX) 97 (10): 23-33, octubre.
24. Earthscan. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. [en línea] mayo 2007. Disponible en: [www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk) [Consulta:enero 25 2012].
25. FAO. Perspectivas de la agricultura mundial [en línea] abril 2007. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/default.htm> [Consulta:marzo 15 2012].
26. FAO. Programa de acción Internacional sobre Agua y desarrollo agrícola sostenible [en línea] Mayo 2003. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/> [Consulta:enero 25 2012].

27. Fernández Cirelli, A; Arumi, J. 2009. Efectos Ambientales del Riego en Regiones Áridas y Semi-Áridas en América Latina. Chilean J. Agric. Res. (CHIL) 69 (1): 27-40, abril.
28. Franco, G. 1986. Esquema de la historia de la sedimentación en el Neógeno de Cuba. Ciencia de la Tierra(ES) 81-91, abril.
29. Hernández Santana, J. R., D. A., Lilienberg y González Ortiz. 1986. Regio-nalización morfoestructural de la Sierra Maestra y de las depresiones circundantes. Ciencia de la Tierra(ES) 36-48, abril.
30. Hernández Santana, J.R. 1989. Geomorfología estructural del sistema montañoso de la Sierra Maestra y de las depresiones graben adyacentes. La Habana. Ed. Academia. 45 p.
31. Holzapfel, E. Tecnologías de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable. [en línea] julio 2002. Disponible en: [http://site.ebrary.com/lib/vepingsp/docDetail.action/universidad de concepción](http://site.ebrary.com/lib/vepingsp/docDetail.action/universidad_de_concepción) [Consulta: enero 10 2012].
32. INRH. Boletín hidrológico [en línea] octubre 2001. Disponible en: <http://www.hidro.cu/> [Consulta: mayo 25 2011].
33. Iturralde- Vinent, M. 2006. Naturaleza geológica de Cuba. La Habana. Ed. Academia. 14 p.
34. Ley 81. Ley del Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba. Vig. Julio 1997.
35. Lilienberg, D.; Hernández, M. ; Marquez Tablón, L.; Alvarez Gómez. 1993. Movimientos tectónicos recientes en Cuba. La Habana. Ed. Academia. 598 p.

36. López, F. 2001. Una nueva política para la gestión sustentable del agua. En un enfoque para la gestión sustentable del agua: Experiencia de cooperación. Argentina, Buenos Aires. Asociación de Universidades del grupo Montevideo. 85 P. (monografía).
37. Lora, B. 1999. Distribución de la evaporación por provincias y municipios. Cuba, La Habana. CENHICA. 96 P. (monografía).
38. Llanos P. Parámetros para la evaluación de la calidad de aguas para riego. [en línea] abril 1999 Disponible en: <http://www.walcoagro.com/> [Consulta: junio 27 2011].
39. Makarov, V.I. 1986. Neotectónica de Cuba Oriental. Característica general. Regiones central y septentrional. Revista Geotectónica (CU) (6), 85-86, diciembre.
40. Makarov, V. 1987. Neotectónica de Cuba Oriental. Sistema orogénico Sierra Maestra-Baracoa. Revista Geotectónica(CU) (2), 101 – 109, julio.
41. Martínez P. Uso eficiente del agua en riego. [en línea] marzo 1997. Disponible en: [http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso\\_eficiente/](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/) [Consulta: marzo 18 2012].
42. MEA. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. [en línea] octubre 2005. Disponible en: [www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk) [Consulta: enero 25 2012].
43. Miliarium A. Calidad de agua para riego. [en línea] mayo 2004. Disponible en: [http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/CalidadAgua /](http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/CalidadAgua/) [Consulta: enero 10 2012].
44. Nagy, E., K. Brezsnyszky, A. Brito, D. Coutin. 1976. Texto explicativo del mapa geológico de Oriente a escala 1: 250 000 de la brigada húngaro-cubana. La Habana. Ed. Academia. 642 p.
45. Núñez Tablada, R. 2010. Tecnología alternativa para la caracterización de los suelos agrícolas degradados del tipo de los vertisoles en la Cuenca del Rio Cauto, provincia Holguín. La Coruña. 145

h. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias de la Tierra y Medioambiental)--  
Ministerio de Educación Superior.

46. Ortega, S.F., Peña, F., Castillo, N. 1986. La salinidad de los suelos de Cuba. Aspectos económicos globales. Revista Ciencias de la Agricultura (CU) 27(3): 137-144, septiembre.

47. Pacheco Seguí, J. 1995. Riego y Drenaje. La Habana. Pueblo y Educación. 414 p.

48. Petersen, P.; Da Rocha, J. 2003. Enfoque agroecológico para la promoción de la seguridad hídrica zonas semiáridas. LEISA Revista de agroecología (PE) 19 (2): 38-45, mayo.

49. Pujol, P. Evaluación de la calidad del agua de riego sobre el suelo y los cultivos [en línea] marzo 2000 Disponible en: <http://ict.udg.co.cu/index.php/> [Consulta: noviembre 20 2012].

50. Reville, R. 1941. Criteria for recognition of sea water in ground-water. Trans. Amer. Geophysical Union (EU) 22 (1): 593-597, febrero.

51. Ruda, E.; Mongiello A.; Contini, L. 2005. Quality of Ground Water Used for Supplementary Irrigation on Argiudolls of Central Santa Fe, Argentina. Agricultura Técnica (CHIL) 65 (4): 32-41, marzo.

52. Sánchez J. Clasificación y uso de las aguas de riego. [en línea] enero 2007 Disponible en: <http://www.fertitec.com> [Consulta: diciembre 18 2011].

53. Saxton K. Hydraulic properties calculator. [en línea] Mayo 1986 Disponible en: <http://www.bsyse.wsu.edu/~saxton> [Consulta: octubre 10 2011].

54. Sigarreta Vilche, Sergio. Conferencias del Modulo de Introducción a la Gestión Ambiental. Maestría Gestión del Medio Ambiente, Holguín, 2004.

55. Skavalanovich, I.; Cedenko, M. N. 1980. Hidrogeología, ingeniería geológica y desecamiento de yacimientos minerales. Moscú. Nedra. 94 p.
56. Theslock. Sistema de Gestión Ambiental, Directrices Sobre Principios Sistemas y Técnicas de Apoyo. [en línea] junio 2003 .Disponible en: [http://www.theslock.com/ NC ISO. 14004](http://www.theslock.com/NC_ISO_14004) [Consulta:enero 25 2012].
57. Torres A. The salinity problem of the water and soil resources in lluta and azapa valleys in northern chile [en línea]. IDESIA Vol. 26 No. 3 (july 2008) Chile Disponible en: <http://www.scielo.cl/> [Consulta: 20 de agosto 2011].
58. UN–Water. United Nations World Water Development Report: Water, a Shared Responsibility. [en línea] enero 2006 Disponible en: [www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk) [Consulta:enero 25 2012].
59. Vázquez, M.; Gelati P.; Millán G. 2006. Sustentabilidad del riego complementario en suelos Udipsament Típico y Hapludol Entico de ArgentinaRevista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (BRA) 10 (3): 593–603, enero.
60. Watson,R.T., Gitson H. Mobilization, Difusion, and Use of Scientific Expertise.” Informe encargado por el Institute for Sustainable Development and International Relations. [en línea] julio 2004 . Disponible en: [www.iddri.org/iddri/telecharge/gie/wp/iddri](http://www.iddri.org/iddri/telecharge/gie/wp/iddri). [Consulta: marzo 18 2012].
61. Wilcox, L. Y Durum, W. 1967. Irrigation of agricultural lands. Madison. Wisconsin. 122 p.

## ANEXOS

Anexo 1. Parámetros evaluados para la calidad del agua para riego por las diferentes clasificaciones

Tabla 1 Parámetros evaluados para la calidad del agua para riego por las diferentes clasificaciones

Clasificación	Parámetros que evalúa
Laboratorio de Salinidad USA	Contenido de sales Solubles: Conductividad Eléctrica (CE) Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo: Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Rango de adsorción del Sodio (RAS). Contenido de elementos tóxicos para las plantas: Boro (B).
Wilcox	Contenido de sales Solubles: Conductividad Eléctrica (CE) Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo: Porcentaje de Sodio Soluble (PSS). Contenido de elementos tóxicos para las plantas: Boro (B).
Coefficiente de Irrigación	– Contenido de sales Solubles: Conductividad Eléctrica (CE) – Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo: Coeficiente de irrigación (CI), – Contenido de elementos tóxicos para las plantas: Boro (B).
Universidad de California	– Contenido de sales Solubles: Conductividad Eléctrica (CE) – Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo: Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Porcentaje de Sodio Soluble (PSS) – Contenido de elementos tóxicos para las plantas: Boro (B).
Aceves y Palacios	Contenido de sales Solubles: Conductividad Eléctrica (CE), Salinidad Efectiva (SE) y Salinidad potencial (SP) Efecto probable del Sodio sobre las características físicas del suelo: Rango de adsorción del Sodio (RAS), Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Porcentaje de Sodio Posible (PSP) Contenido de elementos tóxicos para las plantas: Cloro (Cl <sup>-</sup> ) y Boro (B).
FAO	Salinidad: Sales Solubles Totales (SST) y Conductividad Eléctrica (CE) Infiltración del Suelo: Rango de adsorción del Sodio (RAS) Toxicidad de iones específicos: Sodio (Na <sup>+</sup> ), Cloro (Cl <sup>-</sup> ) y Boro (B). Varios: pH, Composición Bacteriológica.

Anexo 2. Fórmula y clasificación de las aguas por su grado de Contaminación Salina

$$CS = \frac{Cl}{CO_3 + CO_3H} ; \text{ El valor de los iones se expresa en meq / l } \quad (2.1)$$

Tabla 2 Clasificación de las aguas por su grado de contaminación salina

Resultados relación CS	Denominación del agua.
< 0,5	Agua normal
0,5 – 1,8	Agua ligeramente contaminada
1,8 – 2,8	Agua moderadamente contaminada
2,8 – 6,6	Agua bastante contaminada
6,6 – 15,5	Agua altamente contaminada
> 15,5	Agua de mar

### Anexo 3. Fórmula y clasificación de las aguas por el Índice de Salinidad Marina

$$ISM = \frac{\%Cl + \%Na}{\%HCO_3 + \%Ca} \quad (2.2)$$

Cuando las aguas que se analizan pertenecen a acuíferos presentes en rocas magmáticas, donde los contenidos de  $Mg^{2+}$  generalmente son muy superiores a los contenidos de  $Ca^{2+}$ , entonces en la expresión para determinar el Índice de Salinidad Marina (ISM) puede sustituirse el Calcio ( %  $Ca^{2+}$  ) por el contenido de Magnesio ( %  $Mg^{2+}$  ).

Tabla 3 Clasificación de las aguas por el Índice de Salinidad Marina (ISM)

Valor I.S.M.	Clasificación por ISM
< 1	Aguas o acuífero no salinizado
1 – 1,9	Aguas o acuífero débilmente salinizado
2 – 6,9	Aguas o acuífero salinizado
1 - 21	Aguas o acuífero muy salinizado
> 21	Aguas o acuífero hipersalinizado

#### Anexo 4. Clasificación de las aguas por su Conductividad Eléctrica

##### Clasificación por Conductividad Eléctrica:

- C 1- Aguas de baja salinidad: Ec entre 100 y 250 micromhos/cm. Con esta agua se puede regar la mayoría de los suelos y cultivos sin temer a perjuicios salinos. El lavado natural de los suelos es suficiente y solo en los terrenos de muy baja permeabilidad hay que realizar trabajos especiales de drenaje.
- C 2- Aguas de salinidad media: Ec entre 250 y 750 micromhos/cm. Esta agua puede utilizarse en condiciones naturales del suelo si existe un lavado moderado del mismo. Los cultivos con resistencia media a la salinidad se desarrollan bien.
- C 3- Aguas altamente salinas: Ec entre 750 y 2 250 micromhos/cm. Para el uso de estas aguas deben existir buenas condiciones de drenaje, se debe controlar la salinidad del suelo y solo deben cultivarse plantas muy resistentes a la salinidad.
- C 4- Aguas extremadamente salinas: Ec superiores a 2 250 micromhos / cm. Esta agua solo se podrá utilizar en suelos muy permeables y de buen drenaje. Deberá mantenerse control sobre la salinidad del suelo y se podrán regar cultivos muy resistentes a la salinidad.

Anexo 5. Fórmula y clasificación de las aguas por la Salinidad Potencial

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{2-}; \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l (2.3)}$$

Tabla 4 Clasificación de las aguas por Salinidad Potencial (SP)

Valor de SP	Clasificación
$\ll 3$	Aguas buenas para el riego
3 – 15	Aguas condicionales para el riego (debe mantenerse control sobre el comportamiento químico del suelo).
$> 15$	Aguas no recomendables para riego

Anexo 6. Fórmulas y clasificación del agua según la Salinidad Efectiva

Si  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ , entonces:

$$SE = SC^* - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}) \quad (2.4)$$

Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ , pero  $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces:

$$SE = SC^* - Ca^{2+} \quad (2.5)$$

Si  $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  pero  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  entonces:

$$SE = SC^* - (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \quad (2.6)$$

Si  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$  entonces:

$$SE = SC^* - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (2.7)$$

SC: Suma de Cationes

El valor de los iones se expresa en meq / l

\* Si la suma de cationes es menor que la de aniones, deberá emplearse la suma de aniones en lugar de la de cationes

Tabla 5 . Clasificación del agua según la Salinidad Efectiva (SE)

Valor de SE	Clasificación
< 3	Buena
3 - 10	Condicional
> 10	No recomendable

Anexo 7. Fórmulas para el cálculo de pHc y valoración del efecto del Na<sup>+</sup> sobre la estructura del suelo por el Rango de Adsorción del Sodio.

$$RAS = \frac{(Na^+)}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} ; \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l } \quad (2.8)$$

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} [ 1 + ( 8,4 - pHc ) ] \quad (2.9)$$

Donde el factor de ajuste que se introduce depende de pHc, el cual a su vez viene dado por la expresión 2.10 :

$$pHc = (pK'2 - pK'C) + p ( Ca^{2+} + Mg^{2+} ) + p( Alk) \quad (2.10)$$

Donde:

$$(pK'2 - pK'C) \text{ es función de } ( Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ ) \text{ en meq/l} \quad (2.11)$$

$$p ( Ca^{2+} + Mg^{2+} ) \text{ es función de } ( Ca^{2+} + Mg^{2+} ) \text{ en meq/l} \quad (2.12)$$

$$p( Alk) \text{ es función de } (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \text{ en meq/l} \quad (2.13)$$

El valor del pHc se puede calcular por la tabla 6 conociendo las relaciones que anteriormente se exponen y su clasificación se expone la tabla 7.

Tabla 6 Elementos para el cálculo de pHc

Suma de la Concentración (meq/l)	(pK'2 - pK'C)	p ( Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> )	p( Alk)
0.05	2.0	4.6	4.3
0.10	2.0	4.3	4.0
0.15	2.0	4.1	3.8
0.20	2.0	4.0	3.7
0.25	2.0	3.9	3.6
0.30	2.0	3.8	3.5
0.40	2.0	3.7	3.4
0.50	2.1	3.6	3.3
0.75	2.1	3.4	3.1
1.00	2.1	3.3	3.0
1.25	2.1	3.2	2.9
1.50	2.1	3.1	2.8
2.00	2.2	3.0	2.7
2.50	2.2	2.9	2.6
3.00	2.2	2.8	2.5
4.00	2.2	2.7	2.4
5.00	2.2	2.6	2.3
6.00	2.2	2.5	2.2
8.00	2.3	2.4	2.1
10.00	2.3	2.3	2.0
12.50	2.3	2.2	1.9
15.00	2.3	2.1	1.8
20.00	2.4	2.0	1.7
30.00	2.4	1.8	1.5
50.00	2.5	1.6	1.3
80.00	2.5	1.4	1.1

Tabla 7 Valoración del efecto del Na<sup>+</sup> sobre la estructura del suelo

	Tipo de problema		
	Sin problemas	crecientes	graves
RAS ajustado	< 6,0	6,0 a 9,0	> 9,0

Anexo 8. Fórmulas y clasificación de las aguas por el Contenido de Sodio Residual

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}); \text{ El valor de los iones se expresa en meq / l } \quad (2.14)$$

Tabla 8 Clasificación de las aguas por el Contenido de Sodio Residual (CSR)

Valor	Clasificación
$\text{CSR} < 1,25$	Aguas buenas para el riego
$\text{CSR}. 1,25 - 2,5$	Aguas dudosas para el riego (debe controlarse la salinidad del suelo durante la utilización de estas aguas).
$\text{CSR}. > 2,5$	Las aguas no son aptas para el riego.

Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor del CSR puede considerarse igual a cero.

Anexo 9: Fórmula y denominación de las aguas por el Porcentaje de Sodio Posible

$$PSP = \frac{Na}{SE} 100; \% \quad (2.15)$$

Tabla 9 Denominación de las aguas por el Porcentaje de Sodio Posible (PSP)

Valor de PSP	Denominación
< 50%	Aguas buenas
> 50%	Aguas condicionales

Anexo 10. Fórmula y clasificación del agua según los valores del Porcentaje de Sodio Soluble.

$$\text{PSS} = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} 100 \quad ; \text{ El valor de los iones se expresa en meq / l} \quad (2.16)$$

Tabla 10 Clasificación del agua según los valores del Porcentaje de Sodio Soluble. (PSS)

PSS < 20; Aguas excelentes para el riego.
PSS: 20 – 40; Aguas buenas para el riego.
PSS: 40 – 60; Aguas admisibles para el riego.
PSS: 60 – 80; Aguas dudosas para el riego.
PSS: > 80; Aguas no aptas para el riego.

Anexo 11. Fórmulas y clasificación de las aguas por el Coeficiente de irrigación

1er. Caso: El contenido del ión  $\text{Na}^+$  en meq/l es menor que el contenido del ión  $\text{Cl}^-$  en meq/l, es decir,  $\text{Na}^+ < \text{Cl}^-$ . Está presente el  $\text{NaCl}$ .

$$Ci = \frac{288}{5\text{Cl}^-}; \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l} \quad (2.17)$$

2do. Caso: El contenido del ión  $\text{Na}^+$  en meq/l es mayor que el contenido del ión  $\text{Cl}^-$  en meq/l., pero menor que el contenido total de ácidos fuertes, es decir:  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^-$ . Está presente el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{NaSO}_4$ .

$$Ci = \frac{288}{\text{Na}^+ + 4\text{Cl}^-}; \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l} \quad (2.18)$$

3er. Caso: El contenido del ión  $\text{Na}^+$  es mayor que el contenido de los iones de ácidos fuertes, es decir:  $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ . Está presente el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{NaSO}_4$  y el  $\text{NaCO}_3$ .

$$Ci = \frac{288}{10\text{Na}^+ - (5\text{Cl}^- + 9\text{SO}_4^{2-})}; \text{ El valor de los iones se expresa en meq/l} \quad (2.19)$$

Tabla 11 Clasificación de las aguas por el coeficiente de irrigación (Ci)

Coeficiente de irrigación Ci	Calidad del agua	Características del agua
$> 18$	Buena	El agua puede utilizarse largos periodos sin necesidad de tomar medidas especiales contra la acumulación de sales dañinas en el suelo.
$18 - 6$	Satisfactoria	La utilización de esta agua requiere de medidas especiales para evitar la acumulación paulatina de sales en el suelo, excepto en suelos friables con drenaje libre.
$5,9 - 1,2$	No satisfactoria	Para la utilización de esta agua en casi todos los casos se requiere de drenaje artificial.
$\ll 1,2$	Mala	Esta agua en la práctica no es apta para el riego.

Anexo 12. Concentración de iones que pueden crear problemas de toxicidad

Tabla 12 Concentración de iones que pueden crear problemas de toxicidad

ión (meq /l)	Buena	Regular	Mala
Na <sup>+</sup>	< 3	3 a 9	> 9
Cl <sup>-</sup>	< 4	4 a 10	> 10
B	< 0,7	0,7 a 2,0	> 2,0

Anexo 13. Clasificación de las aguas por su pH

Tabla 13 Clasificación de las aguas por su pH

Valor del pH	Denominación de las aguas.
$< 3$	Aguas muy ácidas
3 – 5	Aguas ácidas
5 – 6,5	Aguas débilmente ácidas
6,5 – 7,5	Aguas neutras
7,5 – 8,5	Aguas débilmente básicas
8,5 – 9,5	Aguas básicas
$> 9,5$	Aguas muy básicas

Anexo 14. Evaluación de las aguas por su contaminación bacteriológica

Tabla 14 Evaluación de las aguas por su contaminación bacteriológica

<i>Cantidad de colonia</i> (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Denominación de las aguas.
0 – 10	Totalmente limpia
10 – 100	Muy limpia
100 – 1 000	Limpia
1 000 – 10 000	Algo contaminada
10 000 – 100 000	Contaminada
> 100 000	Totalmente contaminada

Anexo 15. Algunas concentraciones establecidas para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Algunas concentraciones establecidas para la (DBO):

La Ley General de Aguas establece como valor límite de 15 mg/l, de DBO, para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III.

El Anteproyecto de Norma de Calidad para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de Chile, establece como valor límite de 5 mg/l para el DBO, en aguas destinadas para el riego irrestricto.

La Norma para prevenir la Contaminación Ambiental de Paraguay, establece como concentración máxima de 10 mg/l de DBO, en aguas destinadas para el riego de hortalizas o plantas frutícolas u otros cultivos destinados al consumo humano en forma natural.

## Anexo 16. Fórmulas para la determinación del régimen hídrico

– Reserva máxima:

$$W_{Máx} = 100 \times H \times \alpha \times H \times CC; \quad m^3/ha \quad (2.20)$$

– Reserva mínima:

$$W_{Mín} = 100 \times H \times \alpha \times H \times LP; \quad m^3/ha \quad (2.21)$$

Donde:

H: Capa activa; m

$\alpha$ : Densidad Aparente; g/cm<sup>3</sup>

CC: Capacidad de campo; %

LP: Límite productivo; % de CC

– Norma Parcial:

$$MP = W_{Máx} - W_{Mín} \quad \text{ó} \quad MP = 100 \times H \times \alpha \times H \times (CC - LP); \quad m^3/ha \quad (2.22)$$

– Evapotranspiración:

$$Evt = E_o \times Kb; \quad mm \text{ o } m^3/ha \quad (2.23)$$

Donde:

E<sub>o</sub>: Evaporación; mm o m<sup>3</sup>/ha

Kb: Coeficiente bioclimático

– Intervalo de riego:

$$IR: MP/ Evt; \quad \text{Días} \quad (2.24)$$

Anexo 17. Umbral de tolerancia de sales de un cultivo.

Tabla 15 Umbral de tolerancia de sales de algunos cultivos según la Conductividad Eléctrica.

Cultivos tolerantes 10000- 18000 micromhos/cm	Cultivos semitolerantes 4000 – 10000 micromhos/cm	Cultivos de baja tolerancia 2000- 4000 micromhos/cm
<p><i>Gossypium hirsutum</i> (Algodón)  <i>Spinacia oleraceae</i> (Espinaca)  <i>Beta vulgaris</i> (Remolacha)  <i>Beta vulgaris L. var. Cicla</i>                      (Acelga)                      Pastos</p>	<p><i>Saccharum officinarum</i> (Caña de azúcar)  <i>Oriza sativa</i> (Arroz)  <i>Sea mays</i> (Maíz)  <i>Triticum aestivum</i> (Trigo)  <i>Sorghum bicolor</i> (Sorgo)  <i>Cucurbita sp</i> (Calabaza)  <i>Cucumis melo</i> (Melón)  <i>Cucumis sativo</i> (Pepino)  <i>Lactuca sativa</i> (Lechuga)  <i>Helianthus annuus</i> (Girasol)  <i>Cicer arietinum</i> (Garbanzo)  <i>Brassica oleracea</i> (Col)  <i>Solanum lycopersicum</i> (Tomate)  <i>Brassica o.brotis</i> (Brócoli)  <i>Allium cepa</i> (Cebolla)  <i>Daucus carota</i> (Zanahoria)  <i>Carica papaya</i> (Fruta bomba)  <i>Ananas comosus</i> (Piña)  <i>Solanum tuberosum</i> (Papa)</p>	<p><i>Citrus sp</i> (Cítricos)  <i>Ipomoea batata</i> (Boniato)  <i>Capsicum annuum</i> (Ají ,Pimiento)  <i>Glycine max</i> (Soya)  <i>Phaseolus vulgaris</i> (Frijol)  <i>Arachis hipogaea</i> (Maní)  <i>Solanum melongena</i> (Berenjena)  <i>Raphanus sativo</i> (Rábano)  <i>Apium graveolens</i> (Apio)  <i>Persea americana</i> (Aguacate)  <i>Mangifera indica</i> (Mango)</p>

Anexo 18. Fórmula para la determinación del Requerimiento de Lixiviación

$$R.L. = \frac{C.E.ar}{C.E.ad} \times 100 \quad (2.25)$$

Donde:

R.L. = Requerimiento de lixiviación

C.E.ar = Conductividad Eléctrica del agua de riego (micromhos/cm)

C.E.ad = Conductividad Eléctrica del agua de drenaje (micromhos/cm), e igual al Umbral de tolerancia de sales de un cultivo dado. Ver anexo 17

Anexo 19. Período crítico de algunos cultivos para la exigencia al agua:

***Sea mays*** (Maíz): Desde que aparecen las flores hasta que aparecen las barbas.

***Solanum tuberosum*** (Papa): Desde que aparecen las flores hasta 3 semanas antes de la cosecha.

***Phaseolus vulgaris*** (Frijol): Durante la floración y el llenado de las vainas.

***Oriza sativa*** (Arroz): Durante la floración y el desarrollo del grano.

***Sorghum bicolor*** (Sorgo): Durante la floración y formación del grano.

***Glycine max*** (Soya): Durante la floración y formación del grano.

***Saccharum officinarum*** (Caña de azúcar): Durante el período de rebrote y alargamiento de los tallos.

***Nicotiana tabacum***(Tabaco): Durante el período de crecimiento rápido.

***Solanum lycopersicum*** (Tomate): Trasplante, formación de la floración y durante el crecimiento rápido del fruto.

***Allium cepa*** (Cebolla): Durante el crecimiento rápido del bulbo.

***Citrus sp*** (Cítricos): Durante la floración y formación del fruto.

***Arachis hypogaea*** (Maní): Durante la floración y formación de la cosecha, especialmente, durante la formación de cápsulas.

***Ananas comosus*** (Piña): Durante el período de crecimiento vegetativo.

***Cucumis melo*** (Melón): Durante el desarrollo de la enredadera, floración y formación del fruto.

***Musáceas***: Primera etapa del período vegetativo, floración y formación de la cosecha

Para todos los cultivos el agua es clave para la germinación de las semillas botánicas y brotación de las semillas agrícolas.

Anexo 20. Magnitud del ascenso capilar máximo y clasificación de los suelos según su potencialidad de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes.

Tabla 16 Magnitud del ascenso capilar Máximo según Skabalanóvich *et al*, (1980).

Litología	Ascenso Capilar Máximo (m)	Litología	Ascenso Capilar Máximo (m)
Arena gruesa	0.15	Arcilla arenosa ligera	3.5
Arena media	0.50	Arcilla arenosa pesada	6.5
Arena fina	1.10	Arcilla	12.0 y más
Arena arcillosa	2.0		

Tabla 17 Clasificación de los suelos según su potencialidad de salinización por condiciones hidrogeológicas existentes

Profundidad de las aguas Subterráneas (Ascensos cap.) (m)	Litología del Estrato de Cubierta ( Zona de aireación o No Saturada ) Valores I.S.M. de las Aguas Subterráneas.																			
	Arenas				Arenas Arcillosas				Arcillas Arenosas Ligeras				Arcillas Arenosas Pesadas				Arcillas			
	<1	1-1,9	2-6,9	>7	<1	1-1,9	2-6,9	>7	<1	1-1,9	2-6,9	>7	<1	1-1,9	2-6,9	>7	<1	1-1,9	2-6,9	>7
<1,1	P.S.	S.	M.S.	E.S.	S.	S.	M.S.	E.S.	S.	M.S.	M.S.	E.S.	S.	M.S.	E.S.	E.S.	S.	M.S.	E.S.	E.S.
1,1 - 2,0	N.S.	P.S.	S.	M.S.	P.S.	S.	S.	M.S.	S.	S.	M.S.	M.S.	S.	M.S.	M.S.	E.S.	S.	M.S.	E.S.	E.S.
2,0 - 3,5	N.S.	N.S.	P.S.	S.	P.S.	P.S.	S.	S.	P.S.	S.	S.	M.S.	S.	S.	M.S.	M.S.	S.	M.S.	M.S.	E.S.
3,5 - 6,5	N.S.	N.S.	N.S.	P.S.	N.S.	N.S.	N.S.	P.S.	N.S.	P.S.	P.S.	S.	P.S.	S.	S.	M.S.	P.S.	S.	M.S.	M.S.
6,5 - 12,0	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	P.S.	N.S.	P.S.	S.	S.	N.S.	P.S.	S.	S.
>12	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	P.S.	N.S.	N.S.	P.S.	P.S.

N. S.- SUELOS PRACTICAMENTE NO SALINIZABLES; P.S.- SUELOS POCO SALINIZABLES; S- SUELOS SALINIZABLES; M. S.- SUELOS MUY SALINIZABLES; E.S. – SUELOS EXTREMADAMENTE SALINIZABLES.

Anexo 21. Resultados arrojados en el análisis del laboratorio

Tabla 18 Resultados arrojados en el análisis del laboratorio

ELEMENTOS	Pozo Celia Sánchez	Pozo Yenín	Pozo Los Haticos	Pozo Rudiberto Cuadrado	Rio Holguin	Canal Presa Magueyal
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/l)	0,1992	0	1,062	0,266	0	1,3944
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	2,8044	15,006	8,102	5,407	3,198	5,002
Cl <sup>-</sup> (meq/l)	51,973	45,9942	37,327	14,222	2,3124	3,6942
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/l)	0	0	0	0	0	0,9984
Ca <sup>2+</sup> (meq/l)	4,3912	1,7964	13,440	5,955	1,3972	1,8962
Mg <sup>2+</sup> (meq/l)	12,9876	15,207	11,974	5,014	3,5346	3,2058
Na <sup>+</sup> (meq/l)	36,2355	43,1955	44,776	15,486	2,6535	5,046
K <sup>+</sup> (meq/l)	0,1792	0,0512	0,188	0,102	0,1792	0,1536
CE (micromhos/cm)	5000	5330	6653,3	2646,67	710	943
pH	8,29	8,17	7,62	7,75	7,62	8,25
SST (mg/l)	3108	3766	4258,3	1693,67	420	725
CT (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	(+)1100	(+)1100	56,2	1100	150,1 <sup>4</sup>	(+)1100

Anexo 22. Ubicación de la zona de estudio



Ubicación aproximada de la zona de estudio